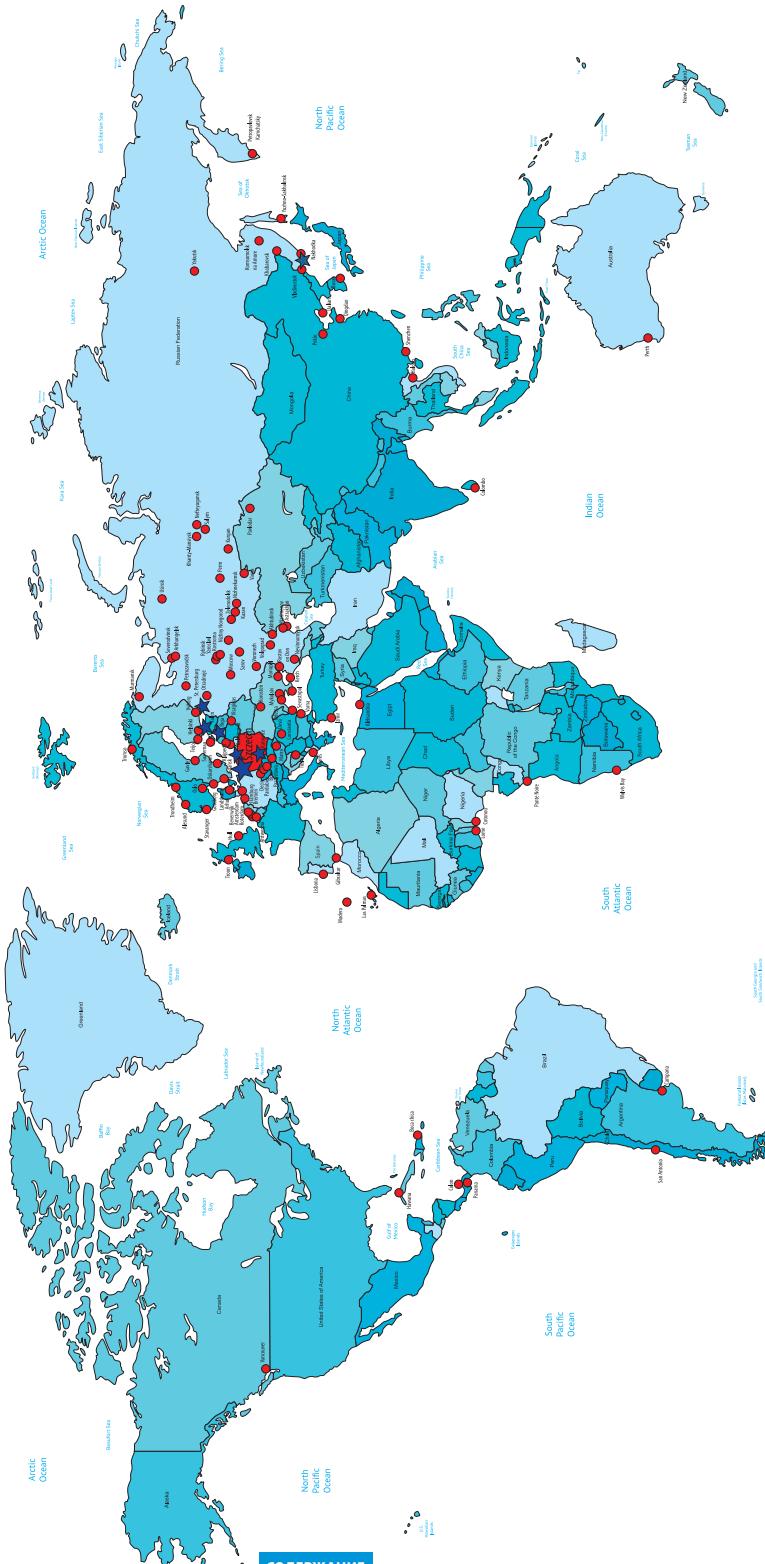


МОНТАЖ МАШИН И УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАСТМАССЫ ЕРУ



**Marine Service Jaroszewicz**

Сертифицированный сервис и дистрибуция
пластмасс ЕРУ, Чокстас и ЕроСтас

Места деятельности MSJ

Местонахождение фирмы

Авторизованные сервисы

Места осуществленных монтажных работ (1974—2014)

КАРОЛЬ ГРУДЗИНЬСКИ, ВЕСЛАВ ЯРОШЕВИЧ, ЕНДЖЕЙ РАТАЙЧАК,
МАГДАЛЕНА УРБАНЯК, ПАВЕЛ ГРУДЗИНЬСКИ

МОНТАЖ МАШИН И УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАСТИМССЫ ЕРУ



Щецин 2015

**Кароль Грудзиньски, Веслав Ярошевич, Енджей Ратайчак, Магдалена Урбаняк, Павел Грудзиньски
МОНТАЖ МАШИН И УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАСТМАССЫ ЕРУ**

В книге представлен современный метод монтажа судовых машин и устройств, а также машин и устройств, работающих на суше, на фундаментах с использованием выравнивающих подкладок, литых из специально для этой цели разработанной полимерной пластмассы ЕРУ.

Представлены общие требования, необходимые для соблюдения при монтаже машин и устройств (особенно в судостроении). Особое внимание уделено специфике пластмасс, применяемых для фундаментных подкладок машин, основам проектирования способов монтажа с их использованием, а также методам литья подкладок на месте их применения.

Приведены многочисленные примеры, иллюстрирующие различные возможности использования разработанной пластмассы ЕРУ при монтаже новых инсталляций машин и устройств, а также при ремонте и модернизации существующих объектов.

Представлены описания и результаты специальных исследований пластмассы ЕРУ, а также подчёркнуто положительное влияние её присутствия в разных конструкционных соединениях и на их поведение в рабочих условиях. Исследования были проведены не только для познавательных целей, но также в ответ на запросы инженерской практики. Они стали научной основой разработанного метода монтажа машин и устройств с использованием пластмассы ЕРУ.

В итоге этих действий научно и практически доказано и в настоящей книге описано, что применение фундаментных подкладок, литых из пластмассы ЕРУ, вместо традиционных металлических подкладок, не только упрощает и облегчает монтажные работы, но и сокращает время их выполнения. Оно гарантирует также значительно лучшее техническое качество крепления машин к фундаменту, обеспечивая установленным объектам лучшую работу, меньший износ частей, повышая надёжность и долговечность их работы. Очень важным эффектом таких инсталляций является заметное уменьшение вибраций и шумов машин и устройств, а также объектов, на которых они были установлены.

Всё это приводит к значительному снижению финансовых затрат на эксплуатацию объектов, машины и устройства которых установлены на подкладках из пластмассы ЕРУ, а также улучшает условия работы обслуживающего персонала и людей, которым эти объекты служат (например на судах, особенно пассажирских).

Книга предназначена для конструкторов и технологов судостроительной промышленности, а также инженеров и техников, занимающихся проектированием, модернизацией и монтажом различных наземных тяжёлых машин и устройств.

Она может также служить научным работникам и студентам технических учебных заведений, специализирующихся в судостроении и океанотехнике, а также в промышленном строительстве и постройке дорог и мостов.

Карту мест деятельности MSJ составила *Малгожата Николаос*

Авторы фотографий, представленных на рис. 2.1, 2.2а, 6.20а, 6.63с, 6.65: *Марек Часнойць, а на рис. 6.36 – Пётр Старенчак*

Подготовка к изданию:

Редактор – Катажина Митан

Проект обложки – Аркадиуш Ванцеж

Набор и вёрстка – Вальдемар Яхимчак

Перевод – дтн Ежи Войцех Пискож-Наленецк

Редакция русского языка – дтн Людмила Пискож-Наленецка

© Copyright by Marine Service Jaroszewicz s.c., www.epyresin.eu, Szczecin 2015

ISBN 978-83-7518-740-3

Издательство: PPH ZAPOL Sobczyk, Spółka jawna
al. Piastów 42, 71-062 Szczecin, tel./fax 91 435 19 00, www.zapol.com.pl
Издание I. Тираж 200 экз.
Печ.: Drukarnia ZAPOL Sobczyk, Spółka Jawna

Содержание

Введение	11
1. Характеристика и методы монтажа судовых машин и устройств на фундаментах	15
1.1. Общие задачи и требования к монтажу судовых машин и устройств	15
1.2. Монтаж машин и устройств на металлических подкладках	16
1.3. Монтаж машин и устройств на упругих подкладках.	18
1.4. Монтаж машин и устройств на литых пластмассовых подкладках	19
1.5. Характеристика монтажей машин и устройств с применением механических и литых пластмассовых подкладок.	20
2. Пластмассы, применяемые для фундаментных подкладок судовых машин и устройств	23
2.1. Общие требования, предъявляемые пластмассам для фундаментных подкладок	23
2.2. Развитие польских пластмасс и методов монтажа на них машин и устройств	29
3. Теоретические и экспериментальные основы исследований и описание процесса отверждения эпоксидных систем	53
3.1. Общая характеристика отверждения эпоксидных систем	53
3.2. Диаграммы структурирования эпоксидных пластмасс	57
3.2.1. Замечания общего характера	57
3.2.2. Диаграмма структурирования TTT: время—температура—превращение	58
3.2.3. Диаграмма структурирования CTT: конверсия—температура—превращение	63
3.2.4. Диаграмма структурирования T_g TP: температура стеклования—температура—свойство	64
3.3. Диаграммы структурирования TTT, CTT и T_g TP для пластмассы EPY	66
3.3.1. Способ выполнения диаграмм TTT, CTP и T_g TP	66
3.3.2. Диаграмма структурирования TTT для пластмассы EPY	67
3.3.3. Диаграмма структурирования CTT для пластмассы EPY	72
3.3.4. Диаграмма структурирования T_g TP для пластмассы EPY	74
3.4. Резюме	76
4. Проектирование процесса монтажа машин на подкладках, изготовленных из пластмассы EPY	78

4.1. Документация монтажа машин и устройств	78
4.2. Общая информация, касающаяся проектирования процесса монтажа машин и устройств	78
4.3. Проектные расчёты в процессе монтажа машин и устройств на подкладках из пластмассы ЕРУ	80
4.3.1. Общие замечания	80
4.3.2. Определение величины минимальной поверхности подкладок	80
4.3.3. Определение величины осевой силы в обжатом фундаментном болте	80
4.3.4. Расчёт величины момента затяжки гаек фундаментных болтов	82
4.3.5. Расчёт величины давления в гидравлическом устройстве для затяжки фундаментных болтов	82
4.3.6. Определение величины удлинения болтов, вызванного монтажным натяжением	82
4.3.7. Определение величины напряжения, растягивающего или сокращающего, отнесённого к наименьшему диаметру фундаментного болта, с учётом монтажного натяжения	83
4.3.8. Расчёты величины растягивающих напряжений, относящихся к диаметру резьбы фундаментного болта, с учётом монтажного напряжения	83
4.4. Примеры проектных расчётов процесса монтажа машин и устройств на подкладках ЕРУ	83
5. Монтаж судовых машин и устройств с применением пластмассы ЕРУ	90
5.1. Методы монтажа судовых машин и устройств на подкладках,литых из пластмассы ЕРУ	90
5.2. Способы монтажа дейдвудных труб и втулок подшипников гребного вала	98
5.2.1. Традиционный и современный способы монтажа дейдвудной трубы	98
5.2.2. Уплотнение пространств, заполняемых пластмассой	102
5.2.3. Наполнение заливаемого пространства пластмассой и её отверждение	104
5.2.4. Предохранение соединений от влияния внешних факторов	109
5.3. Вопросы безопасности труда и пожарной безопасности	109
6. Практическое применение подкладок из пластмассы при монтаже машин и устройств	110
6.1. Общие замечания	110
6.2. Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств	111
6.2.1. Двигатели и редукторы главного привода судов.	111
6.2.1.1. Общие замечания	111
6.2.1.2. Жёсткий монтаж машин и устройств	111
6.2.1.3. Эластичный метод монтажа машин и устройств с применением пластмассы	116

6.2.2. Дейдвудные трубы гребных валов, втулки подшипников валопровода и баллеров рулей.	118
6.2.3. Применение пластмассы для монтажа втулки подшипника судового валопровода.	118
6.2.3.1. Введение	118
6.2.3.2. Проект осаживания втулки на валу	122
6.2.3.3. Испытания на модели	125
6.2.3.4. Подготовка элементов конструкции и их монтаж	126
6.2.3.5. Финальные выводы и замечания	130
6.2.4. Палубные устройства	130
6.2.5. Монтаж цистерн на палубах судов	132
6.2.6. Применение пластмассы на морских плавучих буровых платформах	141
6.2.7. Монтажи роликовых путей вращательного барабана и крестовины ковша на судне, предназначенном для укладки кабеля на морском дне	143
6.2.8. Применение пластмассы EPY при монтаже уключин трансокеанской гребной лодки	145
6.3. Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на суше	147
6.3.1. Применение пластмассы при ремонтах и модернизации крупногабаритных поршневых компрессоров	147
6.3.1.1. Общая характеристика крупногабаритных поршневых компрессоров и выступающие в них проблемы	147
6.3.1.2. Сравнительный анализ традиционных и современных способов монтажа компрессорных установок	150
6.3.1.3. Модернизация монтажа поршневых компрессоров	153
6.3.2. Современные методы монтажа поршневых компрессоров фирмы NEUMAN & ESSER	161
6.3.3. Применение пластмассы при монтаже горных машин и устройств.	163
6.3.4. Применение пластмассы для монтажа экскаваторов и отвалообразователей в карьерной горной промышленности	166
6.3.5. Применение пластмассы EPY при монтаже энергетических машин и устройств	170
6.3.6. Применение пластмассы при укладке рельсов на стальных конструкциях и на железобетонных фундаментах или шпалах	173
6.3.7. Применение пластмассы EPY при строительстве мостов	175
6.4. Подведение итогов проведенного анализа и количественные данные, относящиеся к монтажам машин и устройств, выполненным на подкладках,литых из пластмасс, за 1974—2014 годы	179
7. Испытания пластмасс, применяемых для фундаментных подкладок машин	182
7.1. Общие требования, предъявляемые пластмассам для фундаментных подкладок машин	182

7.2. Общие замечания, касающиеся испытаний пластмасс, предназначенных для фундаментных подкладок	183
7.3. Исследования влияния разных сред и температуры на прочность пластмассы EPY на сжатие	184
7.4. Испытания влияния низких температур на характеристику пластмассы и величины некоторых параметров прочности на сжатие	187
7.5. Определение зависимости степени структурирования пластмассы EPY от температуры гелеобразования	189
7.6. Исследование влияния состояний отверждения и дополнительного отверждения пластмассы EPY на её прочностные характеристики при сжатии	194
7.7. Исследование влияния скорости деформации пластмассы EPY на её прочностные характеристики при сжатии	198
7.8. Исследования влияния повышенной температуры на характеристики пластмассы и на величины выбранных прочностных параметров при сжатии	201
7.9. Исследования деформируемости пластмассы EPY под постоянной сжимающей нагрузкой при разных скоростях её нагревания	210
7.10. Исследования линейной термической расширяемости пластмассы EPY	215
7.11. Исследования процесса ползучести и температуры термического прогиба пластмассы EPY	218
7.12. Исследование влияния охлаждения пластмассы EPY в жидком азоте на сопротивление сжатию и ударную вязкость	221
7.13. Исследования влияния постоянной горячей влажности на диэлектрические свойства пластмассы EPY	224
7.14. Испытания усталостной прочности пластмассы EPY при сжатии	225
7.15. Исследования динамических свойств пластмассы EPY	226
7.15.1. Общие замечания	226
7.15.2. Определение логарифмического декремента затухания колебаний и динамического модуля сдвига	227
7.15.3. Определение коэффициента потерь и динамического модуля упругости при сжатии	229
7.15.4. Определение полного акустического сопротивления (импеданца)	234
7.16. Сравнительные исследования статических и динамических свойств трёх разных пластмасс, используемых для фундаментных подкладок машин и устройств	237
 8. Исследования и моделирование конструкционных соединений с применением пластмассы EPY	 243
8.1. Исследования плоских стыковых непосредственных соединений и с тонким слоем пластмассы EPY	243
8.1.1. Соединения встык с нагрузкой нормальной силой	243
8.1.2. Контактные соединения, нагруженные нормальной постоянно действующей силой и переменной касательной силой	248

8.2. Испытания моделей фундаментных призонных болтов в пластмассе	251
8.3. Исследования пластмассы EPY в аспекте её оптимального использования для монтажа судовых устройств	257
8.3.1. Вступительные замечания	257
8.3.2. Теоретический анализ	257
8.3.3. Модельные испытания фундаментной подкладки якорной лебёдки	259
8.3.4. Итоги испытаний	260
8.4. Исследования влияния окрасочных покрытий на усадку судовых машин и устройств, устанавливаемых на подкладках, литых из пластмассы	260
8.4.1. Вступление	260
8.4.2. Использованные для исследований образцы и испытательный стенд	260
8.4.3. Программа, реализация и примерные результаты испытаний	261
8.4.4. Итоги испытаний	266
8.5. Анализ конструкции и модельное испытание монтажа дейдвудной трубы с использованием пластмассы	266
8.5.1. Общие замечания	266
8.5.2. Цель исследовательской работы	267
8.5.3. Анализ термоизоляционных свойств системы со слоем пластмассы	267
8.5.4. Анализ термических деформаций	269
8.5.5. Модельные испытания монтажа дейдвудной трубы гребного вала	271
8.5.6. Окончательный вывод	276
8.5.7. Эпилог	276
8.6. Исследование возможности использования микроволн для последующего отверждения пластмассы EPY и отливаемых из неё фундаментных подкладок	277
8.6.1. Предварительные замечания	277
8.6.2. Испытания образцов из пластмассы	278
8.6.3. Испытания моделей фундаментных подкладок	280
8.6.4. Важнейшие итоги исследований	281
8.7. Прочностные испытания анкеровки фундаментных болтов в бетоне с использованием пластмассы EPY	284
8.8. Исследования адгезии пластмассы EPY к стержню фундаментного болта	288
8.8.1. Вступительные замечания	288
8.8.2. Исследования адгезии пластмассы к стержню стального фундаментного болта	288
8.8.2.1. Метод и образцы, принятые для исследований	288
8.8.2.2. Реализация и результаты испытаний образцов с гладкими стержнями	290
8.8.2.3. Исследования прилипания пластмассы к стержням с нарезанными канавками	292
8.8.2.4. Сравнение результатов исследований прилипания пластмассы к гладким стержням и к стержням с нарезанными канавками	295

8.8.3. Исследования прилипания пластмассы к бетону	296
8.8.3.1. Образцы, подготовленные для исследований	296
8.8.3.2. Реализация и результаты испытаний	298
8.8.3.3. Анализ полученных результатов исследований	300
8.9. Экспериментальные исследования моделей фундаментных подкладок, изготовленных из стали и пластмассы EPY	301
8.9.1. Общие замечания	301
8.9.2. Модели фундаментных подкладок и способ проведения исследований	303
8.9.3. Реализация и результаты исследований системы со стальной подкладкой	304
8.9.4. Реализация и результаты исследований системы с подкладкой, отлитой из пластмассы EPY	308
8.9.5. Сравнение результатов исследований и выводы	310
8.10. Исследования характеристик конструкционного трения и относительных перемещений в фундаментных болтовых соединениях со стальной подкладкой и с отлитой из пластмассы EPY	312
8.10.1. Общие замечания	312
8.10.2. Принятые системы и способ выполнения исследований	313
8.10.3. Реализация и результаты исследований соединения со стальной подкладкой	316
8.10.4. Реализация и результаты исследований соединения с подкладкой из пластмассы EPY	321
8.10.5. Сравнительный анализ результатов исследований болтовых соединений со стальной подкладкой и с отлитой из пластмассы EPY	326
8.11. Определение состояния напряжения и деформации в болтовых соединениях с фундаментной подкладкой, изготовленной из пластмассы EPY и из стали.	329
8.11.1. Введение	329
8.11.2. Модель фундаментного болтового соединения	330
8.11.3. Определение монтажного состояния напряжения и деформации	332
8.11.4. Определение эксплуатационного состояния напряжения и деформации, а также характеристики эксплуатационной нагрузки для болта	335
8.11.5. Влияние изменения температуры на монтажное состояние напряжения и деформации в болтовом соединении с подкладкой из пластмассы	339
8.11.6. Итоги и выводы	342
Литература	343
Хронологический перечень научно-исследовательских работ, относящихся к польским пластмассам, предназначенным для фундаментных подкладок и их практического использования для установки машин и устройств	351
Mounting of machines and devices using EPY resin. Abstract	367

Введение

В этой книге описан современный метод монтажа судовых машин и устройств, а также различных машин и устройств на суше, на фундаментах с применением специально разработанных для этой цели полимерных пластмасс (химического отверждения). Указаны также пути развития польских пластмасс, а также современные методы их применения. В книге содержатся результаты 40-летних исследований и примеры практических применений разработанных пластмасс для монтажа упомянутых машин и устройств.

Эта книга является значительно расширенной версией книги „Установка машин и устройств на фундаментных подкладках, отлитых из пластмассы EPY”, изданной в 2002 и 2005 годах и содержит новые, актуальные данные. С того времени было проведено много новых исследований и практических работ по монтажу разного рода машин и устройств, охватывающих значительно более широкий спектр практического применения этой пластмассы как в судостроении, так и на различных объектах на суше.

В частности же эта книга обогатилась новым разделом, который содержит описание результатов исследований сложных физикохимических свойств пластмассы EPY, указывая её поведение в зависимости от условий её отверждения.

В этой книге принят во внимание изменения требований, которые появились в некоторых правилах применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств. Проведена также актуализация имеющихся сертификатов, необходимых для применения пластмассы EPY при установке машин и устройств, особенно в судостроении и в океанотехнике.

В подготовке материалов для этой книги приняли участие многие молодые научные сотрудники, реализовавшие исследовательские работы и их внедрение в практику. В частности, значительный творческий вклад они внесли своими докторскими диссертациями. Они стали соавторами этой книги, значительно расширяя содержание предыдущей, раннее изданной книги.

Настоящая книга является результатом многолетнего тесного сотрудничества Кафедры механики и основ конструкции машин Щецинского политехнического института, преобразованного в 2009 году в Западнопоморский технологический университет в Щецине, с фирмой MARINE SERVICE JAROSZEWICZ s.c. (MSJ) в Щецине.

Необходимость создания этой книги появилась из чувства обязанности собрать и упорядочнить результаты 40-летних исследовательских работ, а также возникших на их основе научных и утилитарных эффектов.

Подробный перечень научно-исследовательских работ (опубликованных и неопубликованных), относящихся к пластмассе и её применению в инженерской практике, выполненных в Щецинском политехническом институте, а позже в Западнопоморском технологическом университете, находится в хронологическом порядке в конце книги.

С 1974 до конца 2014 года количество объектов, установленных на фундаментах с использованием пластмасс, достигло 11490, в том числе 10101 машин и судовых устройств (в том числе 2236 главных двигателей), а также 1389 наземных машин и устройств таких, как: турбины, большие поршневые компрессоры, шахтные подъёмные машины, вентиляторы, крупногабаритные подшипники и зубчатые венцы экскаваторов бурого угля, подшипники мостовых пролётов и т. п.

Благодаря проведенным специализированным исследованиям было получено много оригинальных и новаторских в мировом масштабе решений в области монтажа машин и устройств описанным выше методом, которые сдали практический экзамен и получили широкое признание в мире. Польская пластмасса EPY, а также методы монтажа машин с её применением имеют все необходимые сертификаты и принадлежат к мировому авангарду в этой области.

Важной мотивацией для создания этой книги были также быстро возрастающие потребности проектантов, конструкторов и технологов судостроения и океанотехники, т. к. в этих областях монтажа главных двигателей судов, энергетических агрегатов и многих вспомогательных механизмов с использованием пластмассы стало в настоящее время стандартом.

Эту мотивацию укрепила постепенно возрастающая заинтересованность инженеров-практиков других отраслей техники (промышленности) в новом методе монтажа машин и устройств на их фундаментах с применением пластмассы, а также в возможности его практического использования в различных конкретных случаях и ситуациях.

Это означает, что настоящая книга предназначена не только для конструкторов и технологов, работающих в судостроении и океанотехнической промышленности, но и для широкого круга других специалистов, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией различных машин и устройств на суше.

Представленный в этой книге способ монтажа машин и устройств (особенно тяжёлых и генерирующих большие динамические силы) имеет существенное влияние не только на время и стоимость его выполнения, но и на повышение качества выполняемых работ, а также на надёжность и прочность монтируемых и содействующих с ними механизмов.

В книге доказано научными и практическими способами, что соответствующее применение пластмассы при монтаже машин и устройств в результате может

привести к значительным техническим, экономическим и эксплуатационным выгодам, к уменьшению уровня вибраций и шумности, а также к увеличению надёжности и прочности самих устанавливаемых машин и устройств.

Принимая во внимание значительный круг читателей (в том числе сотрудников и студентов многих технических вузов), принят такой порядок разделов этой книги, который дает читателю возможность легко найти интересующую его тематику, связанную со способами монтажа машин и устройств на фундаментах с применением пластмассы.

В книге представлены общие требования, относящиеся к монтажам машин и устройств, а также критерии их оценки. Представлены виды и характеристики, а также сравнительный анализ традиционных методов монтажа — на металлических подкладках и современных — на подкладках, литых из пластмассы, изготавливаемых непосредственно в местах их применения. Описаны свойства пластмасс, применяемых для фундаментных подкладок машин и представленные к ним требования.

В книге поданы основы проектирования процессов монтажа и их внедрение, а также описан метод литья подкладок на месте их применения. В книге приведены также многочисленные примеры выполненных монтажей, которые иллюстрируют разные возможности применения пластмассы при монтаже новых машин и устройств, а также во время ремонта и модернизации существующих объектов.

Представленные в книге описания результатов проведенных численных расчётов, а также экспериментальных исследований, направленных на решение многих практических вопросов, позволяют лучше понять различные актуальные проблемы, касающиеся монтажей машин и устройств и возможности применения пластмассы для их решения в разных областях техники. Они являются важной научной основой и источником базы данных для новых применений и дальнейших исследований для совершенствования свойств пластмассы и методов монтажа машин и устройств с её применением.

Авторы этой книги выражают благодарность всем сотрудникам Кафедры механики и основ конструкции машин Западнопоморского технологического университета в Щецине, а также фирме MARINE SERVICE JAROSZEWICZ s.c. в Щецине, которые принимали участие в исследовательских работах и во внедрении пластмассы при монтаже машин и устройств, а также подготавливали материалы, использованные в этой книге.

Слова благодарности направлены также к огромному числу работников польских верфей и других отраслей отечественной промышленности, а также связанных с ними научно-технических центров и сервисов монтажа, за их инспирацию и значительную помощь при внедрении новых решений, а также за многочисленные ценные дискуссии и указания, стимулирующие дальнейшее развитие новых методов монтажа машин и устройств с применением полимерной пластмассы.

Авторы этой книги осознают её несовершенство и возможность появления разных ошибок и поэтому будут благодарны читателям за всевозможные замечания, касающиеся её содержания и компоновки. Они также выражают готовность к дискуссии, к принятию советов и помочь в решении проблем, связанных с тематикой этой книги.



1

Характеристика и методы монтажа судовых машин и устройств на фундаментах

1.1. Общие задачи и требования к монтажу судовых машин и устройств

Монтаж машин и устройств основывается на их точном расположении в определённом пространстве (месте) и надёжном креплении к фундаменту таким образом, чтобы они надлежащим образом выполняли свои функциональные задачи в течение определённого периода времени. Монтаж судовых машин и устройств должен быть выполнен согласно требованиям правил классификационных обществ, а также требованиям производителей этих устройств [1].

Судовые машины и устройства устанавливаются не непосредственно на опорные поверхности фундаментов, а на соответствующие промежуточные элементы, т. е. на фундаментные подкладки (рис. 1.1). Это следует из-за трудности взаимной пригонки (припасовки) больших опорных поверхностей фундамен-

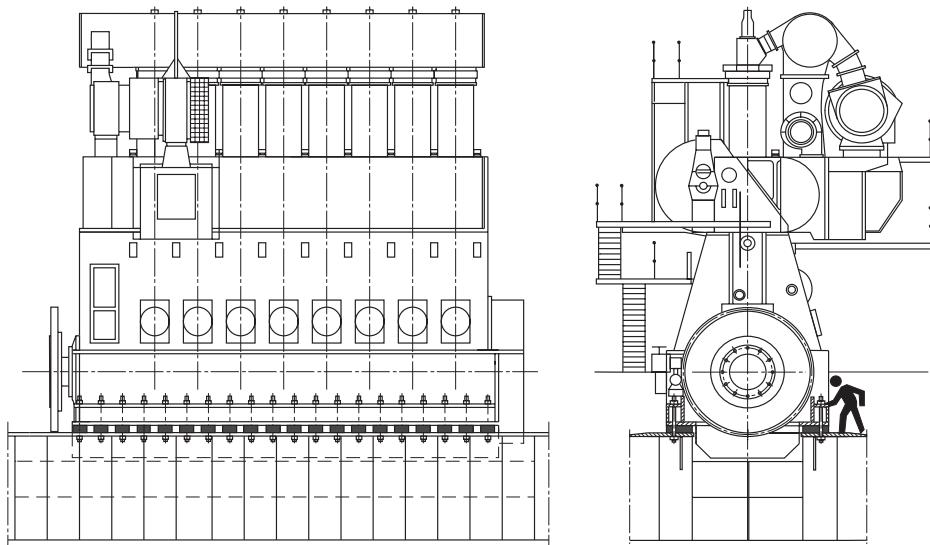


Рис. 1.1. Схема установки главного судового двигателя

тов и корпусов устанавливаемых машин, а также из-за необходимости точного соосного монтажа взаимодействующих машин и устройств.

Применение фундаментных подкладок даёт возможность замены непрерывной (поверхностной) опоры опорой, как бы, дискретного типа, при применении некоторого количества отдельных опор, установленных в определённых точках. В случае, когда точек опоры более трёх, система становится статически неопределенной, что вызывает трудности в определении величины сил взаимодействия машин и фундамента в тех же опорных точках. В случае судовых машин и устройств, как правило, имеется не менее четырёх фундаментных подкладок, часто более десяти, а в случае главных судовых двигателей – даже несколько десятков.

Полная оценка процесса монтажа судовых машин и устройств требует учёта технических, экономических и эксплуатационных факторов. Основой технической задачи при их монтаже является правильное расположение машин и устройств в пространстве и в соотношении с взаимодействующими объектами, а также надёжное крепление, гарантирующее им регулярную работу при одновременном соблюдении условий безопасности. Неправильное выполнение процесса монтажа судовых машин и устройств не должно быть причиной их ремонта в течение всего периода эксплуатации судна.

При технической и экономической оценке процесса монтажа судовых машин и устройств необходимо учитывать следующее:

- уровень сложности монтажа и демонтажа;
- трудоёмкость работ и стоимость материалов;
- время изготовления и точность посадки (пригонки) подкладок;
- уровень монтажных напряжений.

Во время эксплуатации существенное значение имеют:

- надёжность и стойкость (прочность) установки;
- количество и виды операций, связанных с обслуживанием;
- ограничение механических вибраций и шумов, вызванных элементами конструкции.

1.2. Монтаж машин и устройств на металлических подкладках

В судостроении по традиции применялись металлические подкладки, изготовленные из стали или чугуна (рис. 1.2а). Они обладали большой жёсткостью, поэтому крепление машин и устройств при использовании таких подкладок называлось жёстким. В этом случае необходимо было стремиться к равномерному распределению нагрузки на все подкладки (рис. 1.1). С этой целью использовалось соответствующее их размещение и посадка (пригонка).

Из-за большой жёсткости металлических подкладок даже небольшие неточности их изготовления могут быть причиной большой неравномерности нагрузки

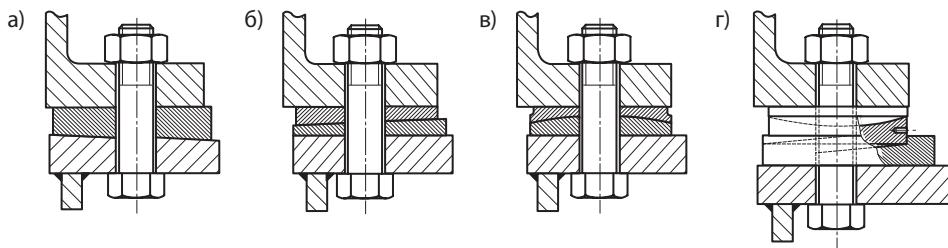


Рис. 1.2. Примеры жёстких креплений судовых машин и устройств: а) с цельной металлической подкладкой; б—г) с регулируемыми металлическими подкладками

на фундаменты, болты, используемые при креплении, и корпуса машин и устройств. Пагубное влияние этих явлений привело к введению жёстких требований к точности пригонки подкладок для устанавливаемых судовых машин и устройств [2]. В особенности, это касалось главных двигателей, редукторов и подшипников линии валов. Таким образом, пригонка металлических фундаментных подкладок, отвечающая требованиям правил постройки судов, стала очень трудоёмкой и дорогостоящей операцией.

Это стало причиной необходимости обработки опорных поверхностей фундамента на судне, обработки подкладок на строгальном станке, а также кропотливой, ручной, индивидуальной их пригонки, проводимой во время монтажа объекта. Кроме того, крепление на металлических подкладках способствовало распространению вибраций и ударных шумов.

Однако, постепенно велись поиски новых, более эффективных решений с целью упрощения и сокращения цикла, а также увеличения точности монтажа судовых машин и устройств. Были созданы специальные конструкции фундаментных выравнивающих подкладок [3] (рис. 1.2б, в, г). Хотя их применение и сокращает время монтажа машин и устройств на судне, но это достигается за счёт удлинения времени, необходимого для изготовления подкладок, имеющих очень сложную конструкцию. Некоторые из них (рис. 1.2б, г) делают возможной простую регулировку высоты положения устанавливаемых объектов. Другие, с разделяющей сферической поверхностью (рис. 1.2в, г), обеспечивают равномерное распределение нажимов на опорные поверхности подкладок благодаря их соответствующей самоустановке в направлении переноса нагрузки.

Однако все металлические регулировочные подкладки дают, в конце концов, жёсткое крепление машин и не вносят существенных изменений в статической и динамической системе „машина – подкладка – фундамент“ по отношению к креплению с применением традиционных, целостных, металлических подкладок. Недостатком регулировочных фундаментных подкладок является большое количество контактных поверхностей. Эта проблема будет более детально оговорена в пункте 1.5.

1.3. Монтаж машин и устройств на упругих подкладках

Существенная и нарастающая с самого начала постройки судов с механическим приводом проблема вибраций и шумов определила новое направление в области монтажа судовых машин и устройств. В 30-х годах XX века негативное влияние вибраций и шумов было определено как проблема для будущих проектных и конструкторских решений [4].

Оказалось, что способ соединения машин с фундаментами существенно влияет на вибрацию и шумы на судне [5—6], в результате чего было применено, так называемое, упругое крепление судовых машин и устройств. Оно основывалось на введении резиновых подкладок или упругих подкладок специальной конструкции вместо традиционных металлических подкладок (рис. 1.3) [7].

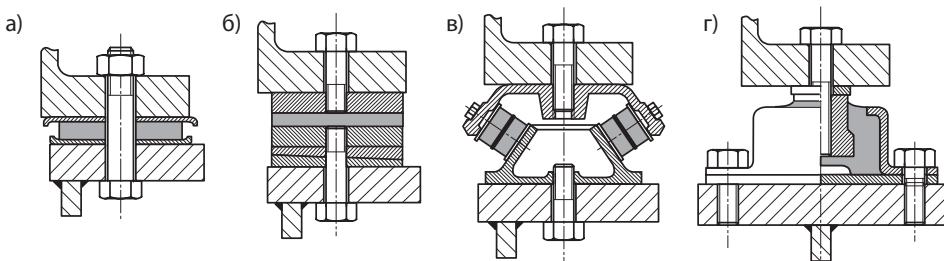


Рис. 1.3. Примеры упругих креплений судовых машин и устройств

Упругий монтаж машин и устройств имеет следующие преимущества:

- более равномерное распределение нагрузок на подкладки;
- значительная изоляция фундамента от механических вибраций и ударных шумов (иногда до 90%), генерируемых машинами [5, 8];
- значительная изоляция машин и устройств от кинематических воздействий и деформаций фундамента;
- свобода для термической деформации корпусов машин;
- возможность применения более легких фундаментов.

Однако упругий монтаж судовых машин и устройств с теоретической, технологической и эксплуатационной точки зрения является очень сложной проблемой [9—15]. Её решение сводится к поиску таких подкладок и способов монтажа, которые в условиях динамических нагрузок могли бы обеспечить допустимый уровень вибраций и шумов, одновременно гарантируя точное и надёжное крепление устанавливаемых объектов. До сих пор проблемы упругого крепления полностью не решены. Практическое внедрение упругих подкладок требует применения экспериментально-аналитических методов, которые, однако, не гарантируют получения оптимальных решений [16—18].

Развитие монтажа машин и устройств на упругих подкладках ведёт к совершенствованию расчётных методов, к производству материалов с точно заданными упруго-амортизационными свойствами, а также к созданию подкладок, которые оптимально решали бы задачу снижения вибраций и шумов механического происхождения [19—24]. Однако применение специальных упругих подкладок сложной конструкции значительно увеличивает стоимость монтажа машин и устройств. Существует очевидная тенденция, указывающая максимализацию показателей качества работы машин и устройств, при одновременном снижении затрат на обеспечение комфорта экипажам и пассажирам судов.

Ввиду значительных технических трудностей и больших финансовых затрат, упругие подкладки применяются относительно редко для монтажа тяжёлых судовых машин и устройств. Пример такого монтажа главного двигателя представлен в пункте 6.2.1.3, в котором применены фундаментные вибро-изоляторы, в составе которых была использована пластмасса ЕРУ.

1.4. Монтаж машин и устройств на литых пластмассовых подкладках

Развитие химии и появление новых материалов, совершившееся во второй половине XX века, создало большие возможности разработки специальных конструкционных материалов и развития методов их практического использования. Это дало возможность получения многих положительных эффектов технического и экономического характера. Примером таких материалов могут служить специальные химически отверждённые композиты, созданные на основе эпоксидной смолы, предназначенные для изготовления фундаментных подкладок судовых машин и устройств, а также для многих наземных объектов, требующих точной установки и надёжного крепления.

Химически отверждённые пластмассы с точно определёнными свойствами, постепенно совершенствовались и оказались почти идеальным материалом для применения в качестве фундаментных подкладок для монтажа судовых и наземных машин и устройств. Для их практического применения важную роль сыграли следующие факторы:

- возможность литья фундаментных подкладок произвольных размеров простым способом непосредственно на месте их монтажа;
- хорошие эксплуатационные свойства и прочность отвердевшей пластмассы;
- значительное сокращение времени и снижение стоимости монтажа машин и устройств на фундаментах.

Пластмассовые фундаментные подкладки, установленные непосредственно под расположенным соответствующим образом объектом (рис. 1.4), тщательно проникают во все места предусмотренного для них пространства между фун-

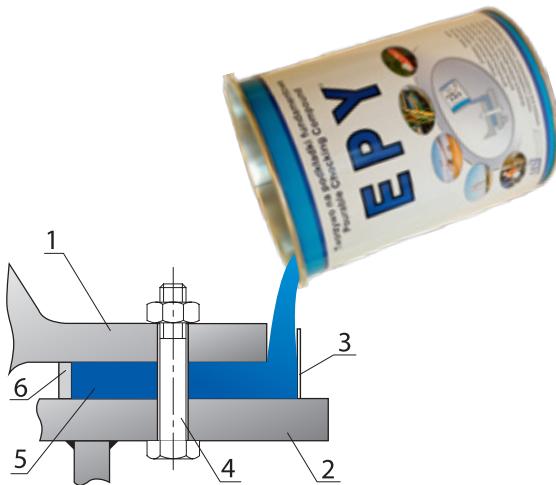


Рис. 1.4. Фундаментная подкладка, литая из пластмассы: 1 — основание машины, 2 — фундамент, 3 — лобовая стенка (жесть), 4 — фундаментный болт, 5 — подкладка из пластмассы, 6 — форма из пены

даментом и основой объекта, обеспечивая полное прилегание их монтажных поверхностей.

Значительные технические, экономические и эксплуатационные выгоды, получаемые при применении этих новых материалов, привели к тому, что их применение при монтаже судовых машин и устройств стало стандартом [25—30].

В настоящее время они широко применяются во всём мире и, конечно, в отечественном судостроении при постройке и ремонте судов. Благодаря многочисленным положительным качествам эта техника была принята для монтажа даже наземных объектов [31—33].

1.5. Характеристика монтажей машин и устройств с применением механических и литых пластмассовых подкладок

С целью представления проблематики монтажа машин и устройств на фундаментах, а также совершающегося в этой области прогресса далее будут тщательно оговорены основные свойства традиционных методов монтажа – на металлических подкладках и современных – на литых пластмассовых подкладках.

Традиционные методы монтажа тяжёлых машин и устройств на металлических подкладках имеют несколько существенных недостатков, к которым относятся:

- необходимость тщательной механической обработки опорных поверхностей фундамента и основания машины,

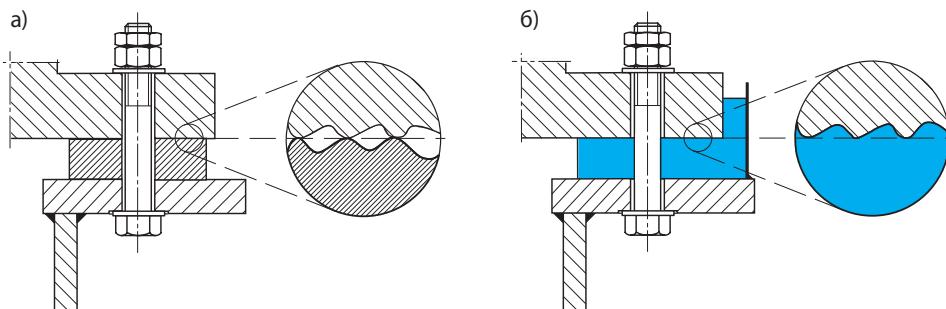


Рис. 1.5. Схема фундаментного болтового крепления: а) с металлической подкладкой; б) с подкладкой,литой из пластмассы

- предварительная механическая обработка, а также тягостная и трудоёмкая индивидуальная пригонка металлических подкладок к опорным поверхностям фундамента и основания устанавливаемой на нём машины,
- большая жёсткость металлических подкладок,
- небольшая реальная поверхность контакта (стыка) подкладок с фундаментом и с основанием машины,
- сильная проводимость механических и акустических вибраций.

Принимая во внимание большую жёсткость материала (значительная величина модуля упругости E), даже небольшие неточности пригонки металлических подкладок могут стать причиной появления больших напряжений и монтажных деформаций в корпусах машин и устройств, а также в их фундаментах, что отрицательно влияет на качество и стабильность их работы.

Кроме трудностей достижения соответствующей пригонки металлических подкладок, их недостатком является реально очень небольшая поверхность их стыка с опорными поверхностями основания машин и фундаментов. Даже при тщательной пригонке фундаментных подкладок, выполненной согласно регламентируемым в этой области требованиям [2], неровности поверхности (шероховатость, волнистость, ошибки форм), оставшиеся после её обработки, вызывают то, что они соприкасаются только в отдельных точках (рис. 1.5а), расположенных случайным образом, а реальная поверхность стыка составляет небольшой процент его номинальной поверхности [34].

В результате действия динамических нагрузок, наступающих во время эксплуатации машин, в микропространствах реального стыка появляются пластические деформации, которые вызывают оседание соединенных элементов [35], появление зазоров болтовых соединений и выбивание опорных поверхностей фундамента, подкладок и основания машины. В результате могут появиться трещины фундамента и корпуса машины, срыв фундаментных болтов, нестабильность работы машины и аварии [29].

Применение подкладок, изготовленных из химически отверждевающих пластмасс, литых непосредственно на месте их установки на фундаменте (металлическом или бетонном), под машиной (рис. 1.4), установленной перед этим в эксплуатационном положении, исключает много работ, упрощает монтаж и значительно сокращает время его реализации. Кроме грубой механической очистки и обезжиривания поверхности фундамента не требуется никакая другая специальная её подготовка. Появление неровностей, коррозионных образований и непараллельности поверхностей, затрудняющих или делающих невозможным применение традиционных металлических подкладок, в случае применения подкладок, изготовленных из литой пластмассы, не представляет никаких трудностей.

Подкладки, отлитые на месте под машиной, с применением соответствующей технологии, плотно прилегают к опорным поверхностям фундамента и машины [25, 26, 36]. Это является особым видом соединения, при котором реальная поверхность стыка больше номинальной. В результате обеспечивается лучшее распределение реальных нормальных усилий на поверхности стыка соединяемых элементов, а также появляется большая величина эффективного коэффициента трения (близкого или даже большего единицы), что благополучно влияет на перемещение касательных сил на опорную поверхность.

Пластмассовые подкладки лучше гасят вибрации и являются значительным барьером для распространения ударных шумов [37—40]. На поверхностях стыка подкладки с основанием машины и фундамента не выступает коррозия трения (fretting), эффекты выбивания поверхности стыка и других форм износа.

2

Пластмассы, применяемые для фундаментных подкладок судовых машин и устройств

2.1. Общие требования, предъявляемые пластмассам для фундаментных подкладок

Предпринятые попытки усовершенствования установочных работ, а также улучшение качества и сокращение времени устанавливания судовых машин путем применения разного вида регулировочных или эластических подкладок (оговоренных в разделе 1) не нашли широкого применения в судостроительной практике, в особенности при монтаже главных двигателей. Лишь только с момента разработки в 60-тих годах прошлого века специальной химически отверждённой пластмассы и метода (технологии) отливки из неё фундаментных подкладок непосредственно под устанавливаемые машины, постепенно начали отказываться от традиционного метода их монтажа на металлических подкладках, изготовленных из стали или чугуна. Эта пластмасса называется „Chockfast” и была разработана фирмой Philadelphia Resins Corp. (США). Название Chockfast состоит из двух слов: „chock” (фундаментная подкладка) и „fast” (быстрый), что в дословном переводе с английского языка означает: „быстрая фундаментная подкладка”.

Первый главный двигатель судна на фундаментных подкладках, литых из этой пластмассы, был установлен в рамках ремонтных работ в 1963 году в США. Новый метод монтажа машин и устройств на подкладках, литых из пластмассы, благодаря многим преимуществам получил широкое признание и начал применяться в практике судостроения не только при ремонтных работах, но и при постройке новых судов. В настоящее время производится несколько разновидностей пластмассы „Chockfast”. Большую популярность при монтаже судовых машин и устройств получил вариант этой пластмассы под названием „Chockfast Orange”.

Требования, предъявляемые пластмассам для фундаментных подкладок судовых машин и устройств, многочисленны, разнообразны и затруднительны к выполнению, особенно по отношению к монтажу главных двигателей и других устройств, требующих точной центровки. Подтверждением этого может быть тот факт, что до настоящего времени в судостроении практически применяются только три разновидности такой пластмассы, которые получили свидетельства

признания важнейших в мире классификационных обществ и производителей судовых двигателей. Кроме американской пластмассы Chockfast Orange и немецкой „Epcast 36” широкое применение нашла польская пластмасса с названием „EPY”, выпускаемая фирмой MARINE SERVICE JAROSZEWICZ s.c. (MSJ).

В 90-ые годы XX века на мировом рынке появилась новая пластмасса для фундаментных подкладок машин и устройств с названием „Loctite 7202 Marine Chocking”, производимая фирмой „Henkel” (Германия). Эта пластмасса была утверждена классификационными обществами: Lloyd’s Register, American Bureau of Shipping, Det Norske Veritas и Germanischer Lloyd для монтажа на ней главных двигателей и вспомогательных устройств морских судов.

Фирма MARINE SERVICE JAROSZEWICZ в течение многих лет сотрудничает с производителями пластмасс Chockfast — ITW Philadelphia Resins, США и Epcast — ITW Polymers Europe GmbH (ex H.A. Springer marine + industrie service GmbH, ФРГ) и имеет авторизацию для проведения монтажных работ с применением выпускаемых этими фирмами пластмасс. С 2012 года фирма MARINE SERVICE JAROSZEWICZ также имеет авторизацию для монтажа машин и устройств с применением пластмассы Loctite 7202 (фирма Henkel, Германия).

Разработка пластмасс для фундаментных подкладок требовала решения многих сложных проблем, касающихся состава композиции, конструкции и методов (технологии) литья подкладок, монтажа и эксплуатации машин. Кроме того, нужно было преодолеть многочисленные барьеры психологического и формального характера, возникающие со стороны классификационных обществ, производителей двигателей, судовладельцев, конструкторов судов и верфей. Существовало всеобщее мнение, что чем материал имеет высшую прочность, тем становится более пригодным для изотривания конструкции. Однако такое понимание прочности не всегда бывает верным, а иногда просто ошибочным. В случае фундаментных подкладок пластмасса, несмотря на гораздо меньшую прочность на сжатие, чем чугун или сталь, оказывается гораздо лучшим конструкционным материалом. Основные требования, касающиеся пластмасс для фундаментных подкладок, определены правилами классификационных обществ [41—43]. В жидкоком состоянии они должны характеризоваться отсутствием воздуха и хорошей текучестью, а во время отверждения — малой усадкой, после же отверждения — малой ползучестью, большой статической и усталостной прочностью на сжатие.

Характерным и очень важным для практики свойством пластмасс, применяемых для подкладок, является их реактивность [42], влияющая на процесс и достижение предельной величины отверждения подкладок. Она зависит от температуры пластмассы, заливаемой в форму, температуры окружающей среды, массы и формы подкладки, а также от условий её охлаждения. Высшая температура отверждения приводит к высшей степени сетеобразования пластмассы, что придаёт подкладке лучшие механические свойства, т. е. большие — прочность, твердость и ползучепрочность (сопротивление ползучести). Пластмассы с более

высокой реактивностью позволяют снизить минимальную температуру литья подкладок.

Пластмассы с малой реактивностью и при большой теплоёмкости, а также с высокой проводимостью фундамента и основания машины не обеспечивают хорошее сетеобразование материала подкладок при низких температурах окружающей среды. С другой стороны, чрезмерно высокая реактивность может привести к образованию в подкладке больших собственных напряжений и к большой усадке в процессе отверждения. Полная усадка является результатом объёмных изменений, вызванных химической реакцией отверждения и тепловой усадкой, причиной которой является снижение температуры подкладки с максимальной величины экзотермы до температуры окружающей среды.

Знание экзотермических свойств пластмассы является необходимым для определения наиболее важных деталей способа (технологии) монтажа, например, таких как: минимальная и максимальная температура окружающей среды при отливке, желательная температура пластмассы, заливаемой в форму, минимальная и максимальная толщина подкладок, время отверждения, зависящее от температуры окружающей среды.

Фундаментные подкладки находятся в постоянном контакте с влажным воздухом, смазками, топливом и водой. Поэтому в этих условиях и при повышенной температуре они должны быть невосприимчивы к старению. Поведение фундаментной подкладки во время эксплуатации обуславливается, прежде всего, температурой работы и поверхностными нагрузками.

Температура подкладок под главными судовыми двигателями в некоторых условиях может достигать 80°С. При такой температуре подкладка должна иметь соответствующую прочность на ползучесть, что в свою очередь лимитирует максимальную величину допускаемого нажима. Неизбежный процесс ползучести пластмассы должен характеризоваться небольшим, по возможности, снижением высоты подкладки, а по истечении относительно короткого времени – почти изчезать. По этой причине допустимые нагрузки на фундаментные подкладки главных двигателей равны только 5 МПа, при временном сопротивлении пластмассы выдерживают нагрузки порядка 150 МПа.

Применение пластмассы для фундаментных подкладок при монтаже судовых двигателей и устройств требует согласия судовладельца, производителя машин и классификационного общества, ведущего надзор за постройкой судна. Признание пластмасс, путем выдачи свидетельств классификационных обществ, ведётся на основании результатов соответствующих лабораторных и экспериментальных исследований.

Принимая во внимание специфику этих исследований требуется, чтобы лабораторные опыты были проведены под надзором инспекторов классификационных обществ только в соответственно сертифицированной лаборатории или в лаборатории данного классификационного общества.

Требования разных классификационных обществ, касающиеся видов опытов и способов их проведения, как и критериев, обуславливающих признание пластмассы, многочисленны и неодинаковы [41—43]. Например, Germanischer Lloyd [43] требует определения следующих величин, относящихся к исследуемой пластмассе:

- коэффициента продольной упругости (при сжатии) по ISO R 604,
- твёрдости поверхности в градусах Barcola ($^{\circ}$ B) по EN 59,
- прочности на растяжение по ISO 527,
- прочности на сжатие по ISO 604,
- прочности на сдвиг по ASTM D732,
- прочности на изгиб по ISO 178,
- ударной вязкости (Izoda) по ISO 180,
- усадки по ASTM D2566 или по DIN 53464,
- скорости распространения пламени по ASTM D635 и ISO R 1210,
- оседания под нагрузкой по ASTM D621; а для фундаментных подкладок требуются: время (продолжительность) нагрузки — 24 часа, температура при испытании ($^{\circ}$ C): $-30/+23/+50/+70/+100$, нажимы ($\text{Н}/\text{мм}^2$) — 3,5/7/14/28,
- коэффициент линейного расширения [1/K] по DIN 53752,
- коэффициент трения по стали для отлитой и обработанной с использованием антиадгезионного средства и без него,
- время отверждения в разных температурах,
- стойкость к температуре по ISO 75,
- стойкость к маслам, бензину и другим средствам по ISO 175,
- другие параметры по усмотрению классификационного общества.

Кроме того, в разных действующих правилах GL [43] сформулировано много разных дополнительных условий, которые должны быть выполнены для получения соответствующего сертификата для применения данной пластмассы в судостроении.

Часто для выдачи или продления сертификата классификационные общества требуют выполнения большого количества повторных или дополнительных исследований, проводимых в точно определённых условиях.

Примером в этом случае могут служить требования классификационного общества Lloyd's Register of Shipping (LR), относящиеся к выполнению обстоятельных и дорогостоящих исследований пластмассы EPY, обуславливающих продление сертификата. Эти исследования были проведены в лаборатории Кафедры механики и основ конструкции машин Западнопоморского технологического университета в Щецине в 2012 году под непосредственным надзором инспектора LR.

В 2009 году Европарламент и Евросовет заменили прежнюю Директиву 95/57 новым Распоряжением (ЕС) № 391/2009, касающимся установления общих правил и стандартов для организаций надзора, проводимых инспекций и исследований

судов [45]. Параграфом 10-ым этого Распоряжения внесена обязанность ведения регулярных консультаций между признанными Евросоюзом организациями надзора (названными Recognised Organizations и обозначенными сокращением RO's) с целью сохранения эквивалентности (равноценности) установленных требований при одновременном стремлении к унификации применяемых принципов действий и способов их реализации.

Это Распоряжение стало обязательным с 1-го января 2013 года. Согласно этому юридическому акту промышленные изделия (в данном случае обозначающие материалы, элементы оборудования или элементы какого-нибудь судового устройства), которые прошли соответственные сертификационные процедуры и получили свидетельство признания (названные EU Mutual Recognized Type Approval Certificate и обозначенные сокращением EU RO MR TAC), могут быть установлены на всех судах без нарушения полномочий государств, флаги которых они носят. На практике это обозначает, что свидетельства признания для данного промышленного изделия, полученные формальным путем от одной из признанных Евросоюзом организаций, очевидным образом должны соблюдаться любой организацией, признанной Евросоюзом. В случае отказа такого признания необходимо дать ему обоснование.

Признанные организации обязаны согласовывать (координировать) между собой технические процедурные условия, после внедрения которых наступит взаимное признание сертификатов, выданных определённым промышленным изделиям. Эти условия должны учитывать эквивалентные требования, принимая во внимание наиболее требовательные и ригористические нормы, как основу при их сравнивании.

Ввиду того, что процедуры сертификации являются новыми для всех признанных Евросоюзом организаций, все промышленные изделия, для которых будет проведена новая сертификация, разделены по группам. Срок проведения сертификации должен зависеть от того, к какой группе принадлежит данное промышленное изделие. В первой группе, обозначенной сокращением TR1, предвиденной для новой сертификации с 1-го января 2013 года, находятся 11 изделий, среди которых находится пластмасса для фундаментных подкладок машин (Resin chocks kod 13350000). Для этих 11 промышленных изделий в документе „EU Mutual RecognitionTechnical Requirements“ [46] (пункт 12.8) были сформулированы подробные процедуры и технические требования, которые должны быть исполнены, чтобы получить сертификат для данного изделия, отвечающий всем организациям, признанным Евросоюзом.

Таких организаций, которые заключили между собой соответствующее соглашение и были признаны Евросоюзом, в настоящее время насчитывается 12. К ним принадлежат:

- American Bureau of Shipping (ABS) 16855 Northchase Drive, Houston, tx 77060, USA;

- Bureau Veritas (BV), 67-71, Boulevard du Château, 92200 Neuilly-sur-Seine, France;
- China Classification Society (CCS), 9 Dongzhimen Nan Da Jie, Beijing, 100007, China;
- Det Norske Veritas (DNV), Veritasveien 1, 1363 Hovik, Oslo, Norway;
- Germanischer Lloyd (GL), Brooktorkai 18, 20457 Hamburg, Germany;
- Korean Register of Shipping (KR), 36, Myeongji ocean city 9-ro, Ganseo-gu, Busan, Seoul 618-814, Rep. of Korea;
- Lloyd's Register Group Ltd (LR), 71 Fenchurch Street, London EC3M 4BS, UK;
- Nippon Kaiji Kyokai (NK), 4-7 Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8567, Japan;
- Polski Rejestr Statków (PRS), al. gen. Józefa Hallera 126, 80-416 Gdańsk, Poland;
- RINA – Registro Internacional Naval SA (Rinave), X1 Pólo Technológico de Lisboa, Lote 21, 1600-485 Lisboa, Portugal;
- RINA, Via Corsica 12, Genova, Italy;
- Russian Maritime Register of Shipping (RS), 191186 St. Petersburg 8, Dvorts-ovaya Nab., Russian Federation.

Чтобы получить общий сертификат (EU MR TRC) для пластмассы, предназначенной для фундаментных подкладок машин, признанный вышеуказанными организациями, необходимо подать соответствующую документацию в одну из этих организаций. В предложенной документации необходимо подать информацию о данной пластмассе, объём которой определён в пункте 12.8 (с обозначением — Resin chocks) вышеупомянутого документа [46]. В особенности же в технических данных, относящихся к данной пластмассе, должны быть поданы результаты испытания материалов, выполненные согласно перечисленным ниже нормам и рекомендациям:

- ASTM D 696-ISO 604 (прочность на сжатие, модуль упругости),
- ASTM D 638-ISO 527 1, 2, 4, 5 (все в соответствующих случаях) (прочность на растяжение, модуль упругости),
- ASTM D 621-ISO 75-2 (прогиб под нагрузкой),
- ASTM D 256-ISO 180 (ударные испытания Izoda),
- EN 59, раньше ASTM D 2538 (твёрдость Barcola),
- ASTM D 4065, раньше ASTM D 2236 – DIN 53445 0-ISO 6721-1 (модуль сопротивления сдвигу, логарифмический декремент),
- ASTM D 790-ISO 178-ISO 14125 в соответствующих случаях (прочность на изгиб, максимальный прогиб),
- ASTM D 2566 (WITHDRAWN) – ISO 3521 (линейная усадка во время отверждения),
- ASTM D 635 – FTP Code, Annex 1, Part V (горючесть пластмассы, распространение пламени),
- DIN 50100 (испытание на усталость при сжатии),

- DIN 53481 (диэлектрическая прочность),
- DIN 53428 (сопротивление изоляции),
- ISO 3521 или эквивалентная (объемная усадка),
- ISO 11357, ISO 11359 или эквивалентная (температура гелеобразования),
- ISO 1675 или эквивалентная (плотность),
- EN 1465 (сопротивление сдвигу соединения внакладку при растяжке),
- ASTM D 732 (сопротивление сдвигу),
- DIN 53752 (коэффициент термического расширения),
- ISO 175 (устойчивость к действию разных сред: масла, воды),
- коэффициент трения со сталью для образца, обработанного механически и литого с и без антиадгезионного средства (определить его состав),
- сопротивление ползучести,
- определение экзотермы.

Примечание:

Другие нормы также могут быть приняты, но с условием, что являются не менее эффективными. Испытания должны быть проведены в лаборатории, признанной классификационным обществом, или в присутствии его инспектора. Образцы для испытаний берутся с производственной линии или из запасов поставщика пластмассы. Условия испытания должны быть определены поставщиком.

Фундаментные подкладки могут быть литыми только фирмами, авторизованными производителем данной пластмассы, при соблюдении предельных условий, требуемых для данного процесса. Авторизация, являющаяся подтверждением подготовки персонала, выполняющего литьё подкладок, должна быть представлена местному инспектору классификационного общества (по его требованию).

2.2. Развитие польских пластмасс и методов монтажа на них машин и устройств

В 60-ые годы прошлого века польская судостроительная промышленность, стремясь к ограничению импорта дорогостоящей тогда пластмассы, применяемой для монтажа судовых машин и устройств, приняла решение о том, чтобы Щецинский политехнический институт начал исследовательские работы по разработке польских пластмасс для фундаментных подкладок, а также польского метода монтажа на них судовых машин и устройств. Разработанные и исследованные в отделении технической механики Щецинского политехнического института пластмассы, обозначенные символами EP-551, EP-571, а также EP-578, вскоре получили признание Польского регистра судов (PRS) и начали использоваться в польской судостроительной промышленности при монтаже

на них машин и устройств судов, строящихся на польских верфях. Авторами этих исследовательских работ были: dr inż. J. Lorkiewicz, dr inż. K. Grudziński и mgr inż. W. Jaroszewicz. Первые работы при монтаже машин и устройств на фундаментных подкладках, изготовленных из пластмассы EP-551, были выполнены сотрудниками Щецинского политехнического института на учебно-грузовом судне „Kapitan Ledóchowski” (рис. 2.1). Тогда на этих подкладках были установлены энергетический генератор и три насоса в машинном отделении судна.

Разработанная пластмасса и метод монтажа полностью себя оправдали и постепенно стали практически применяться на польских верфях и судоремонтных заводах. В ноябре 1976 года на Щецинской судоверфи им. А. Варского, на пароме „Karsibór” (рис. 2.2а) впервые была использована пластмасса EP-551 для фундаментных подкладок при монтаже главного двигателя (HCP-Sulzer 6AL25/30). Главный двигатель вместе с генератором были закреплены на одной общей раме, а затем вся эта конструкция была установлена на фундаменте с применением подкладок из литой пластмассы (рис. 2.2б, в).

Более подробную информацию о выполненных исследовательских работах, свойствах разработанных пластмасс и методах монтажа машин с их применением, а также о видах и количестве установленных объектов были представлены в разных публикациях [25—26].

С 1978 года работа при монтаже машин выполнялась специализированными группами, авторизованными Щецинским политехническим институтом, действующими в:

— Морской судоремонтной верфи в Свиноустье, директором которой тогда был mgr inż. P. Soyka, а начальником группы — mgr inż. S. Kownacki;



Рис. 2.1. Учебно-грузовое судно „Kapitan Ledóchowski”, на котором впервые вспомогательные устройства были установлены на фундаментных подкладках, изготовленных из пластмассы, разработанной в Щецинском политехническом институте

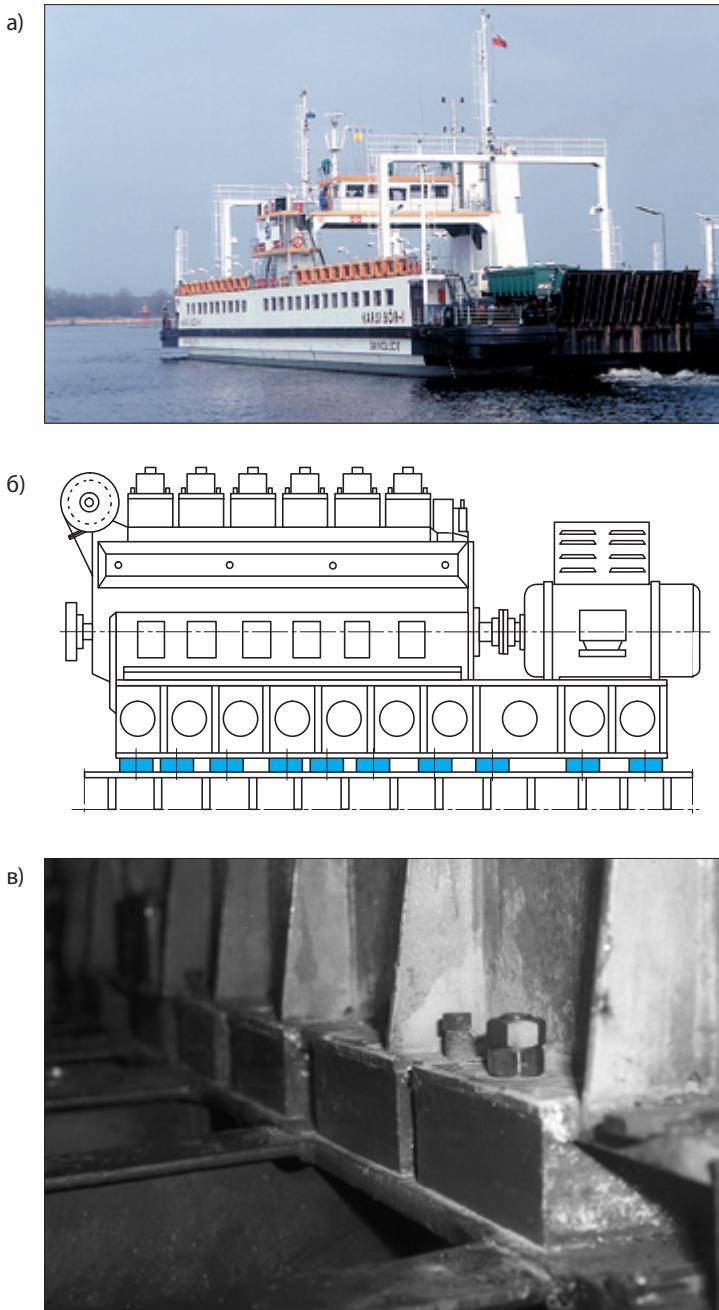


Рис. 2.2. Первый главный судовой двигатель на фундаментных подкладках, отлитых из пластмассы польского производства, был установлен на пароме „Karsibór I”: а) общий вид; б) схема установленного двигателя; в) вид отлитых фундаментных подкладок

— предприятии лакокрасочных и изоляционных работ „MALMOR” в Гданьске, директором которого тогда был inż. W. Symoni, а начальником группы — mgr inż. A. Adamkiewicz;

— заграничном предприятии „PZ KITI” с отделением в Варшаве, директором которого тогда был mgr inż. A. Łuba, а начальником группы — mgr inż. W. Jaroszewicz.

Одновременно с работами по внедрению упомянутых пластмасс в практику в Щецинском политехническом институте велись научные исследования по усовершенствованию их свойств и метода монтажа машин и конструкций, а также по моделированию и расчётам болтовых фундаментных соединений. Эти работы проводились в рамках исследований основных проблем техники в тесном сотрудничестве с Центром судостроительной техники (СТО) и Центром судостроительной технологии (СТВ) „PROMOR” в Гданьске, с Институтом основных проблем техники Польской Академии Наук (IPPT PAN) в Варшаве, а также с вышеупомянутыми предприятиями, занимающимися выполнением работ при монтаже машин и устройств.

Особенно важную роль в проявлении инициатив совместной реализации исследовательских работ сыграла группа „SERWIS POSADAWIANIA MASZYN”, действующая в рамках „PZ KITI”. Её возглавлял dr inż. W. Jaroszewicz, который с 1972 года работал в Щецинском политехническом институте и с самого начала своей научно-исследовательской деятельности занимался этой проблематикой.

В 1980 году в результате этой деятельности, на основе его диссертации «Фундаментные подкладки под судовые двигатели и вспомогательные устройства из хемоотвердевших пластмасс» ему была признана учёная степень доктора технических наук. Его научным руководителем был doc. dr inż. K. Grudziński, а рецензентами — doc. dr inż. E. Skrzypowski и профессор T. Gerlach (из Гданьского политехнического института). С 1982 года управляя группой „SERWIS POSADOWIENIA MASZYN” в рамках PZ KITI, dr inż. W. Jaroszewicz не только ведёт многостороннюю практическую деятельность, связанную с услугами для судостроительной промышленности, но и принимает активное участие в научно-исследовательских работах, проводимых на Кафедре механики и основ конструкции машин Щецинского политехнического института. Исследовательские работы, связанные с этой тематикой, реализовала группа, в состав которой входили: dr inż. J. Lorkiewicz, dr inż. W. Jaroszewicz, dr inż. L. Łabuć, dr inż. R. Kawiak, inż. L. Tuczyński и J. Markiewicz под руководством doc. dr inż. K. Grudzińskiego. Результатами этих работ были, в частности, докторская диссертация R. Kawiaka [47], посвящённая проблемам моделирования и расчёта болтовых фундаментных соединений, патенты [48—50], а также новая, усовершенствованная польская пластмасса для фундаментных подкладок, получившая название EPAX. Эта пластмасса и метод монтажа машин и устройств с её применением получили свидетельства признания (сертификаты) классификационных обществ и производителей

судовых двигателей. Услуги монтажа машин и устройств с применением этой пластмассы были реализованы на многих судах, построенных или ремонтированных на польских верфях для судовладельцев из многих стран мира, под надзором разных классификационных обществ таких, как: Polski Rejestr Statków (PRS), Lloyd's Register (LR), Germanischer Lloyd (GL), Bureau Veritas (BV), Det Norske Veritas (DNV), Российский морской регистр судоходства (РМРС).

В июле 1986 года на судоремонтном заводе „Gdynia”, на пароме „Stena Germanica” (рис. 2.3) на пластмассе EPAX были установлены четыре двигателя Zgoda-Sulzer типа 16ZV40/48, каждый мощностью 10000 л.с. На Гданьской судоверфи первый двигатель главного привода (Zgoda-Sulzer типа 6L40/48 мощностью 4500 л.с.) на подкладках из пластмассы EPAX был установлен в октябре 1986 года на судне „Dalmor”. На Щецинской судоверфи первый крупногабаритный двигатель (HCP-MAN/B&W 6L50MCE мощностью 5181 л. с.) на пластмассовых подкладках типа EPAX был установлен в июне 1990 года на судне „Kopalnia Halemba”.

В 1989 году dr inż. W. Jaroszewicz принимает Serwis Posadowienia Maszyn от PZ KITI и ведёт дальнейшую деятельность в области монтажа машин в рамках собственной фирмы MARINE SERVICE JAROSZEWCZ (MSJ) в Щецине. Для изготовления фундаментных подкладок начинает применяться новый вид пластмассы с названием EPY. Химический состав этой пластмассы обеспечивает её хорошее и быстрое отверждение при очень малой усадке и без выделения побочных продуктов.

Свойства этой пластмассы отвечают во всех отношениях свойствам современных пластмасс, предлагаемых специализированными в этой области фирмами из других стран. В особенности это относится к пластмассам Chockfast



Рис. 2.3. Пассажирско-автомобильный паром „Stena Germanica,” главные двигатели которого установлены на подкладках, отлитых из пластмассы EPAX

Orange американского производства и Eocast 36 немецкого производства. Согласно договорам, подписанным с фирмой H.A. Springer marine +industrie service GmbH в августе 1995 года и с ITW Philadelphia Resins в июле 2001 года, фирма MSJ является исключительным поставщиком пластмасс Eocast и Chockfast и авторизованным подрядчиком при монтаже машин и устройств на подкладках, отливаемых из этих пластмасс, в Польше, Эстонии, России, Чехии, Литве, Латвии, Словакии и на Украине.

В таблице 2.1 приведены важнейшие свойства польской пластмассы EPY, а также (для сравнения) свойства вышеуказанных заграничных пластмасс.

Пластмасса EPY имеет признание известных в мире производителей судовых двигателей, а также классификационных обществ наравне с пластмассами Chockfast Orange и Eocast 36, предлагаемыми западными фирмами, в настоящее время входящими в состав американского концерна Illinois Tools Works (ITW). Пластмасса EPY имеет также сертификаты соответствующих польских учреждений, допускающие её применение при постройке дорог и мостов, а также при монтаже горных машин и устройств. Перечень учреждений и производителей двигателей, которые выдали сертификаты для пластмассы EPY, приведен в таблице 2.2. Копии сертификатов показаны на стр. 36—44.

Большое количество отдельных сертификатов для пластмасс, предназначенных для фундаментных подкладок машин, требуемых разными организациями

Таблица 2.1. Основные свойства пластмасс, применяемых для изготовления фундаментных подкладок машин (согласно актуальным техническим данным, опубликованным производителями подкладок в Интернете)

Наименование величины	Метод испытаний согласно	Наименование пластмассы			
		EPY ¹	Chockfast Orange ²	Eocast 36 ³	Loctite 7202 ⁴
Сопротивление сжатию, МПа	ASTM D-695	150	131	164	152
Модуль упругости, МПа	ASTM D-695	4255	3677	5610	—
Сопротивление растяжению, МПа	ASTM D-638	54,9	34,2	49,4	37,9
Сопротивление сдвигу, МПа	FED-STD-406 (Method 1041)	59,1	37,3	—	—
Твёрдость, °В	ASTM D-2583	49,8	40 (мин. 35)	55	—
Плотность, кг/м ³	EN ISO 1183-1	1570	1580	1640	—
Время отверждения в зависимости от температуры, (часы)	—	24 при 20°C 48 при 15°C	24 при 21°C 48 при 15°C	24 при 21°C 48 при 16°C	24 при 21°C 35 при 15°C

¹http://www.epyresin.eu/2/produkty/pokaz_prace.php?id=145, доступ 10.02.2013.

²http://www.chockfast.com/2011pdf/659H_Chockfast-Orange.pdf, доступ 10.02.2013.

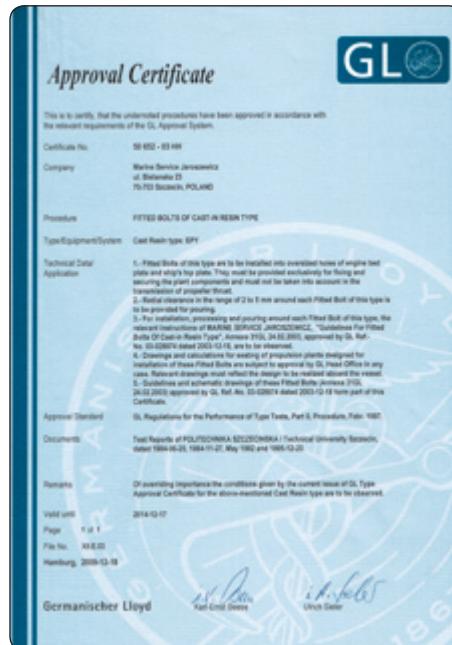
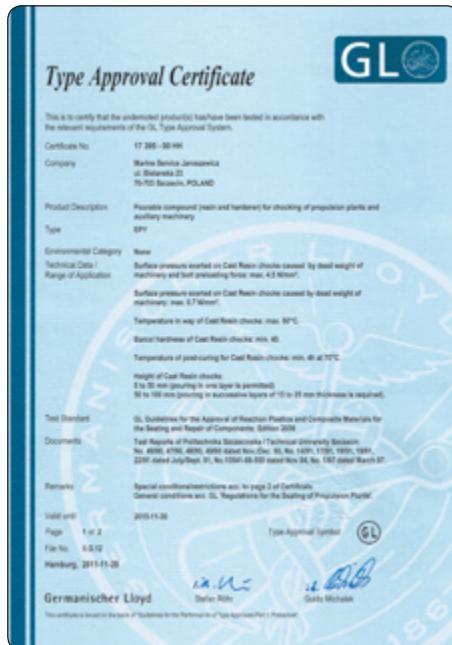
³<http://www.eocast.com/tech-bull/ep36.pdf>, доступ 10.02.2013.

⁴http://www.loctite-glue.com/sg_obrazki/_00030230_zalac_001.pdf, доступ 10.02.2013.

Таблица 2.2. Перечень учреждений и производителей судовых двигателей, которые выдали сертификаты качества пластмассы ЕРУ

№.	Сертификат	Номер сертификата	Дата первой выдачи	Замечания
1	American Bureau of Shipping	02-LD293860-2-PDA	18.03.1997	$p_{\max} = 15 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
2	Bureau Veritas	03626/E0 BV	16.11.1989	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
3	Bureau Veritas	SMS.W.II/1193/C.0	14.02.1995	Фирменный сертификат
4	Det Norske Veritas	M-11625	23.10.2006	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
5	Germanischer Lloyd	17 395-00 HH	20.12.1991	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
6	Germanischer Lloyd	50 652-03 HH	18.12.2003	Annexe 31GL
7	Germanischer Lloyd	QS-244 HH	20.07.1994	ISO 9001:2008
8	H.A. Springer marine + industrie service	EB/Ba	02.10.2001	Договор от 28.09.2001
9	Instytut Badawczy Dróg i Mostów	AT/2006-03-0018	21.12.1994	Допустимая нагрузка по расчёту
10	Instytut Medycyny Morskiej i Tropikalnej	PB/251/348/99	08.10.1999	Гигиенический сертификат
11	Instytut Techniki Budowlanej	AT-15-4824/2007	28.02.2001	Допустимая нагрузка по расчёту
12	IQNet The International Certification Network	RU-11.0823.026	01.09.2005	ISO 9001:2008
13	ITW Philadelphia Resins	7/09/01	07.09.2001	Договор от 25.06.2001
14	Lloyd's Register	MATS/526/3	12.03.1990	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
15	MAN-B&W Diesel AG	0343/95	12.06.1995	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
16	MAN-B&W Diesel AG	0604/95	06.11.1995	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
17	MAN Diesel & Turbo	1300/BHN/INR/253	25.03.1996	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
18	New Sulzer Diesel Ltd	7056 M. Lüthi/bg	08.07.1996	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
19	Polski Rejestr Statków	TM/1124/800002/10	06.04.1990	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
20	Polski Rejestr Statków	TM/1125/842502/10	31.05.2004	Фирменный сертификат
21	Registro Italiano Navale	MAC136612XG	15.07.1999	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
22	Registro Italiano Navale	2010 XP 74	01.04.2010	Фирменный сертификат
23	Russian Maritime Register of Shipping	11.00477.258	20.07.2006	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
24	Russian Register Certification System	11.0823.026	15.12.2000	ISO 9001:2008
25	Russian Maritime Register of Shipping	10.00271.258	18.08.2005	Фирменный сертификат
26	Transportowy Dozór Techniczny	7 2229 207 2011 Q	14.01.2008	PN-EN ISO 9001:2009
27	Wärtsilä NSD Co.	465.942	04.05.2000	$p_{\max} = 5 \text{ МПа}, T_{\max} = 80^{\circ}\text{C}$
28	Wyższy Urząd Górnictwa	GM-127/95	10.04.1996	Допустимая нагрузка по расчёту
29	Główny Instytut Górnictwa	B/2347/2012	10.04.1996	Допустимая нагрузка по расчёту
30	Russian River Register	13716	03.09.2010	Фирменный сертификат
31	Russian River Register	SZF K 12-10	12.08.2010	Допустимая нагрузка по расчёту
32	Urząd Harmonizacji Rynku Wewnętrznego (Польша)	009213117	18.03.2011	Сертификат регистрации ЕРУ
33	Министерство Обороны Р.Ф.	236/331/1862	26.06.2013	Одобрение ВМФ РФ для ЕРУ
34	Russian Maritime Register of Shipping	14.09099.381	04.02.2014	EU RO MR DEC
35	Russian Maritime Register of Shipping	14.09101.381	25.02.2014	EU RO MR TAC

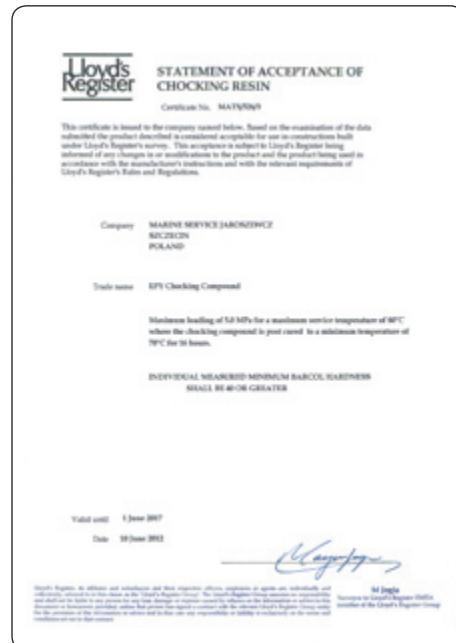




INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW
03-002 Warszawa, ul. Instytutowa 1
tel. sekretaria: 22 814 50 25; fax: 22 814 50 28

The image shows a formal IQNet certificate. At the top, it features the IQNet logo with a stylized globe composed of stars and the text "THE INTERNATIONAL CERTIFICATION NETWORK". Below this is a large "CERTIFICATE" title. The central text reads: "IQNet and Certification Association "Russian Register" hereby certify that the organization Marine Service Jaroszewicz s.c. Poland, 70-703 Szczecin, ul. Bielańska, 23 for the following field of activities production of EPY-Epoxy Compound and sealing services of marine and industrial machinery on "EPY", "Chockfast" and "Epicocast" resin chocks has implemented and maintains a Management System which fulfills the requirements of the following standard ISO 9001:2008 Issued on: 29th August, 2011 Validity date: 28th August, 2014 Registration Number: RU-11-5823.026 Michael Drzwiak, President of IQNet, and Svetlana Vladimirovna, General Director of Russian Register, sign the document. The IQNet logo is at the bottom left, and the Russian Register logo is at the bottom right. A small note at the bottom states: "IQNet is a registered trademark of IQNet Certification, LTD, ZURV Holding GmbH and M&T Inc." and "The use of IQNet portfolio is at the sole risk of user/contractor. Updated information is available at www.iqnet.com

Развитие польских пластмасс и методов монтажа на них машин и устройств



2. Пластмассы, применяемые для фундаментных подкладок судовых машин и устройств

<p>MAN Diesel & Turbo</p>  <p>Certificate of Approval</p> <p>This is to certify that EPIY checking compound from Marine Service Jaroszewicz S.C. ul. Bielska 23 PL-70 703 Szczecin Poland</p> <p>Tel.: +48 914 606 624 Fax: +48 914 313 075 E-mail: msj@epiyresin.eu www.epiyresin.eu</p> <p>has been approved for checking of all MAN B&W two-stroke diesel engines.</p> <p>Copenhagen, 1 April 2011</p> <p></p>	<p>New Sulzer Diesel</p> <p>Marine Service Jaroszewicz ul. Bielska 23 PL-70 703 Szczecin Poland</p> <p>Approval of EPIY Epoxy Resin Material for Sulzer Engine Checking</p> <p>We refer to our meeting held in Widnau on 10th June, 1998 and are pleased to inform you that our approval of 26th March, 1998 is hereby renewed with this letter.</p> <p>Your EPIY checking material is approved for use with all Sulzer diesel engine types.</p> <p>This approval means that the following requirements are fulfilled:</p> <ul style="list-style-type: none"> - The arrangement of the epoxy resin checks and the tension of the foundation bolts must comply with Sulzer standard arrangement drawings "Engine sealing with epoxy resin checks". - The preparatory work, pouring and curing processes are to be supervised by experts of the Marine Service Jaroszewicz company. <p>We trust to have been of service to you and remain</p> <p>with kind regards,</p> <p>New Sulzer Diesel Ltd.</p> <p> M. Gajewski ppr. F. Pochet</p> <p><small>Approval of EPIY Epoxy Resin Material for Sulzer Engine Checking Approval Date: 10.06.1998 Expiry Date: 26.03.2001 Approval No.: 26/98/EP/0001</small></p>
--	---

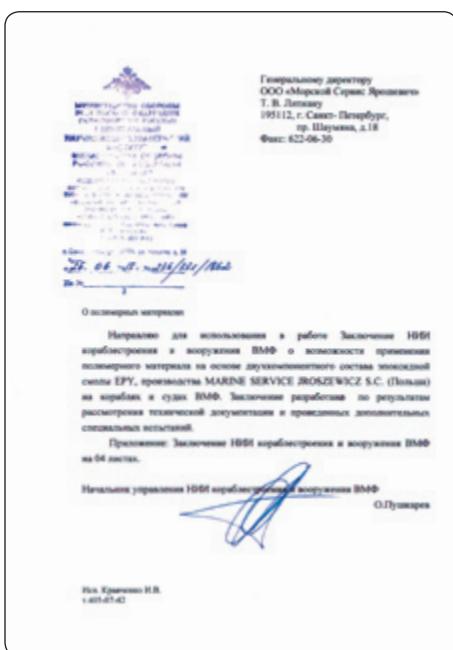
<p>Polski Rejestr Statków</p> <p>ŚWIADECZTO UZNANIA TYPU WYROBU</p> <p>Dokumentacja typu - załącznik do dokumentu typu wyrobu</p> <p>PODKŁADKI WYLEWANE DO POSADZAWIENIA MASZYN I URZĄDZEŃ OKRĘTOWYCH</p> <p>Twierdza chemiczno-wydajnościowe EPIY</p> <p>Stanowiące do wykazania:</p> <ul style="list-style-type: none"> - podkładki mechaniczne w tym również podkładki z grubymi powłokami, - podkładki z elementami prefabrykowanymi, - dla osadzania pochwe wadliwych i tali i kotły kotłowniowych. <p>wyprodukowane przez</p> <p>MARINE SERVICE JAROSZEWCZ S.C. ul. Bielska 23 70-703 Szczecin</p> <p>Principles of classification and building rules of merchant ships, PRS.</p> <p>No. instrument: TM1124/9800002/38 Date instrument: 20/05/99-06</p> <p>Wykonanie: Gdansk, 2010-08-30 </p> <p><small>Przypis: R. Kacprzak Gdansk, 2010-08-30 Przedsiębiorstwo: MARINE SERVICE JAROSZEWCZ S.C. ul. Bielska 23 70-703 Szczecin, Poland Tel: +48 914 606 624 Fax: +48 914 313 075 E-mail: msj@epiyresin.eu www.epiyresin.eu</small></p>	<p>Polski Rejestr Statków</p> <p>APPROVAL CERTIFICATE</p> <p>ŚWIADECZTO UZNANIA</p> <p>This is to certify that the "Zwierzenie typu" for MARINE SERVICE JAROSZEWCZ S.C. ul. Bielska 23 70-703 Szczecin Poland</p> <p>is approved to carry out activities as designated on the certificate.</p> <p>Marine machinery checking on possible foundation checks made from composite materials: Podkładki mechaniczne i tylkotki okrętowe ze podkładkami wylewanymi z żywicą kompozytową:</p> <ul style="list-style-type: none"> - EPIY - produkty od MARINE SERVICE JAROSZEWCZ S.C., - EPT - produkty od MARINE SERVICE JAROSZEWCZ S.C., - CHOCK-A-EST - produkty ITW Philadelphia Resins Corporation, - CHOCK-A-EST - produkty ITW Philadelphia Resins Corporation, - EPOCAST - produkty H.A. Springer marine + Industrie service GmbH, - EPOCAST - produkty ITW Philadelphia Resins Corporation, <p>Certificate no: TM1125/94/250/39 Date issued: 20/03/99-29</p> <p>Issued at/Gdy: Gdansk, 2010-08-30 </p> <p><small>Przypis: R. Kacprzak Gdansk, 2010-08-30 Przedsiębiorstwo: MARINE SERVICE JAROSZEWCZ S.C. ul. Bielska 23 70-703 Szczecin, Poland Tel: +48 914 606 624 Fax: +48 914 313 075 E-mail: msj@epiyresin.eu www.epiyresin.eu</small></p>
--	---

Развитие польских пластмасс и методов монтажа на них машин и устройств





Развитие польских пластмасс и методов монтажа на них машин и устройств





надзора за постройкой и ремонтами судов, производителями судовых машин и устройств, а также другими учреждениями, является важной технической, организационной, а также финансовой проблемой. Принимая всё это во внимание, Европарламент принял соответствующие решения, целью которых является унификация требований и процедур при получении общих сертификатов и классификация определенных изделий, которые будут признаны всеми организациями по надзору за постройкой и ремонтом судов, признанными Евросоюзом. Эта проблема, составляющая содержание Распоряжения [EC] No. 391/2009 Евросоюза, в общих чертах, а также более детально по отношению к пластмассам, предназначенным для фундаментных подкладок, была оговорена в предыдущем пункте настоящего раздела.

Так как это Распоряжение начало действовать с 1-го января 2013 года, фирма MSJ немедленно предприняла соответствующие действия, целью которых является получение для пластмассы EPY нового сертификата с широкой сферой признания. С этой целью необходимо было провести соответствующие исследования этой пластмассы согласно требованиям, определённым в вышеуказанном Распоряжении, выбор одной из организаций (RO's), признанных Евросоюзом, и реализацию определенных процедур действия.

Соответствующая документация вместе с результатами исследований (перечисленных в таблице 2.3) была отправлена в Российский морской регистр судоходства, являющийся одной из 12-ти организаций (EU RO's), признанных Евросоюзом, и имеющей право выдачи такого рода документов. Полные названия этих организаций были перечислены в предыдущем пункте, а их лого (firmenlogos) были показаны на рис. 2.4.

Таблица 2.3. Перечень и результаты испытаний пластмассы ЕРУ

№.	Величина	Рекомендуемый стандарт испытания	Применённый метод испытания	Результат	Отчёт об испытаниях
1	Сопротивление сжатию, МПа	ASTM D-695 - ISO 604	ASTM D-695 - ISO 604	150	Рапорт ZUT 4-2012; п. 4.2
2	Сопротивление растяжению, МПа	ASTM D-638 - ISO 527	ASTM D-638 - ISO 527	54,9	Рапорт ZUT 7-MSJ-2011; п.3.3
3	Модуль упругости, МПа	ASTM D-695 - ISO 604	ASTM D-695 - ISO 604	4255,4	Рапорт ZUT 4-2012; п. 4.2
4	Модуль упругости при сдвиге, МПа	ASTM D 4065	ISO 6721-2	2187	Рапорт PD PS 1998; п.4.4, т.3.1
5	Температура прогиба под нагрузкой, °C	ASTM D 621 - ISO 175-2	ASTM D 621 - ISO 175-2	96,8	Рапорт ZUT 4-2012; п. 4.5
6	Ударная вязкость, кДж/м ²	ASTM D 256 - ISO 180	ASTM D 256 - ISO 180	16,2	Рапорт ZUT 4-2012; п. 4.4
7	Твёрдость, °Barcol	ASTM D-2583	ASTM D-2583	49,8	Рапорт ZUT 4-2012; п. 4.3
8	Сопротивление прогибу, МПа	ASTM D 790	EN ISO 178	73,3	Рапорт ZUT 5-2013; п. 3
9	Линейная усадка при отверждении	ASTM D 2566	ASTM D 2566	0,0002	Рапорт PS 12-2000; п.4
10	Усталостная прочность при сжатии, МПа	DIN 50100	DIN 50100	60	Рапорт PS 09.1995
11	Горючесть, мм/мин	ASTM D 635	ASTM D 635	0	Рапорт ZUT TZ-ASTM D 635A-025-2014
12	Старение, часы	–	MSJ made	195000	MSJ Reference list
13	Коэффициент термического расширения, °C ⁻¹	DIN 53752	ASTM D 696-91	(40±50)×10 ⁻⁶	Рапорт PS 1-2004
14	Диэлектрическая прочность, кВ/мм	DIN 53481	PN-86/E-04404	15,7	Рапорт PS 12.1995; п.5.3
15	Сопротивление изоляции, Ом	DIN 53482	PN-88/E-04405	8×10 ¹²	Рапорт PS 12.1995; п.5.4
16	Коэффициент трения	–	PS made	0,36÷0,62	Рапорт PS 19-1991
17	Маслоёмкость, %	ISO 175	ISO 175	0,013	Рапорт ZUT 4-2012; п. 4.8
18	Плотность, г/см ³	ISO 1675	EN ISO 1183-1	1,57	Рапорт ZUT 6-2013; п. 3
19	Усадка объёма, %	ISO 3521	ISO 3521	2,95	Рапорт ZUT 7-2013
20	Температура гелеобразования, °C	ISO 11357	ZUT made; Method DSC	95,6	Рапорт ZUT 8-2011; п. 3
21	Водоёмкость, %	ISO 175	ISO 62	0,164	Рапорт ZUT 4-2012; п. 4.7
22	Ползучесть, %	–	ZUT made; 5 МПа, 1000 ч, 80°C Indicators type S229 SYLVAC	0,183	Рапорт ZUT 4-2012; п. 4.6
23	Температура экзотермии, °C	–	ZUT made; Thermometer CHY type 506R Thermocouple type K	63,1	Рапорт ZUT 4-2012; п. 4.1
24	Липкость (克莱стость) пластмассы во время отливания, МПа	–	PS made; Viscozymetr Brookfielda RVT	47200	Рапорт PS 23-94

Результаты исследований были приняты и признаны, т. к. отвечали всем поставленным им требованиям, что по новым правилам было подтверждено специальным сертификатом „EU RO Mutual Design Evaluation Certificate”, выданным 4-ого февраля 2014 года. Это стало основой для выдачи документа, обозначенного как „EU RO Mutual Recognition Type Approval Certificate” с датой 25.02.2014 г. Он является сертификатом общего признания пластмассы ЕРУ всеми организаци-
ми, участвующими в проекте.



Рис. 2.4. Логотипы организаций надзора постройки и ремонта судов, признанных Евросоюзом (EU Recognised Organisations)

ями по надзору за постройкой и ремонтами судов, признанными Евросоюзом (перечисленными на рис. 2.4). Этот документ действителен во всём мире, что следует из факта принадлежности к организациям, признанным Евросоюзом (в сокращении обозначенных EU RO's), а также к организациям по надзору за постройкой и ремонтами судов из важных внеевропейских стран: США, Китая, Японии и Кореи. Учитывая новизну и значимость вышеупомянутых сертификатов, дальше будут представлены все их копии.

Необходимо подчеркнуть, что на практике в настоящее время применяются и прежние сертификаты. Переход с существующих до сих пор сертификатов на новые, обоюдно признанные (EU RO MR TAC), является некоторым процессом верификации их на практике. Продукция пластмассы EPY, а также работы при монтаже машин и устройств проводятся согласно процедурам системы управления качеством в соответствии со стандартом DIN EN ISO 9001:2009, что подтверждается сертификатом Gremanischer Lloyd № QS-244 НН, полученным фирмой MSJ в 1994 году, и сертификатом Российского Морского Регистра Судоходства



РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА
RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

6.5.32 MR

№ 14.09099.381

EU RO Mutual Recognition

СВИДЕТЕЛЬСТВО
О СООТВЕТСТВИИ ТИПОВОГО ОБРАЗЦА ИЗДЕЛИЯ*
DESIGN EVALUATION CERTIFICATE*

Тип, марка, назначение
Type, model, purpose

Двухкомпонентный полимерный материал на основе эпоксидной смолы EPY
Two Component Polymer Material on the Base of Epoxy EPY

Предприятие-изготовитель
Manufacturer

Marine Service Jaroszewicz S.C.

Адресс
Address

ul. Bielanska 23, 70-703 Szczecin, Poland

Авторизованый(е) представитель(ли)
Authorized Representative(s)

Документация (наименование и номер документа, дата и номер документа об одобрении Российским морским регистром судоходства)
Documentation (name and number of document, date and number of document of approval by Russian Maritime Register of Shipping)

Комплект технической документации "TWO COMPONENT POLYMER MATERIAL ON THE BASE OF EPOXY EPY. Одобрен РС письмом №.381-09-273775 от 30.12.2013.

The set of technical documentation for the "TWO COMPONENT POLYMER MATERIAL ON THE BASE OF EPOXY EPY". Approved by RS Letter No.381-09-273775 dated 30.12.2013.

проведены освидетельствования и испытания в соответствии с техническими требованиями взаимного признания ЕС по программе, одобренной Российским морским регистром судоходства, при этом:
carried out surveys and tests in according to EU RO MR Technical Requirement according to the programme approved by Russian Maritime Register of Shipping which showed the following:

В ходе освидетельствования были рассмотрены результаты испытаний, выполненных национальными лабораториями (Лаборатория кафедры механики и материалов и Лаборатория огневых испытаний Западно-Поморского технологического университета в г. Щецин, Польша). Лаборатории имеют аккредитацию национальных органов на проведение соответствующих испытаний.

Объем и результаты испытаний в полной мере соответствуют примененным техническим требованиям EU RO MR.

Результаты испытаний приведены в отчетах и промоковых испытаний: Report ZUT4-2012 от 02.2012, Report ZUT 7-MSJ-2011 от 12.2011, Report ZUT 5-2013 от 12.2013, PS 12/2000 от 12.2000, Report TZ/ASTM B 635A/025/2014 от 04.02.2014, Report ZUT 6-2012 от 12.2013, Report ZUT 8-2011 от 06.2011, Report I/2004 от 02.2004, Report PS 12.1995 от 02.10.1995, Report 19/1991 от 07.1991.

The results of tests that were carried out by Nationally accredited testing laboratories, i.e. "Laboratorium Wytrzymalosci Materialow" and "Laboratorium Badan Cech Pozarowych Materialow" of the "Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie" has been reviewed. The Scope and the results of tests are fully comply with the applicable EU RO MR technical requirements.

Test results are available in the following test reports: Report ZUT4-2012 dd. 02.2012, Report ZUT 7-MSJ-2011 dd. 12.2011, Report ZUT 5-2013 dd. 12.2013, PS 12/2000 dd. 12.2000, Report TZ/ASTM B 635A/025/2014 dd. 04.02.2014, Report ZUT 6-2012 dd. 12.2013, Report ZUT 8-2011 dd. 06.2011, Report I/2004 dd. 02.2004, Report PS 12.1995 dd. 02.10.1995, Report 19/1991 dd. 07.1991.

*Изделие может быть допущено к установке на суда только при условии наличия СТО EU RO MR.
The product can be accepted for installation on board of ship with valid TAC EU RO MR only.

2. Пластмассы, применяемые для фундаментных подкладок судовых машин и устройств

Технические данные:

Technical data:

Полимерный материал предназначен для использования в качестве подкладок для судовых машин и архитектурного дизайна, переданных в исполнительные механизмы, рулевые машины, подшипники валопровода, дельтапланов труб, палубных и других исполнительных механизмов.

Максимальные допустимые величины давления на подкладку следующие:				
максимальная температура эксплуатации, °C:	40	50	60	70
для центрируемых механизмов, Нм·м ² :	10,0	8,7	7,8	6,6
для нецентрируемых механизмов Нм·м ² :	36,0	30,0	30,0	25,0

Максимальная удельная нагрузка на подкладку от массы механизма: 0,9 Нм·м²

Ограничения:

1. Установка механизмов с исполнительным материалом должна осуществляться в соответствии с технической документацией, которая одобрена на соответствие требованиям признанной организацией EU RO. Техническая документация, предоставляемая на одобрение, должна включать, как минимум, следующую информацию:

- масса установленных механизмов;
- количество, размер, расположение, тип и материал изолирующих болтов;
- расчеты удельных нагрузок для принятых размеров подкладок от массы механизма и напряжения фундаментных болтов, а также расчеты моментов затяжки фундаментных болтов и соответствующих напряжений в болтах;
- фиксирующие устройства для болтов и расчет удельных болтов для фиксации болтового соединения;
- информация об уплотнительных устройствах (при установке дельтапланов труб или отверстий подшипников);
- информация о исполнительных системах уплотнения (для подшипников валопровода, подшипников и отверстий балера руля);
- инструкции крепления.

2. Установка подкладок может выполняться только компаниями, которые авторизованы изготовителем - Marine Service Jaroszewicz S.C., в рамках ограниченной предусматриваемой технологической процесса. По запросу инспектора-испытателя должны быть представлены документы изготовителя - Marine Service Jaroszewicz S.C., подтверждающие факт обучения персонала авторизованной компанией выполнению технологического процесса установки подкладок.

The chocking compound is approved for foundation chocking of main and auxiliary engines, reduction gears, rudder actuators, stern tubes and bearings, deck machinery and other auxiliary machinery.

Maximum total surface pressure:	40	50	60	70	80
Max. service temperature, °C	40	50	60	70	80
For equipment that should be aligned, N/mm ² :	10,0	8,7	7,8	6,6	5,0

Max. specific load due to weight 0,9 N/mm²

Application limitations:

1. Each specific installation of cast resin checks is to be carried out in compliance with installation drawings approved on case-by-case basis, according to each specific R.O.O. Rule. Such specific approval will normally take into account, as minimum the following:

- Total dryweight of supported machinery;
- Number, size, arrangement and material of checks and bolts, complete with relevant detailed (dimensional) drawings;
- Bolts pre-loaded and/or elongation, complete with details of tightening procedures;
- Locking arrangements for bolts and calculations of bolt elongation for bolt connection securing;
- Longitudinal and lateral support arrangements;
- Sealing arrangements (for shafts, tubes or shafts/stays);
- Anchorage devices (for shaft bearings and rudder stock bearings/bushes);
- Manufacturer's instructions (including instruction for special cases e.g. thin small check height or cracks in checks).

2. The checks may only be poured by companies authorized by the cast resin manufacturer whilst maintaining the boundary conditions required by the process. Authorization respectively evidence of training the personnel performing the cast resin process by the cast resin manufacturer has to be presented to the local surveyor.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
CONCLUSION

На основании проведенных освидетельствований и испытаний установлено, что:

As a result of the surveys it was found that:

Двухкомпонентный полимерный материал на основе эпоксидной смолы EPY соответствует техническим требованиям EU RO MR.

Two Component Polymer Material on the Base of Epoxy EPY is comply with EU RO technical requirements for Resin Checks.

Область применения и ограничений: см. Технические данные
Application and limitations: see Technical data

Код номенклатуры 13350000
Code of nomenclature

Настоящее Свидетельство теряет силу в случаях, установленных Процедурой взаимного признания Организаций, признанных Европейским Союзом.

This Certificate becomes invalid in case stipulated in European Union Recognized Organization Mutual Recognition Procedure.

Место выдачи: Санкт -Петербург, Россия Дата выдачи 04.02.2014
Place of issue Saint-Petersburg, Russia Date of issue



А.Ю. Захаров/A. Zakharov
(фамилия, инициалы
name)

PC 6.5.32 MR

04/2013

**РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА
RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING**

6.8.3 MR



**EU RO Mutual Recognition
СВИДЕТЕЛЬСТВО О ТИПОВОМ ОДОБРЕНИИ
TYPE APPROVAL CERTIFICATE**

Изготовитель
Manufacturer **Marine Service Jaroszewicz S.C.**

Адрес
Address **ul. Bielanska 23, 70-703 Szczecin, Poland**

Изделие*
Product* **Двухкомпонентный полимерный материал на основе эпоксидной смолы EPY**
Two Component Polymer Material on the Base of Epoxy EPY

Код номенклатуры
Code of nomenclature **13350000**

На основании освидетельствования и проведенных испытаний удостоверяется, что вышеупомянутое(ые) изделие(я) удовлетворяет(ют) Согласованным техническим требованиям Организаций, признанных Европейским Союзом и вышеуказанным требованиям Правил/Стандартам:

This is to certify that on the basis of the survey and tests carried out the above mentioned product(s) comply with the Agreed Technical Requirements of European Union Recognized Organization and below mentioned Rules/Standards:

EURO Technical Requirements for Resin Chocks, version 1.0 dated 01.01.2013

Настоящее Свидетельство о типовом одобрении действительно до **25.02.2019**
This Type Approval Certificate is valid until

Настоящее Свидетельство о типовом одобрении теряет силу в случаях, установленных Процедурой взаимного признания Организаций, признанных Европейским Союзом.
This Type Approval Certificate becomes invalid in cases stipulated in European Union Recognized Organization Mutual Recognition Procedure.

Место выдачи **Санкт-Петербурга, Россия** Дата выдачи **25.02.2014** № **14.09101.381**
Place of issue **Saint-Petersburg, Russia** Date of issue **25.02.2014** № **14.09101.381**

Российский морской регистр судоходства
Russian Maritime Register of Shipping



А.В. Филиппов / A. Filippov
(**Фамилия, инициалы**)

*Дополнительную информацию смотрите на обороте.
Additional information see overleaf.

Технические данные
Technical data

Максимальные допустимые величины давления на подкладку следующие:

максимальная температура эксплуатации, °C:	40	50	60	70	80
для центруемых механизмов, Н/мм ² :	10,0	8,7	7,8	6,4	5,0
для нецентруемых механизмов Н/мм ² :	30,0	30,0	30,0	15,0	15,0

Максимальная удельная нагрузка на подкладку от массы механизма: 0,9 Н/мм²;

Maximum total surface pressure:

Max. service temperature, °C:	40	50	60	70	80
For equipment that should be aligned, N/mm ² :	10,0	8,7	7,8	6,4	5,0
For equipment that should not be aligned, N/mm ² :	30,0	30,0	30,0	15,0	15,0

Max. specific load due to weight: 0,9 N/mm².

Свидетельство о соответствии типового образца изделия (EU DE) No. 14.09099.381 от 04.02.2014
Design Evaluation Certificate No.

выдано RS являющейся(-ею) организацией признанной ЕС в соответствии со Ст.10 Правила No. 391/2009
issued by which is EU RO and meets Article 10 of Regulation (EC) No.391/2009

Европейского Парламента ЕС.
of the European Parliament.

Оценка качества производства (PQA) выполнена Российским морским регистром судоходства
Production quality assurance assessment has been carried out by Russian Maritime Register of Shipping

Акт № 14.09100.381 от 25.02.2014
Report No. _____ of _____

Область применения и ограничения
Application and limitations

Полимерный материал предназначен для использования в качестве подкладок для судовых главных и вспомогательных двигателей, передач главных и вспомогательных двигателей, рулевых машин, подшипников валопровода, дейдвудных труб, палубных и других вспомогательных механизмов.

The chocking compound is approved for foundation choking of main and auxiliary engines, reduction gears, rudder actuators, stern tubes and bearings, deck machinery and other auxiliary machinery.

*Ограничения приведены в Дополнении к настоящему свидетельству.
The limitations are listed in the Supplement to this Certificate .*

Изделие должно поставляться с копией настоящего Свидетельства о типовом одобрении
The product shall be delivered with a copy of this Type Approval Certificate

ДОПОЛНЕНИЕ SUPPLEMENT

к Свидетельству № 14.09101.381
to Certificate No.

Ограничения:

1. Установка механизмов с использованием материала должна осуществляться в соответствии с технической документацией, которая одобряется на соответствие требованиям признанной организации EU RO. Техническая документация, предоставляемая на одобрение, должна включать, как минимум, следующую информацию:
 - масса устанавливаемых механизмов;
 - количество, размер, расположение, тип и материал используемых болтов;
 - расчеты удельных нагрузок для принятых размеров подкладок от массы механизма и затяжки фундаментных болтов, а также расчеты моментов затяжки фундаментных болтов и соответствующих напряжений в болтах;
 - фиксирующие устройства для болтов и расчет удлинения болтов для фиксации болтовых соединений;
 - информация об устройствах для предотвращения продольного и поперечного смещения;
 - информация об уплотнительных устройствах (при установке дейдвудных труб или опорных подшипников);
 - информация об используемых стопорных устройствах (для подшипников валопровода, подшипников и втулок баллера руля);
 - инструкции изготовителя.
2. Укладка подкладок может выполняться только компаниями, которые авторизованы изготовителем - Marine Service Jaroszewicz S.C., в рамках ограничений предусмотренных технологическим процессом. По запросу инженера -инспектора должны быть представлены документы изготовителя - Marine Service Jaroszewicz S.C., подтверждающие факт обучения персонала авторизованной компаний выполнению технологического процесса установки подкладок.

Application limitations:

1. Each specific installation of cast resin chocks is to be carried out in compliance with installation drawings approved on case-by case basis, according to each specific R.O.'s Rules. Such specific approval will normally take into account, as minimum the following:
 - Total deadweight of supported machinery;
 - Number, size, arrangement and material of chocks and bolts, complete with relevant detailed (dimensioned) drawings;
 - Bolts pre-loaded and/or elongation, complete with details of tightening procedures;
 - Locking arrangements for bolts and calculations of bolt elongation for bolt connection securing;
 - Longitudinal and lateral stopping arrangements;
 - Sealing arrangements (for installation in stern tube or shafts struts);
 - Anti-rotation devices (for shaft bearings and rudder stock bearings/bushes);
 - Manufacturer instructions (including instruction for special cases e.g. Thin small chock height or cracks in chocks).
2. The chocks may only be poured by companies authorized by the cast resin manufacturer whilst maintaining the boundary conditions required by the process. Authorization respectively evidence of training the personnel performing the cast resin process by the cast resin manufacturer has to be presented to the local surveyor.

Инженер-инспектор
Surveyor



A.B. Филиппов / A. Filippov

(фамилия, инициалы)

№ 00.017.258, полученным в 2000 году, а также сертификатом Транспортного дорожного надзора № 7 351 058 2008 Q, полученного в 2008 году.

В последующих исследовательских работах над тщательным изучением и совершенствованием эксплуатационных свойств пластмассы EPY принимали участие сотрудники Кафедры механики и основ конструкции машин. Среди них были следующие специалисты: dr inż. Konrad Konowalski, dr inż. Ryszard Kawiak, dr inż. Paweł Grudziński, dr inż. Jędrzej Ratajczak, dr inż. Magdalena Urbaniak.

Значительное участие в работах по внедрению, проведенных фирмой MSJ под руководством dr inż. Wiesława Jaroszewicza, приняли: mgr inż. Zbigniew Kępkiewicz (Гданьская судоверфь), mgr inż. Zbigniew Skierkowski (Щецинская судоверфь), dr inż. Jędrzej Ratajczak (ZTU в Щецине, MSJ), mgr inż. Dorota Ratajczak (MSJ), inż. Stanisław Kłoczko (MSJ).

Значительную роль в практическом применении пластмассы EPY для ремонта и для модернизации монтажа крупногабаритных поршневых компрессоров на многочисленных газокомпрессорных станциях на территории Польши и в химической промышленности (ZAP) сыграло предприятие конструкции и экспертизы TECHMARIN Sp. z o.o. в Свиноустье, которым руководит Włodzimierz Kołodzejski. Разработанные им новаторские проекты, касающиеся монтажа состава компрессоров при помощи пластмассы, оправдались на практике и получили признание специалистов и потребителей этих объектов.

Применяемые в настоящее время пластмассы для фундаментных подкладок были разработаны с целью усовершенствования технологии и улучшения технического качества монтажа машин при обеспечении надлежащей точности и стабильности монтажа, а также жесткости закрепления. В этой области пластмассы ведут себя намного лучше, чем традиционные металлические подкладки. На практике оказалось, что разработанные пластмассы могут также положительно влиять на уменьшение вибраций и шума, а в особенности на снижение ударных шумов, проводимых элементами конструкции. Этой проблемой интересуется большинство потребителей машин и устройств. В настоящее время она является предметом интенсивных исследований, которые ведутся не только в Польше, но и во многих других странах.

Фирма MARINE SERVICE JAROSZEWICZ (MSJ), заинтересованная своим развитием, тесно сотрудничает также в этой области с Кафедрой конструкции машин Западнопоморского университета в Щецине. Научно — исследовательские работы в этой области систематически проводятся над дальнейшим совершенствованием термомеханических свойств пластмассы и методов монтажа машин и устройств с её применением, а также над решением многочисленных актуальных научно-технических проблем, связанных с расширением диапазона её применения на инженерской практике.

3

Теоретические и экспериментальные основы исследований и описание процесса отверждения эпоксидных систем

3.1. Общая характеристика отверждения эпоксидных систем

Процесс отверждения эпоксидных пластмасс наступает в результате химической реакции между функциональными группами (эпоксидными и гидроокисными), находящимися в смоле, и отвердителем, имеющим больше чем две реактивные функциональные группы. Этот процесс имеет характер полиприсоединения, что обозначает, что он протекает без выделения низкомолекулярных побочных продуктов. Реакция структурирования эпоксидных смол является сложной в силу взаимного воздействия кинетики химической реакции с другими физическими процессами, такими, как студенение (желатинизация, гелеобразование) и стеклование (витрификация), вызывающими принципиальные изменения макроскопических физических свойств реагирующей системы [51, 52]. Сначала плавкая и растворимая смоляная система преобразуется в объёмное структурированное соединение, неплавкое и нерастворимое в органических растворителях.

Процесс реакции структурирования определяет морфологию реагирующей системы, которая переходит из вязкой жидкости сквозь промежуточное состояние, называемое остуденением, в твёрдое стекловидное состояние. Очередные фазы процесса структурирования схематически показаны на рис. 3.1 [53]. Реакция структурирования начинается формированием и линейным ростом цепей, которые вскоре начинают разветвляться, а потом соединяться с пространственной сетевой структурой.

В процессе структурирования эпоксидной смолы реакция сначала происходит очень быстро, увеличивается молекулярный вес и повышается стеклование (T_g) в результате увеличения плотности структурирования материала. Скорость реакции увеличивается до определённой степени перереагирования функциональных групп, при котором резко увеличивается вязкость системы и появляется сетчатая структура. Момент, во время которого образуется объёмная сетчатая структура, а вязкая жидкость внезапно и необратимо превращается в эластичный гель, называется пунктом студенения. С этого момента химический механизм реакции ослабевает (реактивность функциональных групп) и её

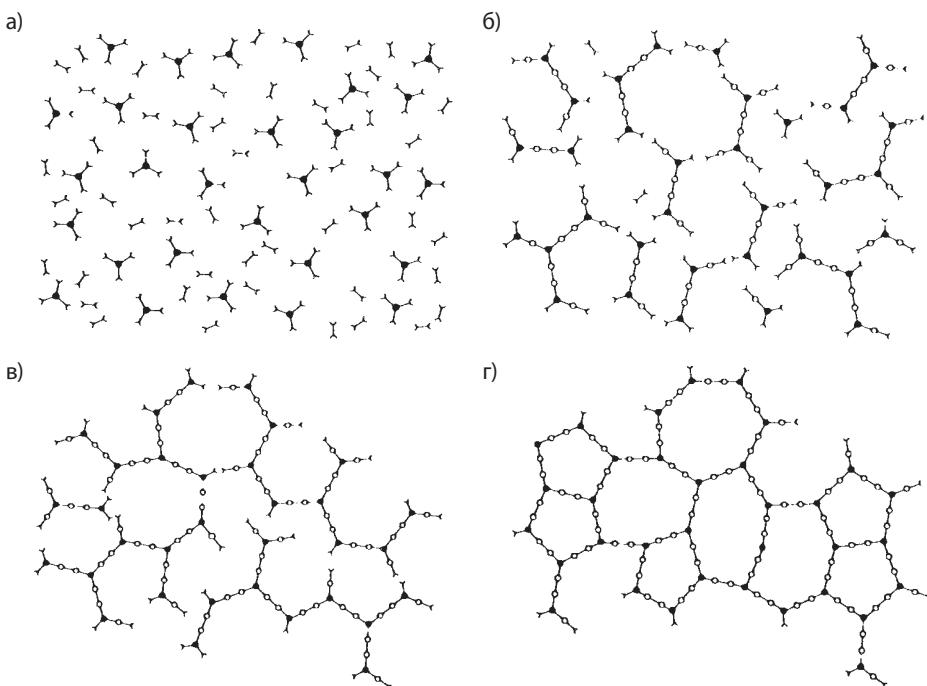


Рис. 3.1. Схема двухразмерного процесса структурирования эпоксидных систем: а) смеси мономеров; б) равномерный линейный рост и разветвление цепей (ниже точки геля); в) дальнейшее формирование гелеобразного, но не вполне структурированного пространственного строения; г) вполне структурированное пространственное строение [53]

скорость уменьшается. Студенение, как молекулярное явление, происходит в стадии химической реакции, которую обычно можно определить, т. е. при определённой степени перереагирования системы. На процесс химической реакции и её прогрессии, названной перереагированием или в общем конверсией, влияет функциональность, реактивность и стехиометрия реагентов (реактивов). Степень конверсии определяется степенью перереагирования функциональных групп (аминовых, ангидридных, оксираных и других), принимающих участие в реакции отверждения.

Ёё измерение можно вести с начала отверждения до момента, когда содержание функциональных групп ещё можно обозначить, а изменения содержимого уже являются неуловимыми (после остыднения). Дальнейший ход реакции измеряется приростом степени структурирования. Студенение в эпоксидных системах происходит обычно между 0,55 и 0,80 степени конверсии [53—55]. Его макроскопическим результатом является быстрое достижение вязкости системы с бесконечно большой величиной и потеря способности к переработке, а также получение эластичных свойств, не выступающих до сих пор (прегель) [53, 56].

Приближению эпоксидной системы к пункту студенения сопутствует рост величины полимерной молекулы в результате реакции всё большего количества конечных групп. Чем больше многофункциональных (разветвляющих) элементов в цепи молекулы, тем больше она становится реактивной и легче присоединяет другие элементы. В ходе реакции разветвлённые цепи соединяются друг с другом, образуя огромные макромолекулы с десятками и даже сотнями функциональных групп, способных присоединять другие молекулы с функциональными группами. Рост молекул проходит всё быстрее и ведёт к состоянию, в котором вся система становится огромной „макромолекулой“ с бесконечно огромным — в молекулярном масштабе — молекулярным весом. В конце концов образуется однородная, по своему физическому строению, фаза в виде „твёрдого тела“ (гель) [57].

После пункта студенения (постгель) кроме функции геля далее образуется ещё растворимая и плавкая фракция золя. Во время дальнейшего процесса реакции структурирования всё больше молекул присоединяется к объёмной сети и увеличивается плотность структурирования. Это обозначает, что участие фракции геля возрастает за счёт фракции золя, а по весу средний молекулярный вес (M_w) системы стремится к бесконечности, однако увеличение среднего молекулярного веса (M_n) в цифровом выражении является небольшим [58—61]. По-прежнему увеличивается плотность структурирования и температура стеклования.

Когда температура стеклования срываеться с температурой структурирования ($T_g = T_c$), тогда наступает явление стеклования смольной структуры. Стеклование является переходной стадией от состояния эластичного геля до состояния стекловидного, не полностью отвердевшего (*sol/gel glass*), в результате увеличения плотности структурирования.

Стеклование является также возможным в эффекте переохлаждения вязкой жидкости, однако в этом случае ему не предшествует её студенение, а это состояние, в отличие от первого, называется стекловидным нестуденением (*sol/glass*) [51]. Пункт стеклования обозначает изменение механизма реакции, переходящей в это время от состояния, контролируемого химической реактивностью функциональных групп, до состояния, контролируемого диффузией [62, 63]. Когда система подвергается стеклованию, подвижность реагирующих функциональных групп становится всё более ограниченной и скорость химической реакции значительно уменьшается. В конце концов это ограничение приводит к тому, что реакция практически задерживается, воспрепятствуя реагирующей системе достижение полной конверсии [64, 65].

Стеклование системы, называемое также стекловидным переходом, наступающее при таком неполном перереагировании, является превращением, которое можно возобновить. В неполнотью уструктурированном материале во время его повторного нагревания происходит дальнейшее структурирова-

3. Теоретические и экспериментальные основы исследований и описание процесса отверждения эпоксидных систем

ние в „твёрдом состоянии“ (доструктурирование). Тепло нагревания вызывает возобновление химических реакций, что определяется названием расстеклования (*devitrification*) [53]. Благодаря этим реакциям в консистентном материале увеличивается плотность структурирования, а вместе с ней повышается также его температура стеклования.

Характеризуя процесс структурирования эпоксидной смолы, необходимо сделать несколько замечаний по поводу некоторых технологических аспектов этого процесса. Реакции между смолой и отвердителем являются сильно экзотермическими. Выделяющееся тепло реакции вызывает значительное повышение температуры системы (особенно при отвердевании большого количества смолы в одной порции). Это увеличивает подвижность молекул, что облегчает и ускоряет процесс реакции эпоксидных групп с отвердителем.

Скорость структурирования зависит также от реактивности смолы и отвердителя и определяется их химическим строением. Слабая теплопроводность смолы и отвердителя является причиной тому, что повышение температуры, особенно внутри больших отливок, может быть чрезмерным и в результате может привести к появлению местных перегревов и высокому уровню внутренних напряжений в отливках, а даже к их растрескиванию. Чрезмерному повышению температуры можно противодействовать, добавляя в смолу большое количество минерального наполнителя, поглощающего и облегчающего отвод выделяющегося во время реакции тепла.

Однако добавка минеральных наполнителей прежде всего влечёт за собой уменьшение усадки в процессе отвердевания, что имеет большое значение не только для больших отливок. Кроме того, добавка минеральных наполнителей значительно уменьшает коэффициент линейного расширения пластмассы, что является особо важным в том случае, когда она должна взаимодействовать с другими материалами без опасения появления больших напряжений и даже посечек (появление трещин, растрескивание) при изменении температуры. Хорошая теплопроводность наполнителей вызывает то, что тепло реакции отводится быстрее, а процесс структурирования проходит более равномерно.

Всё это является причиной тому, что теплостойкость и теплостабильность пластмассы увеличиваются, а также улучшаются некоторые её механические свойства. Однако склонность наполнителей к седиментации может стать причиной неоднородности (гетерогенности) пластмассы, а тем самым и её свойств в массе отливки [66].

Введение наполнителей обычно продлевает время существования композиции, т. е. период времени, в течение которого можно проводить литьё в данном технологическом процессе. Литьё должно быть выполнено перед достижением композицией, так называемой, критической вязкости, после которой она начинает очень быстро расти до остудения системы. Прибавление наполнителей может привести также к увеличению вязкости композиции, что затрудняет перера-

ботку, в особенности деаэрацию (обезвоздушивание) композиции. В таком случае для выполнения отливки может стать необходимым подогрев композиции или применение разбавителей (разжижителей). На скорость увеличения вязкости в определённой температуре влияет преимущественно реактивность смольной системы, которая зависит от содержания эпоксидных групп, реактивности отвердителя и от присутствия разбавителей [66].

Процесс структурирования сначала протекает очень быстро — до некоторой степени перереагирования функциональных групп — после чего скорость реакции уменьшается. Это уменьшение скорости реакции вызывается увеличением вязкости в результате образования пространственной сетки, что влияет на замедление скорости диффузии структурирующих веществ в частично структурированной системе. Процесс отверждения сопровождается небольшим уменьшением объёма в результате усадки, вызванной увеличением плотности. В конечном этапе процесс структурирования проходит в стеклообразном состоянии [67]. Поэтому отвердевший полимер получает оптимальные механические свойства только через некоторое время. Выгодным является добавочное упрочнение, т. е. прогревание системы при повышенной температуре. Это особенно относится к полимерам, которые отвердеваются при комнатной температуре. Добавочное упрочнение увеличивает плотность структурирования системы и тем самым повышает её температуру стеклования, которая определяет предельную температуру применения данной полимерной пластмассы.

Знание хода и теплового эффекта процесса структурирования эпоксидной смеси, а в особенности информации о явлениях студенения и стеклования, протекающих в это время, является необходимым для характеристики этой системы. От студенения и стеклования зависят физические, химические и механические свойства финального материала. Эта информация необходима для определения эффективных процедур структурирования, которые должны обеспечить оптимальные свойства пластмассы для определённого применения. Сбор этой информации и представление её в виде различного рода диаграмм позволяет описать ход процесса структурирования, как с физической, так и химической точки зрения, очень простым и понятным образом. Диаграммы структурирования могут являться основой для анализа и проектирования циклов структурирования смолистых систем.

3.2. Диаграммы структурирования эпоксидных пластмасс

3.2.1. Замечания общего характера

Из-за сложности явлений, выступающих во время процесса структурирования, трудно сразу же определить условия переработки таким образом, чтобы получить оптимальные свойства пластмассы для разного рода специфических её применений. Для этой цели необходимо собрать информацию о процессе

структурирования, особенно студенения и стеклования, которые являются непременными для системы эпоксидных смол.

Характерная информация, связанная с процессом отверждения эпоксидной системы, как например, изменения вязкости, изменения степени конверсии и структурирования, данные, относящиеся к студенению и стеклованию, полученные при помощи соответствующей исследовательской техники, является практически недоступной или трудной для интерпретации. Однако, если экспериментально установленные результаты, например при помощи метода дифференцированной сканинговой каллориметрии или ротационной вискозиметрии, будут соответствующим способом собраны и численно обработаны, тогда станет возможным представление сложной зависимости между временем, температурой и процессом отверждения в графической форме, удобной и нетрудной для интерпретации.

Особое значение для анализа и проектирования цикла структурирования эпоксидных пластмасс имеют три графические обработки:

- диаграмма TTT (*Time—Temperature—Transformation*), т. е. время—температура—превращение,
- диаграмма CTT (*Conversion—Temperature—Transformation*), т. е. конверсия—температура—превращение,
- диаграмма T_g TP (*Glass transition temperature—Temperature—Property*), т. е. температура стеклования—температура—свойство.

Выполнение этих диаграмм делает возможным полное ознакомление с поведением исследуемой эпоксидной системы во время процесса структурирования, а тем самым подбора оптимальных условий её переработки для конкретных применений, например, условий отверждения фундаментных подкладок машин. Учитывая их большое теоретическое и практическое значение, вышеуказанные диаграммы будут здесь представлены теоретически, а затем будут определены и оговорены для исследуемой пластмассы ЕРУ.

3.2.2. Диаграмма структурирования ТТТ: время—температура—превращение

Диаграмма изотермического структурирования ТТТ (время—температура—превращение), которую предложил John K. Gillham [51, 68], простым и понятным способом представляет сложную зависимость между временем, температурой и феноменологическими изменениями, которые проходят в эпоксидных смолах во время реакции структурирования. Каждый переход в пределах этих трёх состояний схематически определён на диаграмме ТТТ (рис. 3.2) контурами времени для студенения и стеклования при разных температурах структурирования (T_c). Временное протекание процесса структурирования находится обычно между линией температуры стеклования полностью неструктурированной системы (T_{g0}) и линией температуры стеклования полностью структурированной системы ($T_{g\infty}$). Переход от одного состояния к другому вызывает

существенные изменения термомеханических свойств эпоксидной системы и охватывает два чётко наблюдаемых макроскопических, феноменологических изменений смолы: студенение, т. е. переход из жидкого состояния в состояние геля, а также стеклование, т. е. переход из жидкого состояния или геля в постоянное состояние — стекловидное.

На диаграмме ТТТ (рис. 3.2) эти переходы образно изображают множество пунктов студенения и стеклования, создающее соответственно спадающую кривую стеклования системы. В точке студенения смола перестаёт быть жидкостью и теряет способность к дальнейшей переработке, а в точке стеклования, когда скачкообразно увеличивается жёсткость смолы, температура стеклования (T_g) достигает высокой величины температуры переработки.

В пределе этих трёх состояний на диаграмме ТТТ (рис. 3.2) можно выделить несколько межпространств, которые показывают промежуточные состояния в процессе структурирования, зависящие от температуры, времени и специфических свойств эпоксидной системы (T_{g0} , $gelT_g$, $T_{g\infty}$) [51, 53, 58, 69—72]. Межпространства диаграммы, разграниченные кривой студенения и зигзагообразной кривой стеклования, а также линией полного структурирования (рис. 3.2), представляют семь следующих состояний системы:

- жидкое (*liquid*),
- стеклообразное, полностью неотверждённое (*sol, glass*),
- остуденённое, неполностью отверждённое (*sol/gel, rubber*),
- остуденённое, полностью отверждённое (*gel, rubber*),

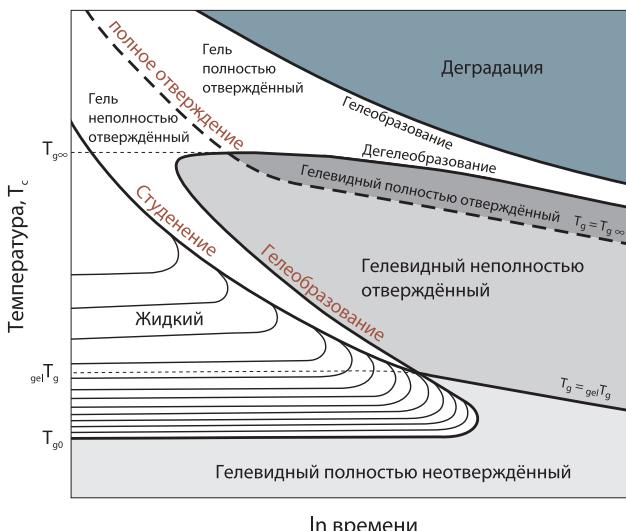


Рис. 3.2. Схематичный график структурирования ТТТ (время—температура—превращение), показывающий разные морфологические состояния полимерных смол [58]

3. Теоретические и экспериментальные основы исследований и описание процесса отверждения эпоксидных систем

- стеклообразное, неполностью отверждённое (*sol/gel, glass*),
- стеклообразное, полностью отверждённое (*gel, glass*),
- обугленное (*char*).

Диаграмма ТТТ также представляет и иную информацию о процессе структурирования, например, касающуюся изменений вязкости (линии изовязкости), а также зависимости между прогрессом конверсии и температурой стеклования (линии изоконверсии). Такая диаграмма создаёт возможность полного ознакомления с термомеханическим поведением эпоксидной композиции во время структурирования и является полезным инструментом для визуализации, понимания, анализирования и проектирования цикла структурирования эпоксидных систем и определения их свойств.

Такая диаграмма делает возможным выбор соответствующего сценария структурирования в системе время – температура таким образом, чтобы студенение и стеклование, от прохождения процесса которых зависят как свойства переработки, так и термомеханические свойства, протекали контролируемым способом с целью получения желательных свойств конечного изделия [58, 72].

Основу изотермической диаграммы составляют три характерные температуры: T_{g0} — температура стеклования неструктурных реагентов, $_{gel}T_g$ — температура, при которой студенение и стеклование выступают одновременно, $T_{g\infty}$ — температура стеклования для полностью структурированной системы, а кроме того — контуры времени для студенения и стеклования пластмассы при разных температурах структурирования.

Подчёркнутая между температурами T_g и $T_{g\infty}$ линия на диаграмме ТТТ (рис. 3.2), отмечающая время, имеет характерную „S“-образную форму. Её форма следует из того, что скорость реакции увеличивается с повышением температуры, а время стеклования достигает в этом пределе двух экстремумов. Первый — при температуре структурирования непосредственно выше T_{g0} , когда время стеклования становится максимальным из-за большого количества реагентов при постоянной скорости реакции. Второй — при температуре непосредственно ниже $T_{g\infty}$, когда время для стеклования достигает минимума в результате уменьшающейся концентрации реагентов и большой скорости реакции при повышенной температуре.

Следовательно форма кривой стеклования является функцией кинетики реакции, а также величин T_{g0} , $_{gel}T_g$ и $T_{g\infty}$ системы и зависимости между температурой стеклования и конверсией [51, 71]. Спадающая на диаграмме (рис. 3.2) кривая студенения показывает продление времени для стеклования вместе с понижением температуры структурирования и пересекается с кривой стеклования при характерной температуре $_{gel}T_g$, при которой одновременно наступают студенение и стеклование системы.

В район жидкого состояния на диаграмме ТТТ, ограниченный кривой студенения (выше $_{gel}T_g$) и кривой стеклования (ниже $_{gel}T_g$), вписываются обычно

линии изовязкости (рис. 3.2), проведенные для очередных рядов величин. Они показывают резко возрастающую вязкость системы [58].

Следует заметить, что кривая стеклования ниже $_{gel}T_g$ является контуром района вязкости. Изменение вязкости становится со временем одним из самых важных технологических параметров в процессе структурирования, а уровень изовязкости практически становится мерой студенения.

Кривые же изоконверсии на диаграмме ТТТ укладываются приблизительно параллельно как линиям полного структурирования, так и линиям студенения, т. к. студенение считается изоконверсионным состоянием [58, 73].

Читая представленные на диаграмме процессы структурирования T_c , необходимо принимать во внимание то, что при температуре ниже T_{g0} (рис. 3.2) в принципе не происходит никакая химическая реакция. Отсутствие реактивности системы ниже T_{g0} вызывается замораживанием подвижности молекул.

Из-за этого материал находится в стекловидном состоянии, содержащем только фракцию золя. Следовательно температура T_{g0} служит для определения температур хранения неперереагированных смол.

Во время структурирования системы выше T_{g0} молекулы вступают в химическую реакцию друг с другом, растут и разветвляются — увеличивается плотность структурирования и температура стеклования системы. Если реакция отверждения удерживается в интервале температур между T_{g0} и $_{gel}T_g$ (рис. 3.2), то сначала жидкая смола будет реагировать без студенения до момента, когда постоянно повышающаяся температура стеклования сравняется с температурой структурирования ($T_g = T_c$) и начнётся стадия стеклования.

Из-за того, что материал подвергается стеклованию без фракции геля, такое растворимое и плавкое состояние называется *стеклообразным, полностью неотверженным (sol, glass)*. Стеклование приостанавливает химическую реакцию и делает возможным студенение. В условиях резко уменьшающейся скорости реакции не сможет образоваться большое количество ковалентных связей (твёрдых, сильных связей, создающих главную цепь полимера), которые с точки зрения прочности пластмассы являются самыми выгодными.

В результате этого между молекулами смолы будут преобладать слабые физические воздействия (силы когезии, т. е. силы сцепления). Отсюда потенциальная прочность так „отверждённой“ смолы будет использована только в незначительной степени. Граница появления этого состояния определяется температурой $_{gel}T_g$, при которой одновременно выступают студенение и стеклование.

Если структурирование проходит в диапазоне температур между $_{gel}T_g$ и $T_{g\infty}$ (рис. 3.2), то сначала наступит студенение системы, т. е. зачаточное формирование пространственной сетчатой структуры. Наступающее после этого стеклование возникает только тогда, когда постоянно повышающаяся температура стеклования достигает температуры структурирования ($T_g = T_c$). После студенения температура стеклования системы повышается в результате увеличения

плотности структурирования, а также количественного увеличения среднего молекулярного веса (M_n) (смеси золь/гель) [74].

После студенения реактивные молекулы продолжают реагировать и увеличивают фракцию геля до того времени, когда стеклование значительно уменьшит молекулярную и субмолекулярную подвижность. Из-за недостатка подвижности молекул всё ещё большое количество фракционных групп, выступающее в системе, не может уже реагировать и химические реакции практически замедляются. Несмотря на это, большое количество образовавшихся ковалентных связей обеспечивает свойства прочности смоляной системы, соответствующие этой степени перереагирования.

При отсутствии полного структурирования остееклованный материал при температуре между T_g и $T_{g\infty}$ будет содержать как элементы фракции золя, так и геля. Такое состояние материала называется *стеклообразным, неполностью отверждённым (sol/gel, glass)*, при котором материал является нерастворимым и неплавким.

Перереагирование, близкое полному перереагированию, смольная система достигает довольно быстро при температуре структурирования больше $T_{g\infty}$, а значительно медленнее во время структурирования при температурах линии полного структурирования ($T_g = T_{g\infty}$) — рис. 3.2. Стеклообразное состояние между T_g и $T_{g\infty}$ разделено вышеуказанной линией на две части: ниже линии, где структурирование ещё не является полным — *стеклообразное состояние, неполностью отверждённое (sol/gel glass)*, а также выше линии, где система полностью перереагирована — *стеклообразное состояние, полностью отверждённое (gel glass)*.

Если структурирование проходит при температуре выше $T_{g\infty}$, то система будет студенеть, но не подвергаться стеклованию, а повышение температуры структурирования может только довести до её деградации. Линия полного структурирования в районе выше $T_{g\infty}$ системы отделяет *состояние остыденённое, неполностью отверждённое (sol/gel, rubber)* от *состояния остыденённого, полностью отверждённого (gel, rubber)*, достигнутого после продлённого изотермического структурирования [51, 53, 58, 70, 71]. При высоких температурах (выше $T_{g\infty}$) материал подвергается термической деградации [75, 76].

На диаграмме ТТТ можно выделить два случая: *расстеклование (devitrification)*, после которого материал из стеклообразного состояния переходит в эластичное состояние, и повторное *остуденение (revitrification)*, являющееся практически началом обугливания. Случай расстеклования связан с падением температуры стеклования с высокой до низкой изотермической температуры структурирования. Это падение следует из уменьшения количества связок и придания эластичности материалу. Момент возникновения этого случая считается пределом времени, при котором материал может переносить нагрузку.

Второй случай является переходом от эластичного состояния к состоянию стеклования с высокой жёсткостью. Это вызвано увеличивающимся количест-

вом связок или улетучиванием эластичного материала с малым молекулярным весом и ведёт к состоянию начала обугливания [58, 71, 77].

Сравнение свойств разных материалов может быть достоверным только при таком самом состоянии структурирования. Поэтому определение зависимости структуры от свойств совершается прежде всего при полностью структурированных системах, которые проще всего можно получить, проводя структурирование при температуре около $T_{g\infty}$ данной системы без подвергания её деградации.

3.2.3. Диаграмма структурирования СТТ: конверсия—температура—превращение

Используя данные, подобные тем, на которых основывается диаграмма ТТТ, Adabbo и Wiliams [78] разработали другую диаграмму, простую и применимую для анализа прохождения процесса структурирования эпоксидных смол — диаграмму в системе координат: конверсия—температура—превращение, названную диаграммой СТТ (*conversion—temperature—transformation*).

Схематическая диаграмма СТТ, показанная на рис. 3.3, представляет реакции между химической прогрессией в химически отверждённом полимере и увеличением температуры стеклования и феноменологическими изменениями, происходящими во время структурирования [70, 78—80].

Эту диаграмму можно получить, соответственно преобразуя диаграмму ТТТ (рис. 3.2), принимая во внимание то, что студенение данной эпоксидной сис-

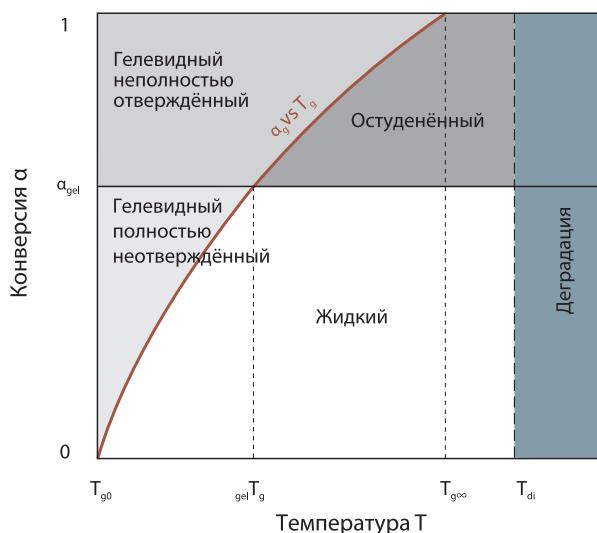


Рис. 3.3. Схематичный график структурирования СТТ (конверсия—температура—превращение), показывающий разные морфологические состояния эпоксидного материала [78]

темы происходит при такой же степени химической конверсии, несмотря на температуру структурирования [70]. Отсюда кривая студенения из диаграммы ТТТ преобразована здесь в линию конверсии геля (α_{gel}), а кривая стеклования представлена на диаграмме СТТ (рис. 3.3) как следующая кривая: конверсия стекловидного перехода – температура ($\alpha_g - T_g$).

Диаграмма СТТ более общим способом показывает поведение химически отверждённой композиции во время структурирования. Разделённое пересекающимися в точке студенения линиями α_{gel} и α_g vs. T_g пространство диаграммы СТТ представляет четыре морфологические состояния структурированной системы, выступающие в зависимости от степени конверсии (структурирования) и температуры:

- жидкое состояние (*liquid*);
- стекловидное, полностью неотверждённое (*sol, glass*);
- стекловидное, неполностью отверждённое состояние (*sol/gel, glass*);
- состояние остуденения (*rubber*), а дополнительно проведенная линия температуры начала деградации (T_{di}) позволяет представить район термического разложения (пиролиз) пластмассы (*decomposition*).

Положение линии конверсии геля α_{gel} на диаграмме СТТ зависит от функциональности реагентов, а не от температуры. Однако температура может модифицировать реактивность функциональных групп или вызывать эффекты замещения групп, или межмолекулярных реакций, изменяющих в результате величину α_{gel} [78]. Величина α_g здесь является конверсией, которая приводит к стеклованию системы при температуре стеклования (T_g). Увеличение температуры T_g вместе с прогрессией конверсии происходит из-за увеличивающейся степени структурирования [81, 82].

Обозначения отдельных температур ($T_{g0}, \alpha_{gel}T_g, T_{g\infty}$) на диаграмме СТТ (рис. 3.3) являются такими же, как на диаграмме ТТТ (рис. 3.2), а T_{di} обозначает температуру начала деформации пластмассы.

3.2.4. Диаграмма структурирования T_gTP : температура стеклования—температура—свойство

Диаграмма структурирования в системе: температура стеклования—температура—свойство, названная диаграммой T_gTP (*Glass transition temperature—Temperature—Property*), где Р обозначает данное свойство материала (например модуль убыtkов, плотность, скорость физического старения), показана на рис. 3.4. Эту диаграмму разработали Wang и Gillham [83, 84].

Диаграмма T_gTP создаёт общие рамки для трактовки и понимания зависимости между прогрессией реакции структурирования системы при разных температурах и его свойствами в отдельных состояниях — от жидкого состояния до постоянного стекловидного [83, 84]. Ось абсцисс диаграммы T_gTP отмеряет прогрессию реакции структурирования, выраженную измерением температуры

стеклования (T_g) эпоксидной системы, а ось ординат — температуру системы. Прямые линии на диаграмме представляют прогрессию конверсии (структурирования), относящуюся к величинам характерных температур системы, т. е. температуру стеклования (T_g), начала (iT_g) и конца (eT_g) стеклования, температуру β -перехода (T_β), а также температуру, при которой студенение и стеклование выступают одновременно ($gelT_g$).

Диаграмма разделена этими линиями на шесть частей, которые отражают разные состояния структурированного материала:

- стекловидное, полностью неотверждённое (*ungelled glass*);
- стекловидное, неполностью отверждённое I (*gelled glass I*);
- стекловидное, неполностью отверждённое II (*gelled glass II*);
- стекловидное (*glass transition*);
- жидкое (*sol fluid*);
- остудёньное, неполностью отверждённое (*sol-gel rubber*).

Целью составленной таким образом диаграммы является выяснение влияния конверсии системы (умеренной величины T_g) на изотермические свойства материала. Обозначенные на диаграмме районы показывают, что вместе с прогрессией конверсии наступают структурные изменения, а отдельные линии диаграммы позволяют указать максимум и минимум для выбранных свойств в зависимости от конверсии системы. Диаграмма T_g TP делает возможным определение изменений физических свойств материала в функции прогресса структурирования системы в зависимости от её температуры и T_g .

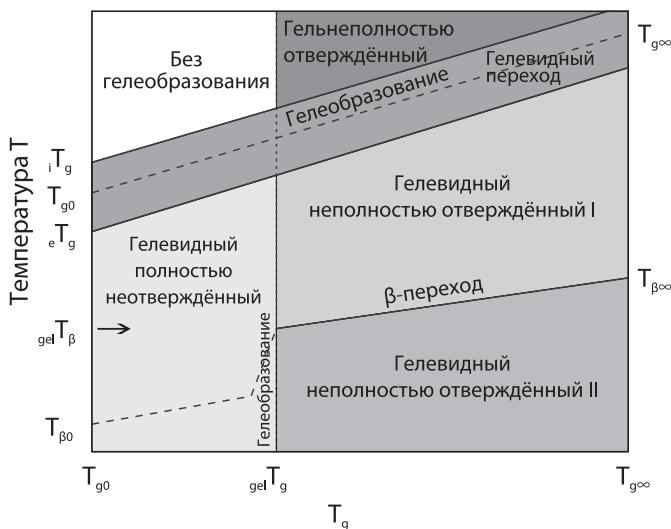


Рис. 3.4. Схематичный график структурирования T_g TP (температура гелеобразования — температура — свойство), показывающий разные морфологические состояния эпоксидных смол [83]

Диаграмма T_g TP играет такую же роль, как и диаграмма TTT (рис. 3.2), с той разницей, что она касается скорее свойств системы после структурирования, чем во время структурирования [51]. Оси ординат (температура измерения) на обеих диаграммах являются тождественными. Однако оси абсцисс представляют иные величины: на диаграмме T_g TP ею является температура стеклования, а на TTT — время реакции, что принципиально дифференцирует представление конверсии системы. На диаграмме TTT прогрессия конверсии показана кривыми изоконверсии; диаграмма T_g TP показывает конверсии прямо на оси абсцисс, а как её меру использует температуру стеклования материала (T_g). Измерение T_g является более точным, чем измерение степени конверсии, особенно при её высших величинах [85], благодаря чему измеренная величина T_g лучше отражает прогрессию реакции структурирования и является более чувствительным указателем изменений структуры сети. Температура стеклования имеет связь со структурой, а тем самым состоянием и свойствами материала. При этом следует обратить внимание на то, что физические свойства системы в стекловидном состоянии (например плотность, модуль, скорость физического старения) в функции прогрессии структурирования обусловлены преимущественно интервалом температуры $T_g - T$ [83], а их изменения вызваны переходом T_g и T_β , температуры которых возрастают вместе с ростом прогрессии структурирования эпоксидной системы.

3.3. Диаграммы структурирования TTT, CTT и T_g TP для пластмассы EPY

3.3.1. Способ выполнения диаграмм TTT, CTP и T_g TP

Выполнение диаграмм структурирования TTT, CTT и T_g TP только на основании экспериментальных исследований было бы необыкновенно трудоёмким и дорогостоящим. Поэтому при разработке этих диаграмм используются не только результаты непосредственных экспериментальных исследований, но и также эмпирические модели процесса структурирования, описывающие связи между T_g и а, температурой и временем структурирования исследуемой системы.

Эти модели позволяют путём численных расчётов соответственно преобразовать результаты проведенных опытных исследований и таким образом ограничить до необходимого минимума количество исследований, необходимых для составления диаграмм структурирования пластмассы EPY.

Экспериментальные исследования должны определять:

- характерные температуры стеклования (T_{g0} , $T_{g\infty}$) при помощи техники DSC динамическим методом;
- степень структурирования и температуру стеклования структурированной пластмассы при разных температурах и в разное время при помощи техники DSC, динамическим и изотермическим методами;

- пункт студенения пластмассы при помощи техники ротационной вискозиметрии динамическим методом;
- начальную температуру деградации (T_{di}) при помощи техники TG-DTA;
- модуль потерь [E''] при помощи техники DMTA.

Разработанные на основании результатов опытных испытаний эмпирические модели, выведенные при помощи уравнения DiBenedetto [81, 86], делают возможным:

- соотнесение роста температуры стеклования (T_g) и прогрессии степени структурирования (α);
- предсказание степени структурирования при студенении (α_{gel});
- предсказание степени структурирования в зависимости от времени и температуры.

Эти модели, соответственно ассоциированные, позволяют предсказывать результаты экспериментальных исследований и таким образом определить числовое отображение контуров и линий диаграмм структурирования TTT, CTT и T_g TP. Диаграммы структурирования, выполненные опытно-теоретическим путём, делают возможным получение полной информации, касающейся поведения исследуемой эпоксидной системы во время её отверждения без необходимости выполнения множества экспериментальных исследований. Способ выполнения этих диаграмм схематически представлен соответственно на рис. 3.5, 3.6 и 3.7.

3.3.2. Диаграмма структурирования TTT для пластмассы EPY

Сконструированная диаграмма изотермического структурирования TTT (время—температура—превращение) для пластмассы EPY представлена на рис. 3.8. Характерные температуры исследуемой системы, необходимые для обозначения контуров диаграммы, это температура стеклования неструктурированных реагентов $T_{g0} = -45,6^\circ\text{C}$ и температура стеклования полностью структурированной пластмассы $T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$. Они были определены опытным путём методом DSC. Зато температура, при которой студенение и стеклование выступают одновременно $_{gel}T_g = 12,5^\circ\text{C}$, была определена при помощи уравнения DiBenedetto [86] и величины степени структурирования при студенении $\alpha_{gel} = 0,58$, определённой опытным путём при помощи методов ARES и DSC.

Диаграмма TTT (рис. 3.8) выполнена путём расчёта времени для студенения и стеклования в разных температурах структурирования, принимая во внимание то, что кривая студенения и кривая стеклования пересекаются в точке времени, отвечающем величине $_{gel}T_g$. Для определения контура обеих кривых послужили результаты, полученные при помощи экспериментальных исследований и соответствующих расчётов [87, 88]. На диаграмме указаны также контуры изоконверсии, отвечающие величинам $\alpha = 0,58$ и $0,99$. Кривые изоконверсии обозначены при помощи численного интегрирования кинематической модели, учитывающей диффузию.

3. Теоретические и экспериментальные основы исследований и описание процесса отверждения эпоксидных систем

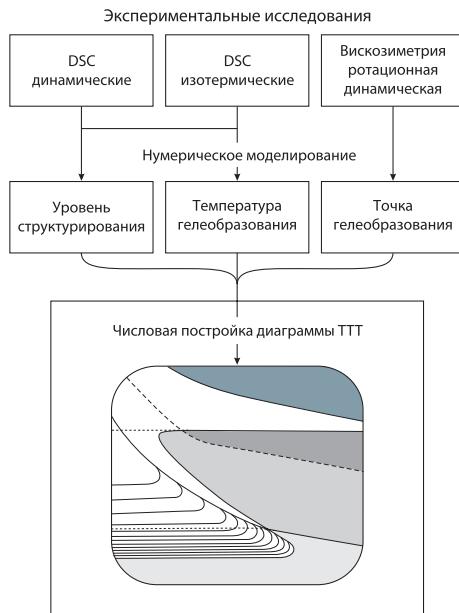


Рис. 3.5. Схема способа постройки диаграммы структурирования ТТТ

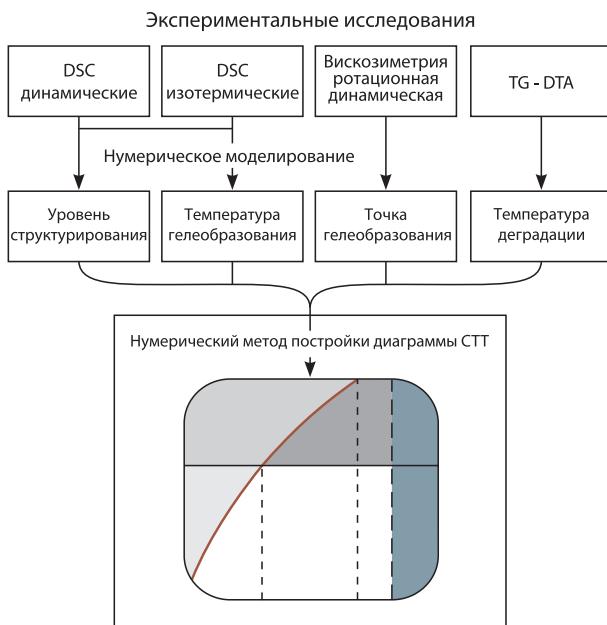


Рис. 3.6. Схема способа постройки диаграммы структурирования СТТ

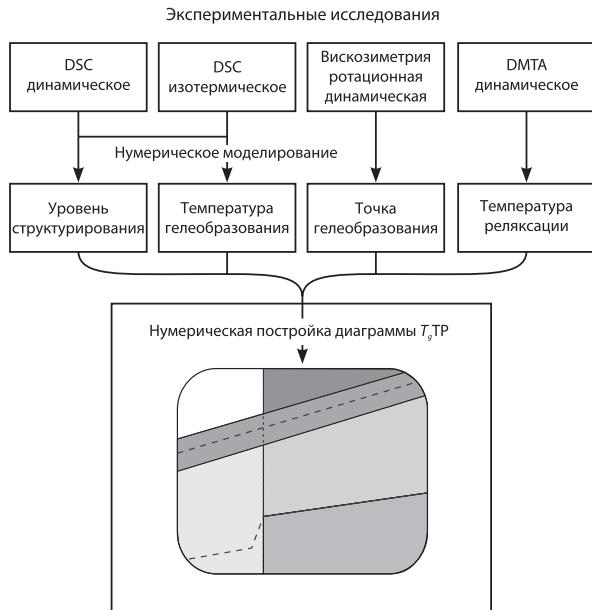
Диаграммы структурирования TTT, CTT и T_g TP для пластмассы ЕРУ

Рис. 3.7. Схема способа постройки диаграммы структурирования T_g TP

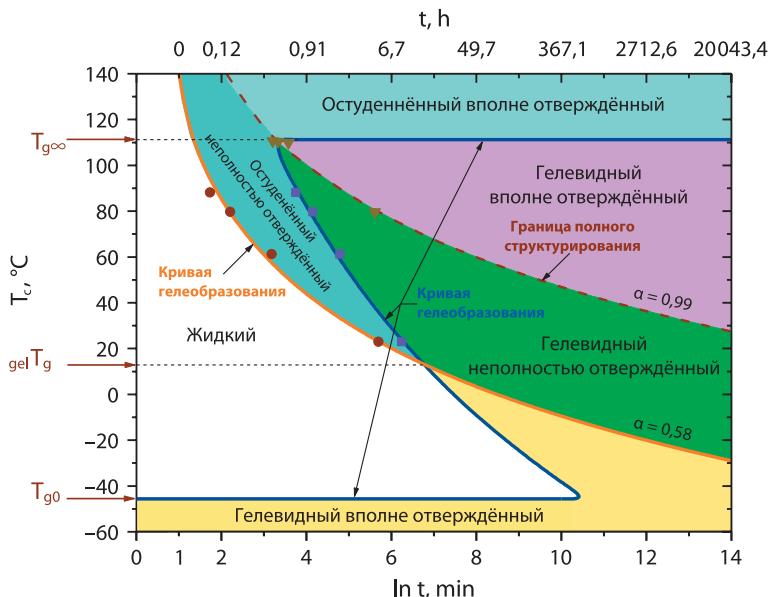


Рис. 3.8. Диаграмма структурирования ТТТ (время—температура—превращение), показывающая разные морфологические состояния пластмассы ЕРУ

Контур кривой стеклования пластмассы EPY, как множество геометрических мест времени структурирования, в которых $T_g = T_c$, обозначен изменением величины степени структурирования на величины T_g при помощи соответствующего уравнения, созданного на основании зависимости DiBenedetto [87, 88]. Контур кривой студенения покрывается с контуром идеального молекулярного студенения, которое по теории Flory проходит при конверсии 0,577 и точно отвечает величине $\alpha_{gel} = 0,58$, экспериментально определённой при помощи методов ARES и DSC [87, 88]. В экспериментально полученных пунктах студенения установлено, что независимо от температуры и скорости обогревания системы, конверсия является почти постоянной. Исходя из этого, можно принять, что контур студенения является изоконверсионным контуром. Определена хорошая совместимость экспериментальных величин с вычисленными по принятым моделям кривых студенения и стеклования.

В качестве линии полного структурирования была принята на диаграмме кривая изоконверсии, отвечающая величине степени структурирования $\alpha = 0,99$. Эта кривая соответствует максимальной конверсии, достигнутой в проведенных экспериментах.

Кривая стеклования на диаграмме TTT имеет форму обратного „Z“ (рис. 3.8), отсюда время стеклования достигает максимума при температуре структурирования немного выше T_{g0} , а минимума — немного ниже $T_{g\infty}$. Появление максимума времени для стеклования вызвано совместным появлением эффектов растущей реактивности и уменьшающейся вязкости вместе с повышением температуры, а появление минимума — эффектом растущего коэффициента скорости реакции и увеличивающегося числа прогрессий конверсии при стекловании вместе с повышающейся температурой [77, 89].

Обозначение контура и линии диаграммы TTT (рис. 3.8) показывают отдельные морфологические состояния, в которых в данных условиях структурирования может находиться исследуемая эпоксидная пластмасса EPY:

- жидкое состояние (*liquid*);
- стекловидное, полностью неотверждённое состояние (*sol glass*);
- остуденённое, неполностью отверждённое состояние (*sol/gel rubber*);
- остуденённое, полностью отверждённое состояние (*gel rubber*);
- стекловидное, неполностью отверждённое состояние (*sol/gel glass*);
- стекловидное, полностью отверждённое состояние (*gel glass*).

Согласно диаграмме TTT, когда эпоксидная система структурирует, её температура стеклования возрастает вместе с прогрессией конверсии. Когда T_g достигает величины температуры изотермического структурирования (T_c), тогда материал подвергается стеклованию. В соседстве стадии стеклования подвижность сегментов уменьшается и полная скорость реакции контролируется ограниченной диффузией реагирующих компонентов [90].

Температура $T_{g0} = -45,6^\circ\text{C}$ соответствует температуре стеклования пластмассы EPY со степенью конверсии $\alpha = 0$. Ниже этой температуры пластмасса становится стекловидным телом, растворимым в соответствующих растворителях.

При температуре ниже T_{g0} система не реагирует. Температура $_{\text{gel}}T_g = 12,5^\circ\text{C}$ является температурой, при которой система EPY студенеет и одновременно подвергается стеклованию.

Между T_{g0} и $_{\text{gel}}T_g$ ($-45,6^\circ\text{C} < T_c < 12,5^\circ\text{C}$) система будет реагировать до тех пор, пока её постоянно растущая температура стеклования сбрасывается с температурой структурирования ($T_g = T_c$).

В то время начнётся стадия стеклования без достижения студенения, а реакцию будет контролировать диффузия. При стекловании ниже $_{\text{gel}}T_g$ материал имеет малый молекулярный вес и проходит из жидкого состояния в стекловидное, полностью неотверждённое состояние, а при нагревании — плавит.

Между $_{\text{gel}}T_g$ и $T_{g\infty}$ ($12,5^\circ\text{C} < T_c < 111,2^\circ\text{C}$) реагирующая система EPY достигает пункта студенения перед стеклованием. После студенения структурированный материал содержит как фракции золя, так и геля. Первоначально сформированный гель является слабым и может легко разрываться.

Вне пункта студенения (конверсия в точке студенения $\alpha_{\text{gel}} = 0,58$) всё больше молекул присоединяется к пространственной сетке и фракция геля возрастает за счёт фракции золя, уменьшающейся до нуля, когда материал достигает мак-

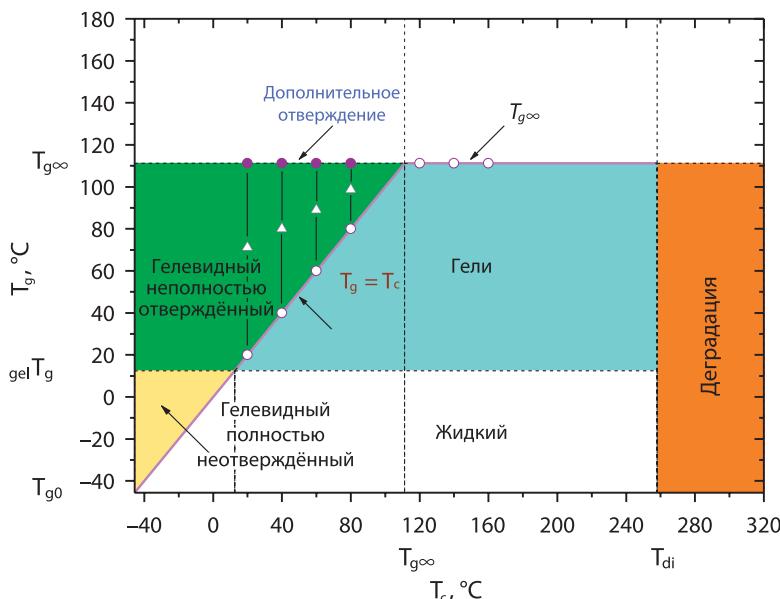


Рис. 3.9. Температура гелеобразования (T_g) в функции температуры изотермического структурирования (T_c) пластмассы EPY

 3. Теоретические и экспериментальные основы исследований и описание процесса отверждения эпоксидных систем

симальной величины прогрессии конверсии. При стекловании ($T_g = T_c$) реакция замедляется из-за недостаточной подвижности молекул, оставляя ещё значительное число непереработанных функциональных групп в системе. В результате система может достичь почти полного перереагирования ($\alpha = 1$) только после деструктурирования при температуре выше $T_{g\infty}$, что по отношению к исследуемой пластмассе показано на рис. 3.9.

Промежуток температур между T_g и $T_{g\infty}$, в котором материал проходит от жидкого состояния в состояние студенения, а затем в стекловидное, неполностью отверждённое, является практически наиболее достоверным для типичных процессов структурирования.

Если реакция структурирования проходит при температуре выше $T_{g\infty}$ (111,2°C), то материал подвергается остуденению, а стеклование вообще не наступает. Высокая температура структурирования может только привести к его химической деградации, а затем к термической, и к потере всех эксплуатационных качеств. Начальная температура термической деградации для пластмассы EPY равняется $T_{di} = 258^\circ\text{C}$. Она определена методом исследований TG-DTA [87, 88].

3.3.3. Диаграмма структурирования СТТ для пластмассы EPY

Диаграмма структурирования СТТ (конверсия—температура—преобразование), сконструированная для пластмассы EPY, представлена на рис. 3.10. Она показывает соотношение между прогрессией химической конверсии в исследуемой системе и ростом температуры стеклования и феноменологическими изменениями во время её структурирования.

Величины характерных температур пластмассы EPY, т. е.: $T_{g0} = -45,6^\circ\text{C}$, $T_g = 12,5^\circ\text{C}$ и $T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$ (см. пункт 3.3.2), были определены опытным путём или расчётным путём по принятой модели (уравнение DiBenedetto) [87, 88, 91]. Температура же начала деградации исследуемой пластмассы $T_{di} = 258^\circ\text{C}$ была определена опытным путём при помощи метода TG-DTA [87, 91].

Главный профиль на диаграмме СТТ, которым является кривая, обозначающая степень конверсии при стекловидном переходе в функции температуры (α vs. T_g), определён при помощи уравнения DiBenedetto [87, 91].

Подробная информация, касающаяся определения зависимости пункта студенения и степени структурирования по отношению к температуре при помощи исследований ARES и DSC, представлена в работах [87, 88, 91]. Из этих исследований следует, что приблизительно, почти независимо от скорости нагревания, студенение пластмассы EPY наступает при степени структурирования $\alpha_{gel} \approx 0,58$.

На диаграмме СТТ (рис. 3.10) линия конверсии пластмассы в точке студенения (α_{gel}) совместно с пересекающей её кривой конверсии стекловидного перехода в функции температуры (α vs. T_g) в точке (называемой точкой студенения) определяют четыре района, копирующие морфологические состояния исследуемой пастмассы:

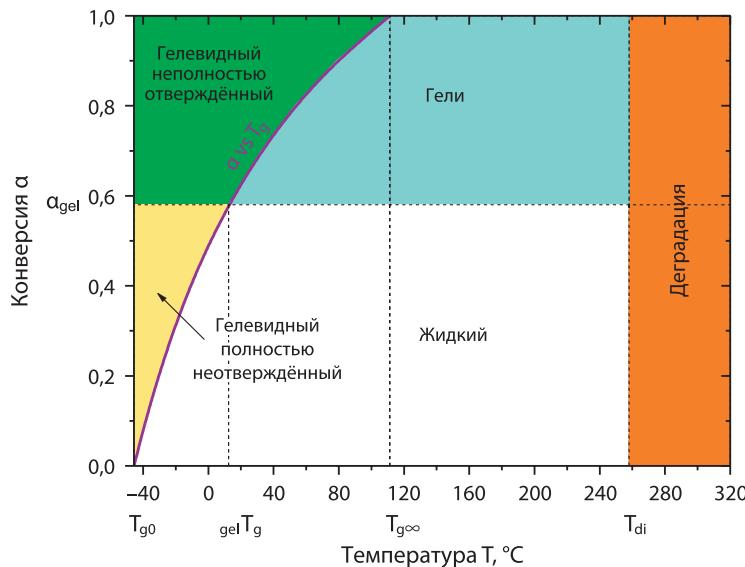


Рис. 3.10. Диаграмма структурирования СТТ (конверсия—температура—превращение), показывающая разные морфологические состояния пластмассы EPY

- жидкое состояние (*liquid*);
- стекловидное, полностью неотверждённое состояние (*ungelled glass*);
- стекловидное, неполностью отверждённое состояние (*gelled glass*);
- студенёное состояние (*rubber*).

Кроме того, обозначение на диаграмме линии температуры T_{di} позволяет скопировать ещё одно морфологическое состояние пластмассы – деградацию (*decomposition*).

Во время структурирования исследуемой системы её температура стеклования (T_g) растёт нелинейно, как показано на диаграмме (рис. 3.10), начиная от её начальной величины $T_{g0} = -45,6^\circ\text{C}$ (при степени конверсии $\alpha = 0$), сквозь величину, соответствующую студенению, т. е. $gelT_g = 12,5^\circ\text{C}$ ($\alpha = 0,58$), до своей самой большой величины $T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$ (при максимальной конверсии $\alpha = 1$) в результате растущей плотности структурирования. Описанная кривой стеклования зависимость между температурой стеклования и конверсии позволяет использовать величины T_g как непосредственную меру степени конверсии, которая на практике может быть детерминантой термомеханических свойств пластмассы [92, 93]. На диаграмме показано также, что от температуры $T_{di} = 258^\circ\text{C}$ наступает термическая деградация материала (потеря всех эксплуатационных свойств), к которой может привести структурирование при очень высокой температуре ($T_c \gg T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$).

Необходимо подчеркнуть, что диаграмму СТТ можно выполнить путём соответствующего преобразования диаграммы ТТТ (рис. 3.8), принимая во внимание то, что студенение данной композиции происходит при такой же химической конверсии, несмотря на температуру [53, 70]. Отсюда кривая студенения с диаграммы ТТТ представлена теперь как прямая конверсии геля (a_{gel}), а кривая стеклования с диаграммы ТТТ показана на диаграмме СТТ как кривая конверсии стекловидного перехода в функции температуры.

Выполненная диаграмма СТТ (рис. 3.10) даёт возможность ознакомления с ходом феноменологических изменений в эпоксидной пластмассе ЕРУ в функции прогрессии структурирования (конверсии) и роста температуры стеклования, благодаря чему может быть практическим элементом контроля и оценки качества процесса структурирования [94].

3.3.4. Диаграмма структурирования T_gTP для пластмассы ЕРУ

Диаграмма структурирования T_gTP (температура стеклования—температура—свойство) составлена для пластмассы ЕРУ и представлена на рис. 3.11, где Р обозначает выбранное свойство пластмассы — модуль потерь (E''). Осью абсцисс диаграммы является конверсия, которая измерена при помощи величины T_g , а осью ординат — температура измерения.

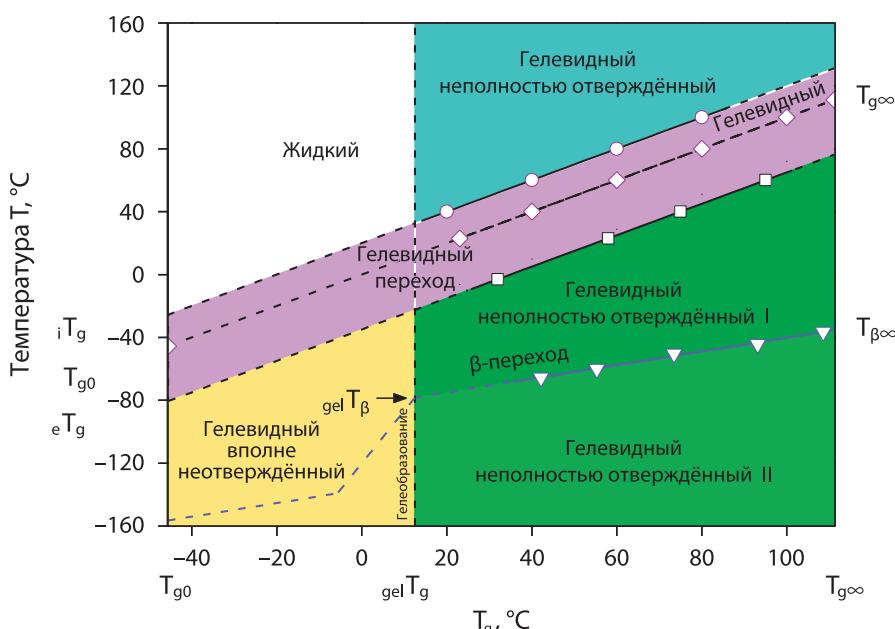


Рис. 3.11. Диаграмма структурирования T_gTP (температура гелеобразования—температура—свойство) пластмассы ЕРУ

Величины характерных температур пластмассы EPY, т. е. $T_{go} = -45,6^\circ\text{C}$, $T_{gel} = 12,5^\circ\text{C}$ и $T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$ (см. пункт 3.3.2), были обозначены опытным путём или расчётным путём согласно модели (уравнение DiBenedetto) [87, 88, 95].

Главные линии диаграммы T_g TP являются прямыми линиями (рис. 3.11) и показывают изменения студенения и стеклования, определяющие свойства материала. Студенение обозначено вертикальной прерывистой линией, отделяющей районы появления фракции золя и золя-геля в $T_{gel} = 12,5^\circ\text{C}$. Стеклование же представлено на диаграмме T_g TP наклонной линией, отвечающей $T_g = T$.

На диаграмме обозначена также линия начала ($iT_g \approx T_g - 20^\circ\text{C}$) и конца ($eT_g \approx T_g + 35^\circ\text{C}$) стекловидного перехода (стеклования). Показан также процесс вариантности температуры β -реляксации (T_β), которую показывает ломанная линия в диапазоне низких и наклонная — в диапазоне высоких конверсий. Температура β -реляксации (T_β) связана с местными движениями субсегментов при β -переходе ниже T_g . Способ определения T_β методом DMTA находится в работах [87, 95].

Диаграмма T_g TP (рис. 3.11) разделена вышеназванными линиями на отдельные районы прогрессии структурирования эпоксидного материала при избранной температуре структурирования. В каждом из этих районов материал характеризуется разными физическими свойствами. Рассматривая свойства исследуемой пластмассы при разных температурах структурирования в аспекте изменения величины её модуля потерь (E''), можно выделить следующие районы диаграммы:

- стекловидное, полностью неотверждённое состояние (*ungelled glass*) — $T < eT_g$ и $-45,6^\circ\text{C} < T_g < 12,5^\circ\text{C}$; модуль потерь (E'') растёт линейно и интенсивно вместе с ростом прогрессии структурирования;
- стекловидное, неполностью отверждённое состояние I (*gelled glass I*) — $T_\beta < T < eT_g$ и $12,5^\circ\text{C} < T_g < 111,2^\circ\text{C}$; модуль E'' материала уменьшается вместе с ростом прогрессии структурирования;
- стекловидное, неполностью отверждённое состояние II (*gelled glass II*) — $T < T_\beta$ и $12,5^\circ\text{C} < T_g < 111,2^\circ\text{C}$; модуль E'' материала растёт вместе с ростом прогрессии структурирования, соответственно как при стекловидном, полностью неотверждённом состоянии (*ungelleg glass*);
- состояние стекловидного перехода (*glass transition*) — $eT_g < T < iT_g$ и $-45,6^\circ\text{C} < T_g < 111,2^\circ\text{C}$; модуль E'' материала интенсивно растёт вместе с ростом прогрессии структурирования из-за стеклования, достигая максимума при температуре eT_g , а район стекловидного перехода показывает три линии на диаграмме T_g TP: т. е. Начало стеклования ($iT_g \approx T_g - 20^\circ\text{C}$), стеклование ($T_g = T_c$) и конец стеклования ($eT_g \approx T_g + 35^\circ\text{C}$);
- жидкое состояние (*sol fluid*) — $T > T_g$ и $-45,6^\circ\text{C} < T_g < 12,5^\circ\text{C}$; жидкий, вязкий материал с низким модулем, модуль E'' показывает небольшой прирост вблизи пункта студенения [51, 83];

3. Теоретические и экспериментальные основы исследований и описание процесса отверждения эпоксидных систем

— остуденённое, неполностью отверждённое состояние (*sol-gel rubber*) — $T > T_g$ и $12,5^\circ\text{C} < T_g < 111,2^\circ\text{C}$; модуль E'' растёт вместе с ростом прогрессии структурирования.

Пригодность диаграммы $T_g\text{TP}$ основывается на том, что она использует величину T_g как меру прогрессии конверсии, причиняясь к тому, что критические пункты, такие, как максимум и минимум модуля, укладываются линейно и приблизительно параллельно к линиям стеклования (T_g). Это обозначает, что свойства химически отверждённых пластмасс в стекловидном состоянии детерминирует главным образом интервал температур $T_g - T$ материала. Линеаризация зависимости между критическими пунктами и температурой на диаграмме $T_g\text{TP}$ облегчает её конструирование для разных химически отверждённых систем [83].

3.4. Резюме

Диаграммы структурирования ТТТ (время – температура – превращение) и СТТ (конверсия—температура—превращение), а также дополняющая их диаграмма $T_g\text{TP}$ (температура стеклования—температура—свойство), сконструированные для пластмассы ЕРУ, могут быть полезным инструментом для анализа и проектирования циклов её структурирования.

На этих диаграммах показаны все феноменологические изменения, появляющиеся во время сложного процесса структурирования. В особенности это относится к студенению и стеклованию, которые являются результатом химической реакции, превращающей вязкую жидкость в твёрдое тело. По мере прогрессии химической реакции (конверсии) наступают изменения модуля потерь пластмассы, которые показывают какое существенное влияние оказывают происходящие структуральные изменения (студенение и стеклование) на физические свойства структурированного материала.

При помощи диаграмм структурирования становится возможным получение важных данных, касающихся переработки композиции ЕРУ. Таким образом, на основании линии студенения диаграммы ТТТ (рис. 3.8), зависимой от температуры, можно обозначить диапазон времени, в котором композиция находится в жидкком состоянии и ещё является пригодной для переработки. Кроме линии студенения — в зависимости от температуры структурирования — можно определить пункт времени до момента затвердевания смоляной системы. Из диаграммы СТТ (рис. 3.10) можно получить информацию о степени структурирования системы, что позволяет определить финальные механические и термические свойства пластмассы.

Изменения свойств, происходящие во время структурирования, показаны на диаграмме $T_g\text{TP}$ (рис. 3.11), на которой прямые линии представляют процесс структурных изменений материала: стекловидного прихода (T_g), β -перехода (T_β) и студенения ($_{\text{gel}}T_g$). Эти линии обозначают районы, в которых материал по мере

прогрессии конверсии (как перед, так и после студенения) проявляет разные физические свойства.

Все эти диаграммы структурирования пластмассы EPY делают возможным более полное понимание зависимости между реагентами, сценарием структурирования, превращениями и состояниями, а также свойствами материала. Они позволяют определить оптимальный сценарий времени — температура структурирования так, чтобы студенение и стеклование проходили контролированным способом и чтобы результатом было гарантировано наилучшее из требуемых эксплуатационных свойств для данного применения пластмассы.

4

Проектирование процесса монтажа машин на подкладках, изготовленных из пластмассы ЕРУ

4.1. Документация монтажа машин и устройств

Процесс монтажа судовых машин и устройств на фундаментах, выполненных из пластмассы ЕРУ, подлежит рассмотрению классификационным обществом, которое ведёт надзор за постройкой или ремонтом судна, на котором такой процесс будет выполняться.

Например, Germanischer Lloyd [96, 97] требует представления основных данных судна, включая информацию о его классе (если работа будет выполняться на судне во время его ремонта), а также о верфи, на которой работа будет выполняться. Кроме того, необходимо представить техническую документацию в следующем объёме:

1. Чертежи, показывающие процесс монтажа (рис. 4.1а), которые должны содержать следующую информацию:
 - количество, размеры и размещение всех подкладок;
 - количество и размеры всех продольных и поперечных ограничителей пространств, заполняемых пластмассой, и их расположение;
 - количество, размеры и размещение всех фундаментных болтов (обычных и призонных) и втулок (если таковые требуются);
 - название используемой для выполнения подкладок пластмассы, материал фундаментных болтов, гаек, втулок и материал ограничителей.
2. Чертежи разрезов фундаментных болтовых соединений (рис. 4.1б).
3. Информация, касающаяся следующих величин:
 - опорной поверхности подкладок;
 - нагрузок на подкладки от массы машины и затяжки фундаментных болтов;
 - осевой силы и напряжения в фундаментных болтах, а также величины их удлинения во время затяжки;
 - момента, необходимого для затягивания гаек фундаментных болтов или давления в гидравлическом затягивающем устройстве.

4.2. Общая информация, касающаяся проектирования процесса монтажа машин и устройств

Высота фундаментных подкладок:

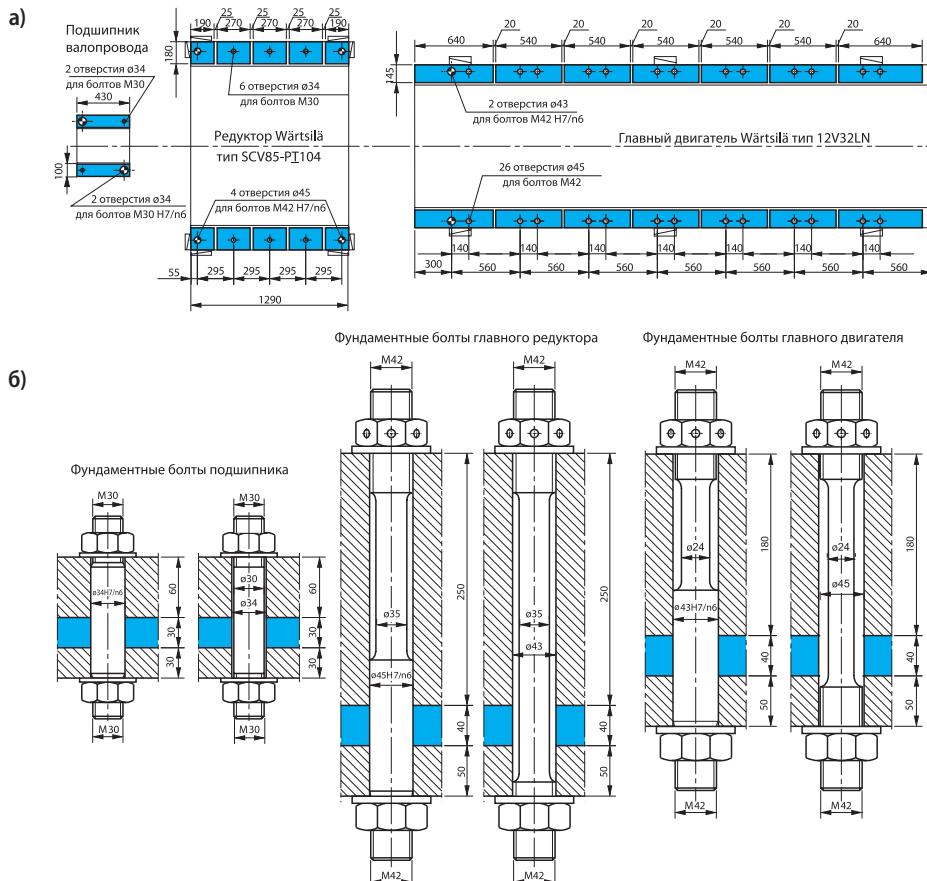


Рис. 4.1. План расположения фундаментных подкладок из пластмассы EPY (а), а также сечения фундаментных болтовых соединений подшипника валопровода, главного редуктора и главного двигателя (б)

- минимальная – 10 мм;
- рекомендованная – 20—35 мм;
- максимальная – 50 мм (в одном слое).

Применение более тонких или более толстых подкладок от вышеуказанных необходимо согласовать с фирмой MSJ.

Литейные формы делаются из вспененных пластмасс (полипропилен, полиуретан, микрорезина, стиропор или пенополистирол), а также из листовой стали толщиной 1—2 мм.

Толщина надлива для литья фундаментной подкладки из пластмассы должна равняться 15—30 мм, а высота стенки формы должна обеспечивать надлив высотой 15—30 мм.

Масса пластмассы, необходимая для отливки подкладок, определяется по следующей формуле:

$$m_t = \alpha \rho_t A_e H \quad (4.1)$$

где:

- m_t — масса пластмассы, кг;
- α — коэффициент, учитывающий объём надлива, литника и потери, равный 1,05—1,20;
- ρ_t — плотность пластмассы EPY равна $1,59 \times 10^{-6}$ кг/мм³;
- A_e — эффективная (полная) опорная поверхность подкладок, мм²;
- H — номинальная высота подкладок, мм.

4.3. Проектные расчёты в процессе монтажа машин и устройств на подкладках из пластмассы EPY

4.3.1. Общие замечания

В проектных расчётах монтажа приняты следующие обозначения и их названия (по GL [97]), приведенные в таблице 4.1.

4.3.2. Определение величины минимальной поверхности подкладок

$$A_m = \frac{W}{p_w} \quad (4.2)$$

где:

- W — масса объекта, Н;
- p_w — поверхностная нагрузка на подкладки, вызванная массой объекта, Н/мм².

Ограничения:

- $p_w \leq 0,7 \text{ Н/мм}^2$;
- $A_m \leq A_e$

где:

- A_e — несущая поверхность подкладок.

4.3.3. Определение величины осевой силы в обжатом фундаментном болте

$$F_p = \frac{(p_t - p_w) A_e}{n} \quad (4.3)$$

где:

- p_t — суммарная нагрузка на подкладки, вызванная массой объекта и осевыми силами обжатых фундаментных болтов, Н/мм²;
- n — количество фундаментных болтов.

Ограничения:

- $p_t \leq p_a$;
- $F_p > F_0$

Таблица 4.1. Обозначения, единицы измерения и названия величин, применяемых для описания монтажа машин на ундронте

Обозначение величины	Единица измерения	Наименование величины
A_e	мм^2	эффективная (полная) несущая поверхность подкладки
A_m	мм^2	минимальная требуемая несущая поверхность подкладки
A_p	мм^2	эффективная поверхность поршня гидравлического устройства для натяжки болтов
D_m	мм	минимальный диаметр стержня фундаментного болта
D_o	мм	внешний диаметр резьбы фундаментного болта
D_r	мм	диаметр сердцевины резьбового стержня фундаментного болта
D_s	мм	диаметр стержня фундаментного болта
D_{s1} — D_{si}	мм	отдельные диаметры стержней фундаментных болтов, соответствующие длинам L_1 — L_i
F_o	Н	осевая сила в болте от внешней нагрузки
F_p	Н	осевая сила в натянутом фундаментном болте
k	—	гидравлический коэффициент, учитывающий оседание и упругий возврат
ΔL	мм	теоретическое удлинение болта
ΔL_m	мм	требуемое теоретическое удлинение болта
L_1 — L_i	мм	длины отдельных частей стержня фундаментного болта, отвечающие диаметрам D_{s1} — D_{si}
n	—	количество фундаментных болтов
p_a	$\text{Н}/\text{мм}^2$	допускаемое поверхностное давление применяемой пластмассы
p_n	бар	гидравлическое давление в устройстве для натяжки болтов
p_t	$\text{Н}/\text{мм}^2$	суммарная поверхностная нагрузка на подкладки от массы объекта и начальной натяжки болтов
p_w	$\text{Н}/\text{мм}^2$	поверхностная нагрузка на подкладку от массы объекта
P	мм	шаг винта фундаментного болта
R_{eH}	$\text{Н}/\text{мм}^2$	минимальный предел текучести материала болта
T	Нм	величина момента финальной затяжки фундаментного болта
W	Н	масса объекта
σ_e	$\text{Н}/\text{мм}^2$	приведенное напряжение (учитывающее растяжение и скручивание)
σ_t	$\text{Н}/\text{мм}^2$	растягивающее напряжение

где:

- F_o — осевая сила в болте, вызванная внешней нагрузкой, Н;
- p_a — допустимая нагрузка на пластмассу, $\text{Н}/\text{мм}^2$;
- $p_a = 5 \text{ МПа}$ — при температуре $T \leq 80^\circ\text{C}$ — в случае монтажа главных двигателей, редукторов и т. п. (по PRS, GL, LRS, RMRS, BV, DNV, по ABS с 21.06.2002 г., $P_a = 15 \text{ Н}/\text{мм}^2$);
- $p_a = 15 \text{ МПа}$ — при монтаже механизмов, для которых не требуется соосность (по PRS);
- $p_a = 30 \text{ МПа}$ — при монтаже швартовых и якорных лебёдок (брашпилей) с учётом тяговых усилий;
- $p_a < 60 \text{ МПа}$ — при кратковременных нагрузках (по PRS).

4.3.4. Расчёт величины момента затяжки гаек фундаментных болтов

$$T = \frac{F_p D_o}{5000} \quad (4.4)$$

где:

- T — момент затяжки гайки, Нм;
- D_o — наружный диаметр резьбы фундаментного болта, мм;
- F_p — предварительная затяжка фундаментного болта, Н.

Ограничивающее условие: расчёты относятся к случаю, когда стальные фундаментные болты имеют нормальную резьбу, а для смазки резьбы и поверхностей трения применяется обыкновенное масло без специальных примесей, таких как, например M_0S_2 .

4.3.5. Расчёт величины давления в гидравлическом устройстве для затяжки фундаментных болтов

$$p_h = 10 \frac{F_p}{A_p k} \quad (4.5)$$

где:

- F_p — осевая сила в обжатом фундаментном болте, Н;
- A_p — эффективная поверхность площади поршня гидравлического устройства для затяжки болтов, мм^2 ;
- k — гидравлический коэффициент, учитывающий усадку.

Ограничивающее условие:

$k = 0,85$, а в случае применения другой величины этого коэффициента, необходимо представить классификационному обществу результаты измерений реальной величины осевой силы, действующей в затянутом фундаментном болте.

4.3.6. Определение величины удлинения болтов, вызванного монтажным натяжением

$$\Delta L = F_p \left(\frac{L_1}{D_{s1}^2} + \frac{L_2}{D_{s2}^2} + \dots + \frac{L_i}{D_{si}^2} \right) 618 \cdot 10^{-8} \quad (4.6)$$

где:

- F_p — монтажная (предварительная) натяжка фундаментного болта, Н;
- L_1, \dots, L_i — длина отдельных частей стержня фундаментного болта, соответствующая его диаметрам D_{s1}, \dots, D_{si} , мм;
- D_{s1}, \dots, D_{si} — диаметры стержня фундаментного болта, соответствующие длине L_1, \dots, L_i , мм.

Ограничивающие условия:

- $\Delta L \geq L_m = 0,0343 p_t$, мм;
- $\Delta L = 0,12$ для $p_t < 3,5 \text{ Н/мм}^2$.

4.3.7. Определение величины напряжения, растягивающего или сокращающего, отнесённого к наименьшему диаметру фундаментного болта, с учётом монтажного натяжения

1. Болты, обтягиваемые ключом:

а) болты со стержнем с постоянным диаметром ($D_m = D_r$):

$$\sigma_e = 1,5 \frac{F_p}{D_r^2} \quad (4.7)$$

где:

F_p — минимальное натяжение болта, Н;

D_m — минимальный диаметр стержня фундаментного болта, мм;

D_r — диаметр резьбового стержня фундаментного болта, мм.

б) болты со стержнем с дифференцированным диаметром ($0,8 D_r \leq D_m < 1,0 D_r$):

$$\sigma_e = 1,72 \frac{F_p}{D_m^2} \sqrt{0,6 + \frac{D_r}{D_m^2} (P + 0,2D_r)} \quad (4.8)$$

где:

P — шаг резьбы фундаментного болта, мм.

Ограничивающее условие: $b \geq 0,9 R_{eH}$ (где R_{eH} — минимальный предел пластичности материала болта, Н/мм²).

2. Болты, обтягиваемые гидравлическим путём:

$$\sigma_t = 1,274 \frac{F_p}{D_m^2} \quad (4.9)$$

Ограничивающее условие: $b_e \leq 0,8 R_{eH}$ для $k = 0,85$.

4.3.8. Расчёты величины растягивающих напряжений, относящихся к диаметру резьбы фундаментного болта, с учётом монтажного напряжения

$$\sigma_t = 1,274 \frac{F_p}{D_r^2} \quad (4.10)$$

Чтобы гайка самостоятельно не откручивалась, должно быть выполнено условие $b_t < 150$ Н/мм² (где: b_t — растягивающее напряжение в фундаментном болте). Для тихоходных двигателей принимают $b_t < 100$ Н/мм².

4.4. Примеры проектных расчётов процесса монтажа машин и устройств на подкладках ЕРУ

Ниже представлены данные двигателя MaK 6MU453C и редуктора Flender G1VY, и результаты проектных расчётов их монтажа на подкладках, изготовленных из пласти массы ЕРУ.

Таблица 4.2. Пример результатов проектных расчётов, необходимых для монтажа главного двигателя на фундаментных подкладках из пластмассы EPY (рис. 4.2а, б)

MARINE SERVICE JAROSZEWICZ
ul. Bielańska 23, 70-703 Szczecin
tel. 48 91 4606624, fax 48 91 4313075

Szczecin, 14.04.2001 г.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТНЫХ РАСЧЁТОВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ МОНТАЖА ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ
НА ФУНДАМЕНТНЫХ ПОДКЛАДКАХ ИЗ ПЛАСТМАССЫ EPY**
Calculation of chocking of main engine on EPY resin

Название судна / Name of the vessel	m/v „Tejo Chemist”; GL-ID nr 33688			
Тип главного двигателя / Engine, type	MaK 6MU453C			
Классификационное общество / Classification society	Germanischer Lloyd; сертификат № 17395-00HH			
Верфь / Shipyard	Gdańska Stocznia Remontowa S. A. (Польша)			

Спецификация Description	Символ Symbol	Величина Value	Единица измерения Unit	Замечания Remarks
Масса объекта Engineweight	W	206010	Н	
Эффективная несущая поверхность подкладок Effective total surface of cast resin chocks	A _e	471617	мм ²	рис. 1/2/P-08
Поверхностная нагрузка от массы объекта Total surface pressure from engine weight	p _w	0,44	Н/мм ²	p _w < 0,7 Н/мм ²
Диаметр резьбы обыкновенного фундаментного болта Outer diameter of thread of holding down bolt	D _{ohd}	24	мм	M24×2
Шаг резьбы обыкновенного фундаментного болта Pitch of holding down bolt thread	P _{hd}	2	мм	—
Количество обыкновенных фундаментных болтов Number of holding down bolts	n _{hd}	24	шт. pcs	M24×2
Диаметр резьбы призонного фундаментного болта Outer diameter of thread of fitted bolt	D _{of}	24	мм	—
Шаг резьбы призонного фундаментного болта Pitch of fitted bolt thread	p _f	2	мм	—
Количество призонных фундаментных болтов Number of fitted bolts	n _f	4	шт. pcs	—
Количество отливаемых фундаментных подкладок Number of cast resin chocks	n _{ch}	14	шт. pcs	—
Суммарная поверхностная нагрузка на подкладки Total surface pressure on the chocks	p _t	4,52	Н/мм ²	p _a = 5 Н/мм ²
Поверхностная нагрузка на подкладки от затяжки болтов Total surface pressure from bolts tension	p _{t-w}	4,08	Н/мм ²	p _{t-w} = p _t - p _w
Осьевая сила в затянутом фундаментном болте Preloading bolt force exerted by tightening	F _p	68775	Н	F _p = (p _t - p _w) A _e / (n _{hd} + n _f)

**Расчёты обыкновенных фундаментных болтов
Calculation of holding down bolt**

Диаметр сердцевины обыкновенного фундаментного болта Thread root diameter of holding down bolt	D _r	21,55	мм	рис. 2/2/P-08
---	----------------	-------	----	---------------

Примеры проектных расчётов процесса монтажа машин и устройств на подкладках EPY

Спецификация Description	Символ Symbol	Величина Value	Единица измерения Unit	Замечания Remarks
Диаметр стержня фундаментного болта Shank diameter of holding down bolt	D _{s1}	17,00	мм	—
Растягиваемая длина резьбы фундаментного болта Stretched thread lenght of holding down bolt	L _r	25,00	мм	—
Длина стержня фундаментного болта Shank length of holding down bolt	L ₁	180,00	мм	—
Приведенное напряжение в болте Holding down bolt equivalent tensile stress	σ _e	423	МПа	болты класса 8.8 $R_{eH} = 640 \text{ Н/мм}^2$
Минимальное требуемое удлинение болтов Req. min. theoretical elongation of bolts	ΔL _m	0,155	мм	ΔL _m = 0,0343 p _t
Теоретическое удлинение фундаментного болта Theoretical elongation of holding down bolt	ΔL	0,288	мм	ΔL > ΔL _m
Момент затяжки болта Tightening torque of holding down bolt	T _{hd}	330	Нм	$T = F_p D_{ohd} / 5000$

Расчёты призонных болтов в пластмассе EPY

Calculation of fitted bolts of cast-in-EPY resin

Диаметр сердцевины призонного фундаментного болта Thread root diameter of fitted bolt	D _r	21,55	мм	рис. 2/2/P-08
Диаметр стержня призонного болта Shank diameter of fitted bolt	D _{s1}	17,00	мм	—
Диаметр стержня призонного болта Shank diameter of fitted bolt	D _{s2}	24,00	мм	—
Диаметр стержня призонного болта Shank diameter of fitted bolt	D _{s3}	20,00	мм	—
Растягиваемая длина резьбы призонного болта Stretched thread length of fitted bolt	L _r	24,00	мм	—
Длина стержня призонного болта Shank length of fitted bolt	L ₁	120,00	мм	—
Длина стержня призонного болта Shank length of fitted bolt	L ₂	145,00	мм	—
Длина стержня призонного болта Shank length of fitted bolt	L ₃	10,00	мм	—
Приведенное напряжение в призонном болте Fitted bolt equivalent tensile stress	σ _e	423	МПа	болты класса 8.8 $R_{eH} = 640 \text{ Н/мм}^2$
Напряжение в сердцевине резьбы призонного болта Tensile stress related to thread root diameter	σ _t	189	МПа	—
Теоретическое удлинение призонного болта Theoretical elongation of fitted bolt	ΔL	0,316	мм	ΔL > ΔL _m
Момент затяжки призонного болта Tightening torque of fitted bolt	T _f	330	Нм	$T = F_p D_{of} / 5000$
Проектировал		14.04.2001	D.J. Ratajczak	
Проверил		14.04.2001	W. Jaroszewicz	
Монтаж ГД MaK 6MU453AK на подкладках из пластмассы EPY				

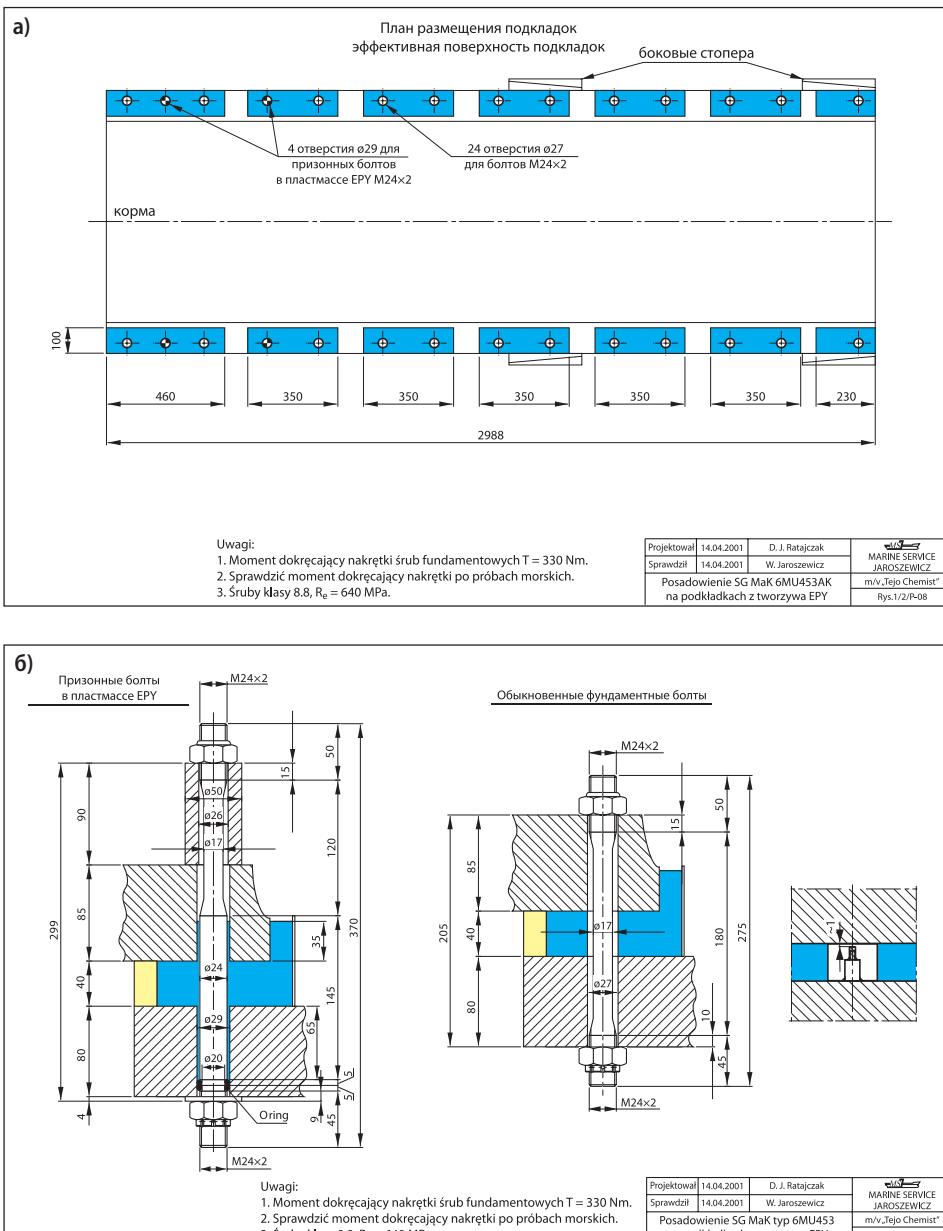


Рис. 4.2. План расположения фундаментных подкладок из пластмассы EPY (а), а также сечения фундаментных болтовых соединений (б) главного двигателя MaK тип 6MU453

Таблица 4.3. Пример результатов проектных расчётов монтажа редуктора на фундаментных подкладках из пластмассы EPY (рис. 4.3а, б)

MARINE SERVICE JAROSZEWCZ
ul. Bielańska 23, 70-703 Szczecin
tel. 48 91 4606624, fax 48 91 4313075

Szczecin, 14.04.2001 г.

РАСЧЁТЫ МОНТАЖА РЕДУКТОРА НА ФУНДАМЕНТНЫХ ПОДКЛАДКАХ ИЗ ПЛАСТМАССЫ ЕРЫ
Calculation of chocking of main gear on EPY resin

Название судна / Name of the vessel	m/v „Tejo Chemist”; GL-ID nr 33688			
Машина, тип / Engine, type	Редуктор Flander G1VY			
Классификационное общество / Classification society	Germanischer Lloyd; сертификат № 17395-00HH			
Верфь / Shipyard	Gdańska Stocznia Remontowa S. A. (Польша)			

Спецификация Description	Символ Symbol	Величина Value	Единица измерения Unit	Замечания Remarks
Масса объекта Engineweight	W	120663	Н	—
Эффективная несущая поверхность подкладок Effective total surface of cast resin chocks	A _e	301268	мм ²	рис. 1/2/P-08
Поверхностная нагрузка от массы объекта Total surface pressure from engine weight	p _w	0,40	Н/мм ²	p _w < 0,7 Н/мм ²
Диаметр резьбы обыкновенного фундаментного болта Outer diameter of thread of holding down bolt	D _{ohd}	36	мм	M36×4
Шаг резьбы обыкновенного фундаментного болта Pitch of holding down bolt thread	P _{hd}	4	мм	—
Количество обыкновенных фундаментных болтов Number of holding down bolts	n _{hd}	8	шт. pcs	—
Диаметр резьбы призонного фундаментного болта Outer diameter of thread of fitted bolt	D _{of}	36	мм	M36×4
Шаг резьбы призонного фундаментного болта Pitch of fitted bolt thread	P _f	4	мм	—
Количество призонных фундаментных болтов Number of fitted bolts	n _f	4	шт. pcs	—
Количество отливаемых фундаментных подкладок Number of cast resin chocks	n _{ch}	8	шт. pcs	—
Суммарная поверхностная нагрузка на подкладки Total surface pressure on the chocks	p _t	4,99	Н/мм ²	p _a = 5 Н/мм ²
Поверхностная нагрузка на подкладки от затяжки болтов Total surface pressure from bolts tension	p _{t-w}	4,59	Н/мм ²	p _{t-w} = p _t - p _w
Осьевая сила в затянутом фундаментном болте Preloading bolt force exerted by tightening	F _p	115222	Н	F _p = (p _t - p _w)A _e / (n _{hd} + n _f)

Расчёты обыкновенных фундаментных болтов
Calculation of holding down bolts

Диаметр серцевины обыкновенного фундаментного болта Thread root diameter of holding down bolt	D _r	31,09	мм	рис. 2/2/P-08
Диаметр стержня фундаментного болта Shank diameter of holding down bolt	D _{s1}	25,00	мм	—

4. Проектирование процесса монтажа машин на подкладках, изготовленных из пластмассы EPY

Спецификация Description	Символ Symbol	Величина Value	Единица измерения Unit	Замечания Remarks
Растягиваемая длина резьбы фундаментного болта Stretched thread lenght of holding down bolt	L_r	25,00	мм	—
Длина стержня фундаментного болта Shank length of holding down bolt	L_1	135,00	мм	—
Приведенное напряжение в болте Holding down bolt equivalent tensile stress	σ_e	334	МПа	болты класса 6.8 $R_{eH} = 480 \text{ Н/мм}^2$
Минимальное требуемое удлинение болтов Req. min. theoretical elongation of bolts	ΔL_m	0,171	мм	$\Delta L_m = 0,0343 p_t$
Теоретическое удлинение фундаментного болта Theoretical elongation of holding down bolt	ΔL	0,172	мм	$\Delta L > \Delta L_m$
Момент натяжки болта Tightening torque of holding down bolt	T_{hd}	830	Нм	$T = F_p D_{ohd}/5000$
Проектировал			14.04.2001	D.J. Ratajczak
Проверил			14.04.2001	W. Jaroszewicz
Монтаж редуктора Flander G1VY на подкладках из пластмассы EPY				

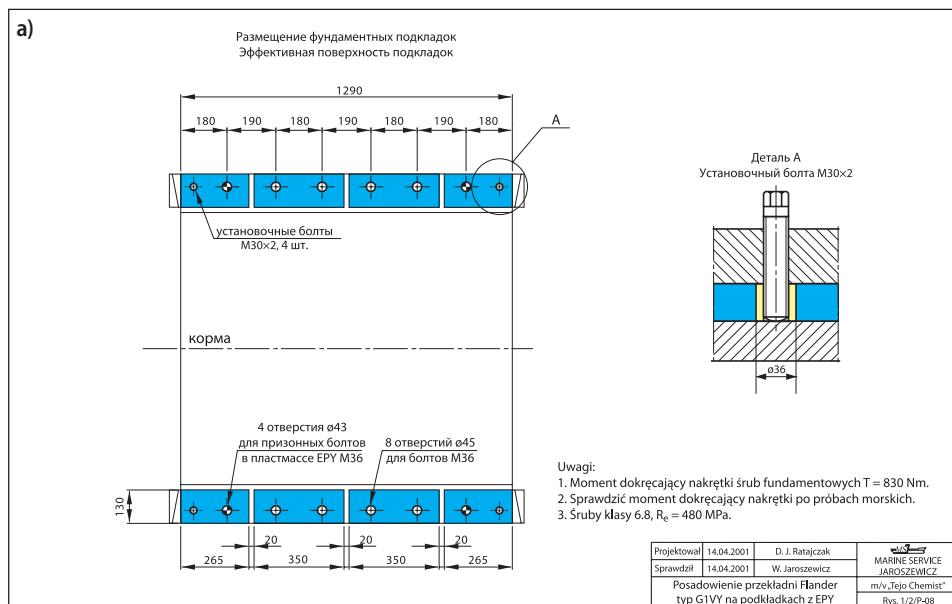


Рис. 4.3а. План размещения фундаментных подкладок из пластмассы EPY редуктора Flander типа G1VY

Примеры проектных расчётов процесса монтажа машин и устройств на подкладках ЕРУ

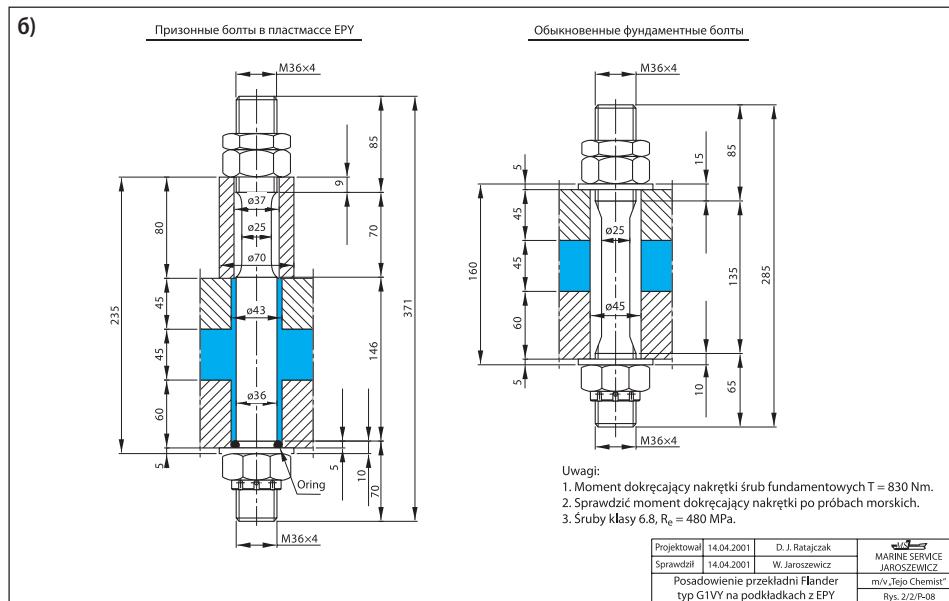


Рис. 4.36. Сечения фундаментных болтовых соединений редуктора Flender типа G1VY

Проектные данные и результаты расчётов, а также необходимые чертежи представлены в такой форме, в которой они переданы классификационному обществу для их рассмотрения и утверждения.

5

Монтаж судовых машин и устройств с применением пластмассы EPY

5.1. Методы монтажа судовых машин и устройств на подкладках, литых из пластмассы EPY

Способ монтажа судовых машин и устройств на фундаментах с применением подкладок, литых из пластмассы EPY, будет представлен на примере монтажа главного двигателя судна. В случае такого объекта требования к способу выполнения связанных с этим работ являются особенно ответственным процессом, который должен быть точно определён процедурами верфи, строящей судно, а также фирмы MSJ, выполняющей все работы, связанные с его реализацией [98].

Основой для начала реализации соответствующих работ является техническая документация, которая должна быть согласована с производителем двигателя, с судовладельцем и верфью и утверждена классификационным обществом, которое ведёт надзор за постройкой судна.

Все работы, связанные с монтажом главного двигателя и судовых устройств, с применением пластмассы EPY, могут быть выполнены только работниками фирмы MSJ или другими работниками, подготовленными и уполномоченными этой фирмой.

Первый шаг в процессе монтажа главного двигателя на фундаменте, являющимся частью конструкции корпуса судна, состоит из центровки оси вала двигателя с осью валопровода, соединяющего его с движителем судна (с винтом). Это делается при помощи регулировочных болтов или клиньев в соответствии с процедурой, принятой на верфи. При этом, двигатель должен быть установлен на 0,001—0,002 выше финальной высоты подкладок, учитывая усадку пластмассы во время её отверждения, а также её деформацию, вызванной массой двигателя и натяжением фундаментных болтов.

После центровки главного двигателя сверлят в фундаментной плите отверстия для крепёжных болтов, а в случае применения призонных болтов необходимо рассверливать также их отверстия. Эти работы выполняются работниками верфи.

Опорные поверхности двигателя и фундамента не нуждаются в обработке, а только в очистке от механических загрязнений и смазочного масла. Некоторые классификационные общества допускают присутствие на этих поверхностях тонкой окрасочной гидроизоляции хорошего качества.

Затем, в местах, где будут находиться подкладки, изготавливаются формы из полиуретанов или полипропиленовой пены толщиной 20—30 мм (рис. 5.1). Внутренние размеры формы (L и В — на рис. 5.1) должны соответствовать размерам подкладок, указанных в документации. Лобовая стенка формы (рис. 5.1а, б) выполняется из листовой стали толщиной 1—2 мм и крепится к фундаменту точечной сваркой. Зазор между стальным листом и фундаментной плитой заполняется замазкой.

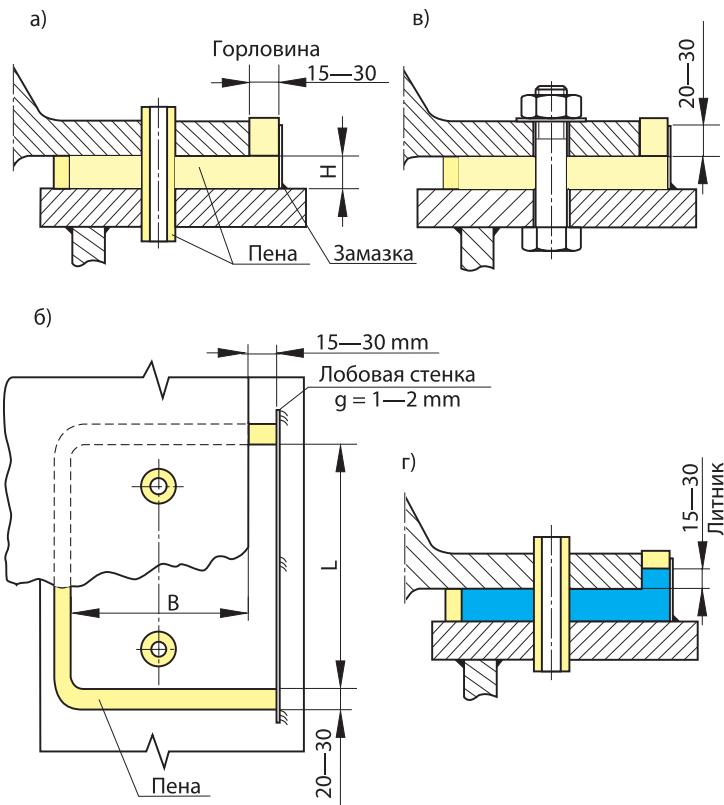


Рис. 5.1. Изготовление формы для заливки фундаментной подкладки: а—б) с отверстиями, уплотненными трубкой из мягкой резины или пены; в) со вставленным фундаментным болтом; г) форма заполнена пластмассой

Заливные формы должны выступать за края подкладок на 15—30 мм так, чтобы образовалось пространство (горловина), способствующее наполнению формы жидкой композицией пластмассы (рис. 5.1).

Заливная горловина должна быть так расположена, чтобы воздух не задерживался в форме, т. к. это препятствовало бы полному проникновению в неё пластмассы.

В районе заливной горловины форма должна находиться выше подкладки на 20—30 мм (рис. 5.1в) с целью получения некоторого избытка объёма композиции. Этот избыток необходим для усадки и хорошего заполнения формы. Практически заливная горловина (шириной 15—20 мм) выполняется по всей длине L подкладки (рис. 5.16).

Для предоставления возможности демонтажа соприкасающиеся с пластмассой поверхности, перед закрытием формы лобовой стенкой, покрываются антиадгезионным средством — силиконовым маслом в аэрозоле (например Silicon Spray Lubricant, Realease Agent PR-225 или WD-40).

Сквозь отверстия фундаментных болтов вставляются трубки из мягкой резины или из пены (рис. 5.1а, б), или фундаментные болты (рис. 5.1в), на которые легко закручивают гайки. Поверхность болта, соприкасающаяся с пластмассой, покрывается антиадгезионным средством (твёрдой смазкой).

После закладки и уплотнения заливных форм для всех подкладок проверяется правильность расположения (соосность) главного двигателя по отношению к линии гребного валопровода (согласно технологическим процедурам верфи).

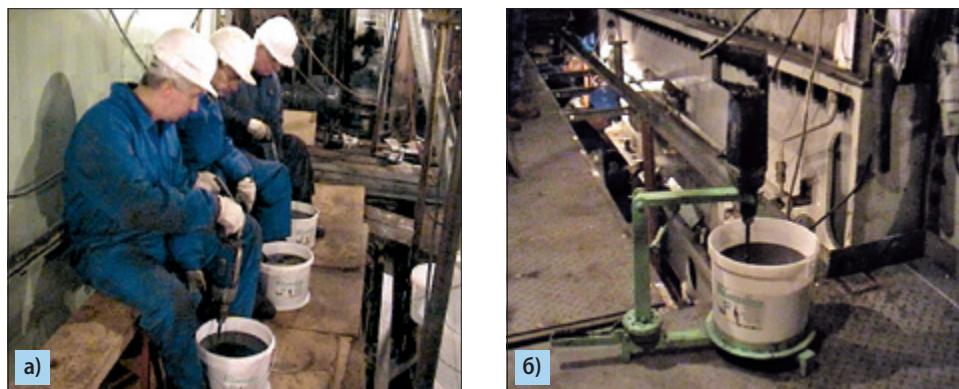


Рис. 5.2. Смешивание композиции: а) вручную с помощью ручной дрели; б) механически

Пластмасса EPY является двухкомпонентной. Она поставляется в жестяных ёмкостях, содержащих 1, 3 или 6 кг смолы, перемешанной с наполнителями. Отвердитель смолы поставляется в отдельных ёмкостях. Перед соединением этих двух компонентов и тщательным их смешиванием необходимо всё детально подготовить, т. к. после начала смешивания остаётся только 10—20 минут до гелеобразования этой композиции. Смешивание (ручное) длится 4—6 минут с применением специальной мешалки MSJ, вращающейся со скоростью 600—800 об/мин (рис. 5.2а), или механическим способом (рис. 5.2б). Температура смешанных компонентов должна быть 15—25°C, а температура окружающей среды (вблизи подкладок) — минимум 10°C.

Во время продолжительного хранения жидкой пластмассы наполнители имеют тенденцию к оседанию, особенно при высоких температурах, поэтому рекомендуется предварительное смешивание пластмассы (смолы с наполнителями), находящейся в ёмкостях, перед добавлением отвердителя. После добавления отвердителя и смешивания его со смолой рекомендуется, чтобы жидкую композицию оставалась в спокойном состоянии в течение 5—10 минут, в зависимости от температуры окружающей среды для того, чтобы из неё ушёл воздух.



Рис. 5.3. Заливка формы жидкой композицией: а) схема; б) на судне

Формы надо заливать медленно и непрерывно (рис. 5.3), избегая свободных прерванных спадов жидкой композиции так, чтобы сделать возможным удаление из неё остатков воздуха, а также, чтобы предохранить её от улавливания новой порции воздуха. Заливание следует выполнять непрерывно до момента заполнения формы и надлива (минимум 15 мм выше самой высокой точки подкладки (рис. 5.3а).

Надлив жидкой композиции (15—30 мм) создаёт некоторое давление и обеспечивает резерв пластмассы, необходимый для заполнения целого пространства подкладки, гарантируя тем самым хороший стык литой подкладки с несущей поверхностью основания двигателя. Принято считать, что надлив подкладки должен составлять 1% объёма отливки. В других случаях, например в кормовых подшипниках, где надлив не тянется по всей длине отливки, необходимо применять высокие надливы (типа бобышек), содержащие около 1% объёма всей отливки или применять литьё пластмассы слоями.

На рисунке 5.4 показаны примеры фундаментных подкладок, выполненных из пластмассы ЕРУ. Рисунок 5.4а представляет стандартное болтовое фундаментное соединение главного двигателя с применением подкладки, отлитой из пластмассы ЕРУ. Для этого соединения характерным является то, что фундаментный болт вложен свободно в отверстие в плите фундамента, в подкладке и в плите основания двигателя, а подкладка с надливом отлита в форме одной отливки.

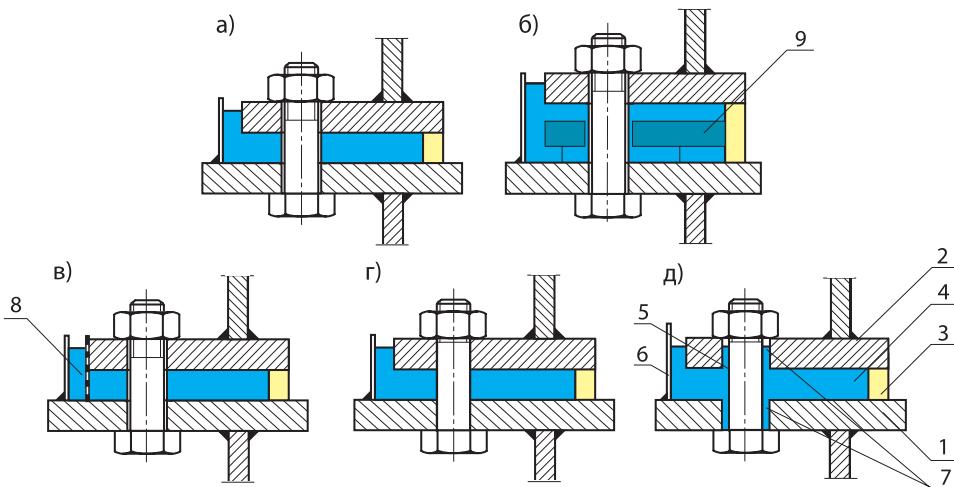


Рис. 5.4. Примеры фундаментных подкладок: а) с обычновенным фундаментным болтом; б) со сборным вкладом из пластмассы EPY; в) с перфорированным элементом; г) с призонным болтом в металлических элементах и в пластмассе EPY; д) с призонным болтом в пластмассе EPY; 1 – фундамент, 2 – основание корпуса машины, 3 – форма из пены, 4 – подкладка из пластмассы EPY, 5 – фундаментный болт, 6 – металлическая полоса, 7 – втулка из пластмассы EPY, 8 – перфорированный элемент, 9 – готовый (сборный) элемент, изготовленный из пластмассы EPY

Одним из способов избежания трудностей при отливке высоких подкладок ($H > 50$ мм) и сокращения времени их выполнения является отливка подкладок с раннее подготовленными вкладками (рис. 5.4б, элемент 9) [50]. Эти элементы отливают из пластмассы EPY и отверждаются в оптимальных условиях, т. е. в мастерской. Затем их помещают в заливные формы так, чтобы после заполнения жидкой пластмассой свободного пространства (30—40%) они являлись центральным слоем выпитых подкладок.

Во многих фундаментных болтовых соединениях, особенно в случае двигателей с боковыми стопорами, приходится удалять надливы подкладок. Тогда эти надливы выполняют свою функцию только во время литья подкладок и не переносят никаких эксплуатационных нагрузок. Для облегчения удаления этих надливов в заливной форме помещаются перфорированные элементы (рис. 5.4в, элемент 8) [99]. Эти элементы вместе с надливом удаляются после отвердения отлитой подкладки (рис. 5.5).

В фундаментных соединениях главных двигателей часто применяется некоторое количество призонных болтов (рис. 5.4г, д), назначением которых является точное позиционирование двигателя по отношению к фундаменту. Посадка (пригонка) болтов традиционным способом (рис. 5.4г) требует шлифования стержней болтов и отверстий, что является трудоёмкой и дорогостоящей операцией. Такое же назначение выполняют призонные болты в пластмассе EPY (рис. 5.4д) [49].

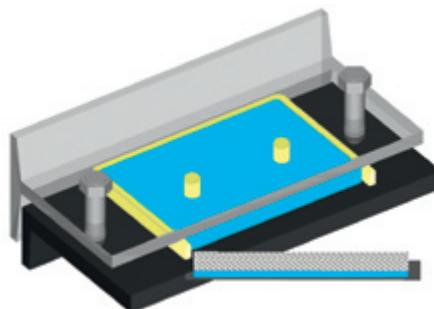


Рис. 5.5. Удаление надлива вместе с лобовой стенкой и перфорированным элементом

Установливание болтов в пластмассе основывается на их вложении в отверстия, сделанные с соответствующим зазором в фундаментной плите и в плите основания корпуса двигателя, и на заполнении заливаемой формы пластмассой до уровня верхней поверхности плиты основания корпуса двигателя.

Время отверждения подкладки зависит от температуры окружающей среды и равняется:

- 72 часа при температуре 10°C;
- 48 часов при температуре 15°C;
- 24 часа при температуре 20°C;

Во время отверждения подкладок необходимо соблюдать правила, применяемые к центровке главного двигателя; это означает, что необходимо в это время прекратить балластировку судна, выполнение всяких работ в силовой установке, изменения в расположении нагрузок на судне и т. п.

Химические процессы, связанные с отверждением композиции, являются очень сложными, а их протекание зависит от температуры. Структурирование композиции требует некоторого промежутка времени, а пропорции достигнутых связей зависят от температуры композиции в ходе отверждения. В виду того, что реакция отверждения является экзотермической, температура отвердевающей композиции повышается до некоторой величины, а потом снова падает. Если температура композиции будет графически соотнесена со временем отверждения, то получается кривая, которая называется экзотермой (рис. 5.6).

В практике принято, что максимальная величина температуры, отмеченная во время отверждения, считается экзотермой. При большой массе пластмассы и высокой температуре окружающей среды температура материала может стать чрезмерно высокой и привести к разрушению подкладок. Если же температура композиции во время отверждения чрезмерно низкая, то она отвердевает только частично и не достигает полной требуемой твёрдости и прочности.

В этом случае требуется внешний нагрев отвердевающих подкладок. Процесс отливки и отверждения должен быть так подобран, чтобы максимальная

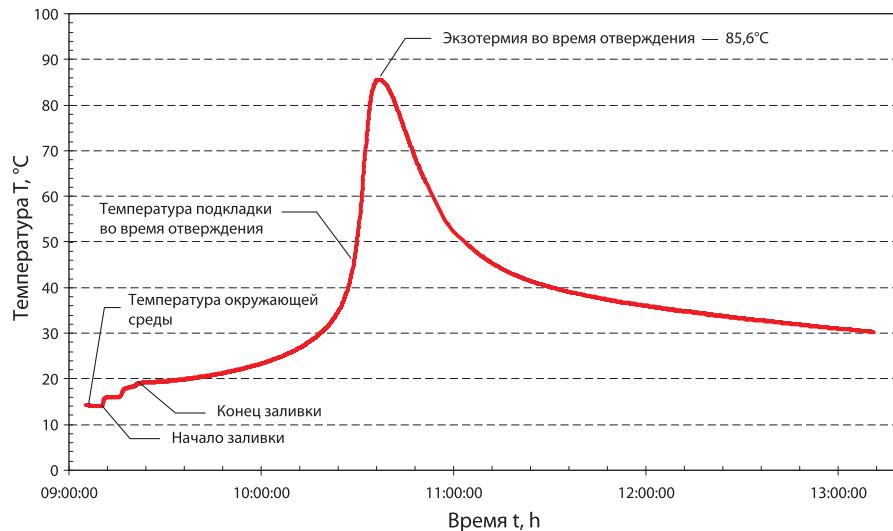


Рис. 5.6. Примерная диаграмма температуры композиции в функции времени отверждения фундаментной подкладки

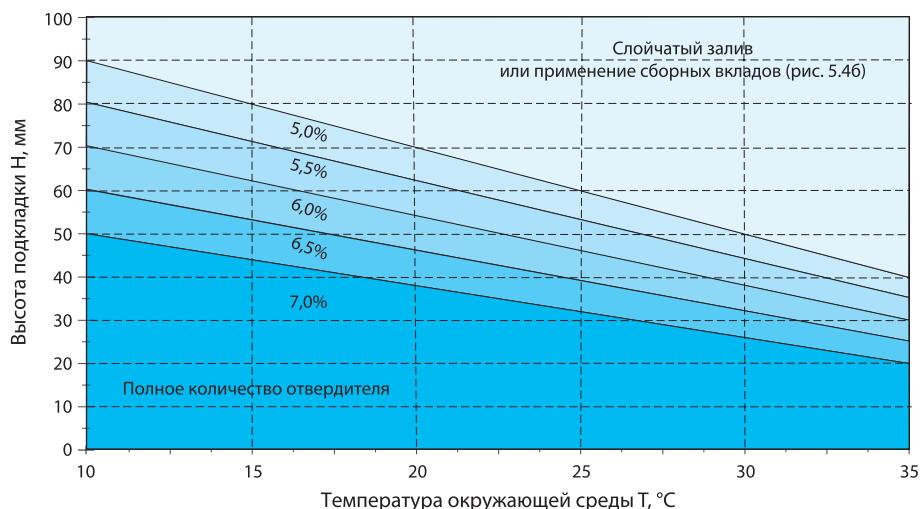


Рис. 5.7. Количество отвердителя в зависимости от температуры фундамента и высоты подкладки

температура (экзотерма) композиции была порядка 80—90°C. Поэтому подбор соответствующих условий отверждения является очень важным и требует учёта очень многих факторов, а прежде всего высоты подкладок и температуры фундамента. Согласно этим параметрам подбирается — по рис. 5.7 — соответственное количество отвердителя. При температуре окружающей среды меньше 10°C во время отверждения подкладок необходимо подвести тепло извне, применяя обдув нагретого воздуха или излучатели.

После отверждения подкладок необходимо удалить лобовые стенки форм (рис. 5.1, 5.5), измерить твёрдость пластмассы, сошлифовать острые края подкладок и проверить положение главного двигателя. Твёрдость пластмассы в упрочнённых подкладках, измеренная при помощи твердомера Barcola, должна равняться минимум 40°В. На рис. 5.8 представлены сравнительные диаграммы твёрдости, выраженной в разных физических величинах (шкалах) [100].

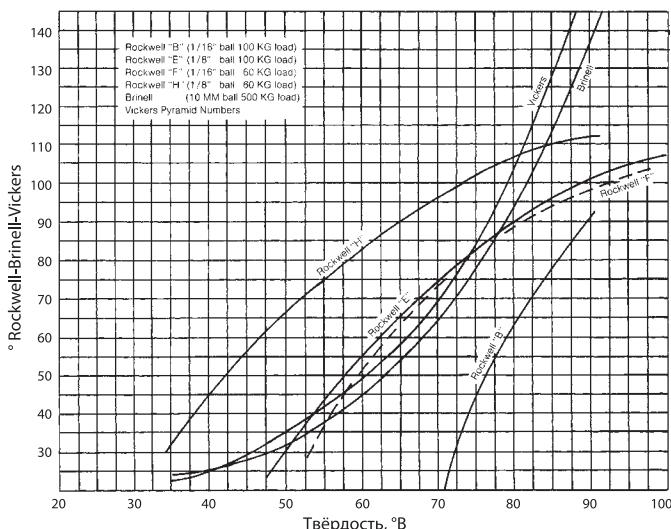


Рис. 5.8. Диаграммы твёрдости в разных шкалах в функции твёрдости, выраженной в °В [100]

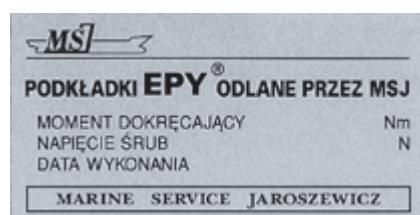


Рис. 5.9. Информационная табличка

После этого необходимо выкрутить отжимные болты (или удалить установочные клинья) и докрутить гайки фундаментных болтов (согласно инструкции верфи), затем снова нужно проверить центровку главного двигателя. В конце монтируют информационную табличку (рис. 5.9) и оформляют протокол.

Вылитые и отвердевшие подкладки, после натяжки фундаментных болтов, обеспечивают точное и прочное закрепление машин и устройств, которое позволяет их многолетнюю эксплуатацию.

Самым важным фактором при монтаже машин и устройств на фундаментах с применением подкладок, литых из пластмасс, является температура. Это касается всех этапов этого процесса. Существенное значение имеют:

- температура компонентов перед их смешиванием;
- температура литья и формирования подкладок;
- температура во время экзотермического процесса отверждения;
- скорость роста температуры до момента достижения рабочего уровня;
- температура эксплуатации подкладок.

Предел температуры 0—80°C можно считать температурой окружающей среды. В этом пределе температуры разница, составляющая 10 градусов, может быть разницей между успехом и провалом при применении пластмассы. Например, когда температура композиции является чрезмерно высокой, пластмасса может так быстро отвердеть, что не успеет заполнить форму.

5.2. Способы монтажа дейдвудных труб и втулок подшипников гребного вала

5.2.1. Традиционный и современный способы монтажа дейдвудной трубы

Пластмасса ЕРУ служит не только для отливки из неё фундаментных подкладок главных двигателей, редукторов, электрических агрегатов, насосов и других вспомогательных устройств, но и для монтажа линий валов (дейдвудных труб и втулок подшипников линии валов), втулок баллеров рулей, а также постоянных и демонтажных опорных пят, несущих значительную нагрузку от действия поперечных и продольных сил.

Традиционный способ монтажа дейдвудной трубы на судне выполняется путём её введения в отверстие в ахтерштевне нажимом [103]. Для этого необходимо было применение переносного расточного станка, необходимого для обработки отверстия в ахтерштевне корпуса судна и в подшипнике, установленном в переборке ахтерпика (рис. 5.10), при соблюдении соответствующего допуска обработки. После этого, дейдвудную трубу необходимо было ввести в эти отверстия нажимом с силой иногда до 1000 кН, применяя гидравлический пресс. Этот метод был тягостным, трудоёмким и дорогостоящим, а кроме того, допущенные ошибки было очень трудно поправить.

Способы монтажа дейдвудных труб и втулок подшипников гребного вала

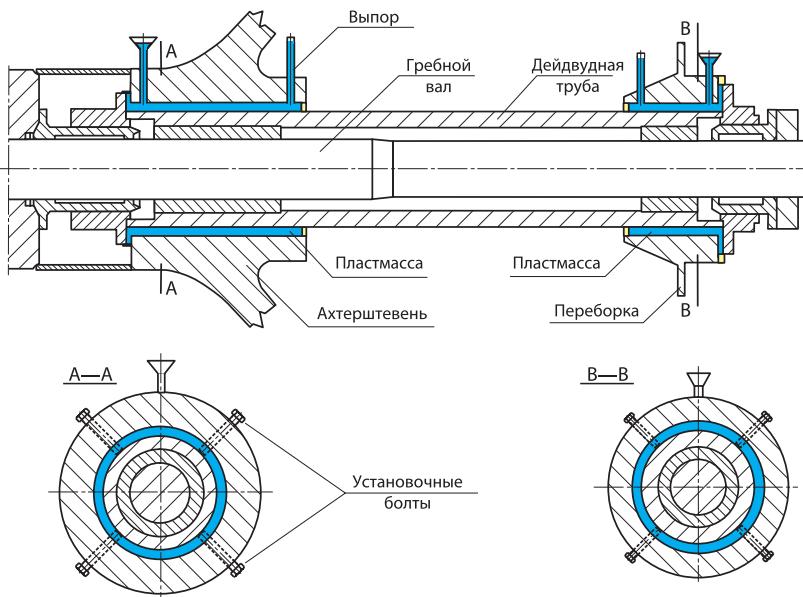


Рис. 5.10. Посадка дейдвудной трубы судна во втулках, отлитых из пластмассы ЕРУ

В противоположность этому методу, монтаж дейдвудной трубы с применением химически отверждённой пластмассы (рис. 5.10) является на много дешевле и гарантирует высокую точность монтажа и быстрое выполнение работ. В этом случае отверстие в ахтерштевне и в подшипнике в переборке ахтерпика может иметь диаметр на 20—40 мм больше внешнего диаметра дейдвудной трубы. В это отверстие вводится дейдвудная труба и производится её центрование при помощи установочных болтов (рис. 5.10). В результате этого, вокруг дейдвудной трубы появляется зазор величиной 10—20 мм. Рекомендуется именно такая величина зазора, т. к. она даёт возможность легко вносить поправки в размещение трубы и наклонять её в более широком диапазоне, чем при монтаже дейдвудной трубы нажимом, способствуя облегчению получения правильной центровки всего валопровода. Кроме того, зазор такой величины гарантирует получение достаточно толстой отливки из пластмассы вокруг дейдвудной трубы.

Минимальный зазор между металлическими поверхностями дейдвудной трубы и отверстием в ахтерштевне и в подшипнике на переборке ахтерпика должен быть не менее 8 мм. Затем, пространство между дейдвудной трубой, ахтерштевнем и подшипником в переборке ахтерпика заливают жидкой пластмассой, смешанной с отвердителем.

Отверстие в ахтерштевне судна, в котором находится дейдвудная труба, не нуждается в механической обработке. Такая необходимость может появиться

только в случае её демонтажа, что практически не наступает за весь период эксплуатации судна, за исключением случаев механического повреждения этой части судна. Диаметр отверстия должен быть больше внешнего диаметра дейдвудной трубы, чтобы после ввода её в это отверстие оставалось 10—20 мм свободного пространства по её периметру.

Перед заливкой пластмассы все пространства, с которыми она будет соприкасаться, необходимо очистить от смазки, краски, ржавчины и других механических загрязнений и обезжирить.

Размещение дейдвудной трубы соосно с линией валопровода выполняется перед заливкой всех пространств пластмассой с помощью 3—4 установочных болтов, расположенных вокруг трубы вблизи обоих её концов (рис. 5.10). Эти отверстия имеют резьбу, а болты, ввинчиваемые на соответствующую глубину, нажимают на дейдвудную трубу, способствуя её точному размещению (рис. 5.11а).

В случае трудности введения установочных болтов снаружи дейдвудной трубы, как это показано на рис. 5.11а, их вводят изнутри, что показано на рис. 5.11б, или применяя специальные стальные элементы, приваренные к ахтерштевню, через которые можно ввести установочные болты, действующие не на дейд-

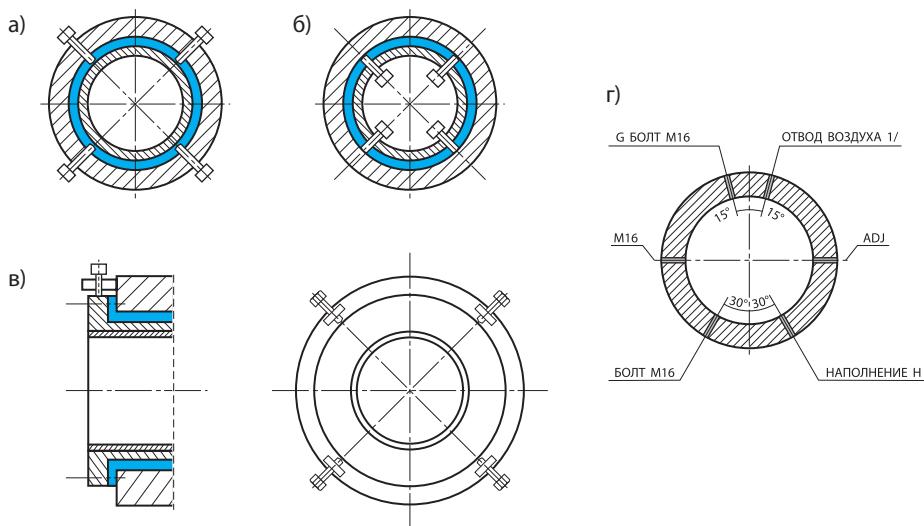


Рис. 5.11. Уложение дейдвудной трубы в ахтерштевне или в кормовой втулке с помощью установочных болтов: а) установочные болты кормовой втулки, вкручиваемые извне; б) установочные болты, вкручиваемые изнутри дейдвудной трубы; в) установочные болты, вкручиваемые через плитки, приваренные к ахтерштевню и напирающие на фланец дейдвудной трубы; г) пример нетипичного размещения установочных болтов (взят из практики)

вудную трубу, а на её конечный манжет (рис. 5.11в). Эти приваренные элементы удаляются после окончания центровки дейдвудной трубы.

Установочные болты обычно равномерно размещаются по окружности поперечного сечения дейдвудной трубы, как показано на рис. 5.11а, б, в. Иногда имеются ограничения и эти болты могут размещаться иначе. Пример такого размещения взят из практики и представлен на рис. 5.11г.

Дейдвудная труба, имеющая передний и задний подшипники, может быть из одного отрезка трубы (рис. 5.10) или сварной из нескольких отрезков труб. Сварные трубы обычно применяются при длине порядка 3—5 м.

Иногда подшипники гребного вала вместо в одной дейдвудной трубе монтируются в двух отдельных подшипниковых втулках. Каждая из них отдельно устанавливается и центрируется в кормовой втулке судна при помощи установочных болтов, находящихся с двух сторон — спереди и сзади. Пример такого решения схематически представлен на рис. 5.12.

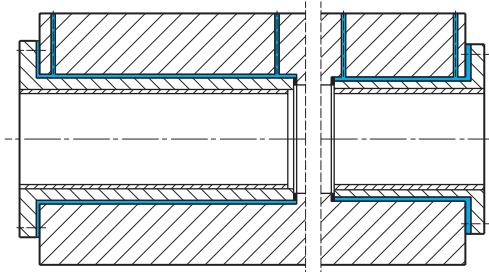


Рис. 5.12. Подшипниковые втулки гребного вала, устанавливаемые раздельно

Точность наружной поверхностной обработки дейдвудной трубы или втулки подшипника не имеет большого значения, т. к. обычно не предвидится их демонтаж. Залитая и отверждённая пластмасса гарантирует постоянное положение дейдвудной трубы в отверстии. Тем не менее, если предвидится демонтаж втулки или дейдвудной трубы, то их наружная поверхность должна быть выполнена в соответствии с классом N9 ($R_a = 6,3 \mu\text{m}$) или более точно и покрыта тонким слоем антиадгезионного средства. В таких случаях необходимо предохранить их от возможного изменения положения во время эксплуатации. Обычно дейдвудная труба заканчивается фланцем, который привинчивается болтами к лобовой кормовой втулке и гарантирует её стабильное положение (рис. 5.13а). В другом случае её необходимо предохранить при помощи винтов (рис. 5.13б) или нарезкой продольных канавок в соединяемых элементах, которые после заливки дейдвудной трубы пластмассой обеспечивают её стабильное положение (рис. 5.13в).

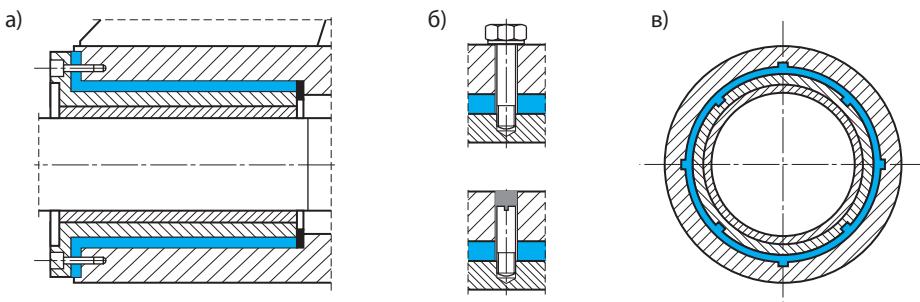


Рис. 5.13. Примеры предохранения дейдвудной трубы от поворота: а) с помощью крепления фланца болтами к ахтерштевню; б) с помощью винтов; в) с помощью продольных пазовых канавок, нарезанных в соединяемых элементах

После отверждения пластмассы установочные болты вывинчиваются, а их отверстия заглушаются соответствующими винтами или отрезаются торчащие части этих болтов и их места уплотняются при помощи эпоксидной пасты.

5.2.2. Уплотнение пространств, заполняемых пластмассой

Существенной проблемой в процессе монтажа дейдвудной трубы или втулки подшипника гребного вала перед его заливкой жидкой пластмассой является соответствующее уплотнение заполняемого пространства (с двух сторон).

Закладка уплотнения в заднем, легко доступном, конце заполняемого пространства не представляет больших трудностей. Для уплотнения заполняемого пространства при монтаже дейдвудной трубы применяется обычно металлический поясок (привинчиваемый или привариваемый), а также уплотняющая эпоксидная паста (рис. 5.14, деталь А).

Для уплотнения другого конца заполняемого пространства, находящегося на значительном расстоянии от заднего конца кормовой втулки, применяются обычно полиуретановые пены или мягкие резины (рис. 5.14, деталь Б). Эта полиуретановая пена может являться элементом постоянного уплотнения или только на время монтажа дейдвудной трубы. Если пена является элементом постоянного уплотнения, то она должна иметь структуру, состоящую из закрытых клеток. Если же уплотнение пеной должно быть удалено и применён другой вид постоянного уплотнения, при котором в соединение не попадала бы снаружи морская вода и масло, тогда пена должна иметь структуру, построенную из открытых клеток, что обеспечивает добавочную деаэрацию заливаемого пространства.

На конце дейдвудной трубы, доступном изнутри судна, для уплотнения заполняемого пространства применяются металлические кольца с уплотняющим элементом (например, с резиновым орингом или пеной), привинчиваемые к лобовой поверхности кормовой втулки (рис. 5.14, деталь В).

Способы монтажа дейдвудных труб и втулок подшипников гребного вала

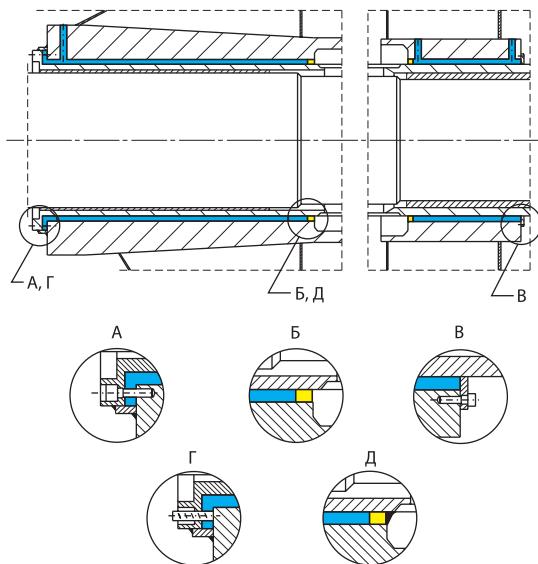


Рис. 5.14. Уплотнение дейдвудной трубы в легко доступных местах

Во внутренней, труднодоступной части для уплотнения заполняемого пространства применяются ленты из пены шириной и толщиной соответственно больше, чем высота заполняемого зазора. Если эта часть является доступной, то пену вдавливают в зазор по всему контуру после вставления дейдвудной трубы (рис. 5.14, деталь Б). Часто это уплотнение укрепляется эластичной эпоксидной пластмассой, гарантирующей постоянную плотность данному соединению (рис. 5.14, деталь Д). Иногда уплотняющая пена после отверждения пластмассы удаляется, а постоянная плотность обеспечивается применением предназначеннной для этого эластичной эпоксидной пасты.

Фланец дейдвудной трубы или втулки подшипника, вместе с залитой и отвердевшей под ней пластмассой, привинчивается болтами к кормовой втулке, находящейся в ахтерштевне судна. Если отверстия для болтов, крепящих манжет дейдвудной трубы или кормовой втулки, были раньше высверлены и нарезаны, то необходимо покрыть эти болты антиангезионным средством, ввинтить, не затягивая их, и уплотнить перед наполнением заливаемого пространства пластмассой. В том случае, когда отверстия были высверлены раньше только во фланце, вместо болтов нужно вставить деревянные штифты (рис. 5.14, деталь Г) и уплотнить замазкой или эпоксидной пастой. Сверление отверстий в пластмассе не рекомендуется, т. к. в ней находятся керамические элементы, которые тупят режущие края сверла.

Если есть доступ к заполняемому пространству только с одной стороны, а другой конец является недоступным после ввода дейдвудной трубы или втулки

подшипника, тогда уплотнение этого конца является затруднённым и требует удаления ему особенного внимания. В таком случае принимаются разные решения, но обычно элементы уплотнения вкладываются перед вставлением дейдвудной трубы или втулки подшипника в предвиденные для них места. Несколько способов таких уплотнений, чаще всего применяемых на практике, представлено на рисунке 5.15. Рисунок 5.15а показывает внутреннее уплотнение с помощью кольца из пены или мягкой резины, опирающегося на посадку, сделанную в отверстии кормовой втулки. Это уплотнение установлено на лобовой поверхности монтированной втулки, прижатой к уплотняющему элементу.

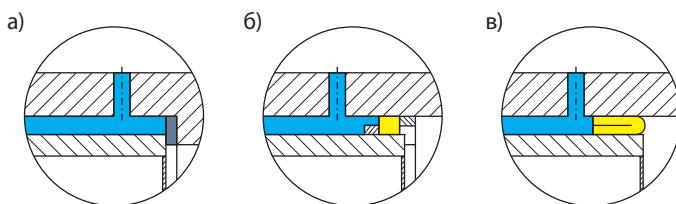


Рис. 5.15. Примеры уплотнения заливного пространства дейдвудной трубы в кормовой втулке в местах, недоступных после введения её во втулку

В случае длинной дейдвудной трубы, привинчиваются или привариваются к её концу стопорные кольца, которые создают место для помещения полиуретановой пены после вложения трубы (рис. 5.15б). Хороших результатов можно добиться при закреплении на периметре дейдвудной трубы полосы уплотняющей пены и вывертывания её наружу во время заведения дейдвудной трубы. Пена должна быть приклеена к трубе (напр. бутапреном) и прижата к ней натянутой тесьмой или проволокой (рис. 5.15в). Пример этого решения представлен на опытной модели и описан в разделе 8 (пункт 8.5.5, рис. 8.29).

При применении всякого рода внутренних уплотнений требуется очень большая осторожность во время заведения дейдвудной трубы в отверстие, т. к. при этом можно легко повредить вложенное раньше уплотнение, что может привести к серьёзным осложнениям.

5.2.3. Наполнение заливаемого пространства пластмассой и её отверждение

Наполнение заливаемого пространства жидкой композицией может быть выполнено двумя способами: заливанием её сверху или закачиванием снизу. Заливание сверху является более удобным, чем снизу, требующего применения дорогостоящего насоса, а также затруднительной очистки после его окончания. Кроме того, в заливаемом пространстве может появиться чрезмерное неконтролируемое давление, вызванное нагнетаемой пластмассой, которое может повредить уплотнение.

Для наполнения заливаемого пространства сверху должна быть предусмотрена заливная горловина и выпор, являющийся также воздухоотводчиком. Обычно это специальные отверстия, вывинченные вблизи крайних поперечных сечений заливаемого пространства (рис. 5.16). В эти отверстия, на части которых имеется нарезка, ввинчиваются наливные и переливные трубы. Наливная труба должна находиться в вертикальном положении, иметь внутренний диаметр 20—36 мм (в зависимости от величины дейдвудной трубы и количества заливаемой пластмассы) и заканчиваться воронкой, облегчающей заливку. Длина наливной и переливной труб должна равняться минимум 250 мм, чтобы образовалось необходимое гидростатическое давление, и был соответствующий припуск пластмассы на термическую и химическую усадку, возникающую во время её отверждения, и возможные потери (убытки) из-за неплотности. В случае невозможности высверлить вертикальные наливные и переливные отверстия, их делают наклонными (под возможно небольшими углами, рис. 5.16б).

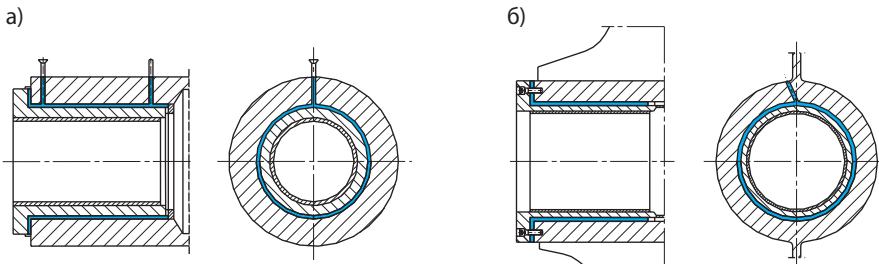


Рис. 5.16. Заливка дейдвудной трубы

Иногда появляются трудности во время высверливания наливных и переливных отверстий в отливке ахтерштевня или в кормовой втулке, тогда заполнение пластмассы осуществляется через кольцевой зазор у фланца. Для этой цели делаются отверстия в уплотняющем поясе на фланце, в которые вставляются наливные и переливные трубы (рис. 5.17а). Могут также применяться и другие способы, примером чего может быть способ, представленный на рис. 5.17б. Здесь заливка пластмассы происходит через горловину, сделанную при специально оформленном входе кормовой втулки. Тогда пластмасса переливается через зазор у фланца и заполняет всё заливаемое пространство дейдвудной трубы. После окончания процесса заливки горловина заглушается резьбовой пробкой.

Заливка пластмассы должна проходить непрерывно при сохранении соответственно высокого уровня её в заливной горловине. Это предохраняет от попадания воздуха в заливную горловину.

Имея в виду термическую и химическую усадку пластмассы, возникающих во время её отверждения, заливка больших пространств происходит обычно

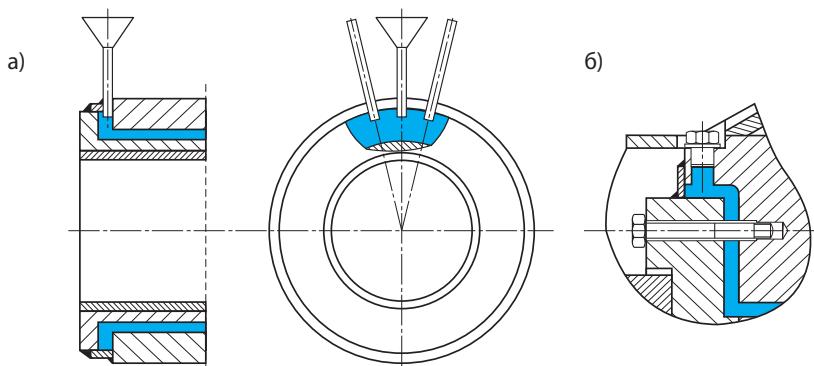


Рис. 5.17. Заливка пластмассы через щель при фланце

двумя этапами: сначала заливается около $\frac{2}{3}$ массы пластмассы, а затем после её гелеобразования заливается $\frac{1}{3}$.

Наливные горловины, установленные в самых высоких пунктах заливаемого пространства, гарантируют надлежащее его заполнение и хорошее прилегание пластмассы к поверхности дейдвудной трубы. После заполнения заливаемого пространства следует внимательно следить за уровнем пластмассы в наливной и переливной горловинах. Иногда появляется необходимость доливки пластмассы до её гелеобразования.

После гелеобразования пластмассы наливная и переливная трубы вынимаются, а после полного её отверждения оставшиеся отверстия заглушаются болтами или замазываются уплотняющей пастой.

В случае, когда линия гребного вала является наклонной по отношению к горизонтали, трубка наливной горловины должна быть установлена в самом

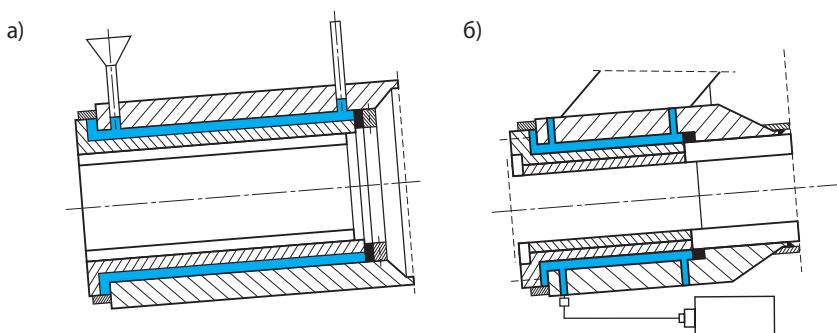


Рис. 5.18. Наполнение заливного пространства в случае наклона гребного вала: а) заливка сверху; б) заполнение снизу насосом

низком месте верхней части заливаемого пространства, а трубка переливной горловины — в самом высоком положении самого высокого места верхней части этого пространства (рис. 5.18а).

Заполнение снизу такого наклонного пространства происходит через отверстие, находящееся в его самом низком месте. Трубка переливной горловины и отвод воздуха должны находиться в самом высоком месте верхней части заливаемого пространства. Установка, через которую подаётся пластмасса (рис. 5.18б), должна иметь запорный (блокирующий) клапан.

После заполнения пространства пластмассой необходимо закрыть клапан и отключить трубопровод, подающий пластмассу. Если насос, подающий пластмассу, не предвидится для немедленного повторного использования, то необходимо его тщательно очистить.

Примечания

Во время заполнения пространства между дейдвудной трубой и её гнездом, находящимся в кормовой втулке, выступают большие силы, действующие на дейдвудную трубу (по закону Архимеда). В случае больших дейдвудных труб эти силы могут значительно превзойти величину их массы и оказывать большой нажим на установочные болты, находящиеся в верхней части дейдвудной трубы. В результате действия этих сил может наступить потеря контакта с установочными болтами, находящимися в нижней части дейдвудной трубы, и ухудшение её надлежащего размещения. Поэтому установочные болты должны быть хорошо дотянуты, чтобы обеспечить стабильность установки дейдвудной трубы во время её заполнения жидкой пластмассой. Однако натяжка этих болтов не должна быть слишком велика, чтобы не вызывать механической деформации дейдвудной трубы.

Залитая пластмасса должна полностью отвердеть. Минимальное время отверждения пластмассы ЕРУ зависит от температуры окружающей среды и равняется:

- 72 часа при температуре 10—13°C;
- 48 часов при температуре 14—20°C;
- 24 часа при температуре > 20°C.

Если объём выполняемых монтажных работ находится непосредственно под влиянием атмосферных условий, следует применить прикрытие места работ, а при температуре ниже 13°C — его подогрев на протяжении не менее 24 часов. Это особенно важно в случае работ, проводимых в холодное время года. Например, в городе Петрозаводске (Карелия), на верфи Onega Shipyard в зимнее время (12 марта 2008 года) для этой цели была построена специальная кабина, защищающая место работ (рис. 5.19), обогреваемая обдувом тёплого воздуха. Она оказалась пригодной также для проведения подобных работ на других судах.



Рис. 5.19. Монтаж дейдвудной трубы в зимних условиях с применением камеры, обогреваемой нагретым воздухом (Onega Shipyard, Петрозаводск, Карелия)

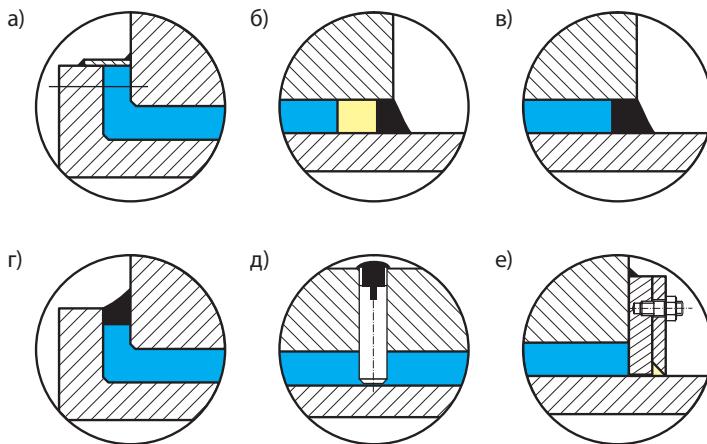


Рис. 5.20. Разные способы охраны от влияния внешних условий (морской воды, масла), применяемые при монтаже дейдвудных труб и втулок подшипников гребных валов: а) приваренная к фланцу металлическая полоса; б), в) уплотнение эластичной эпоксидной смолой (с пеной или после удаления пены); г) уплотнение из эластичной эпоксидной смолы на фланце; д) заглушение винтовой заглушки отверстия, оставшегося после удаления установочного болта и уплотнение эластичной эпоксидной смолой; е) уплотнение металлической лентой, прикрученной обручем и резиновым кольцом

5.2.4. Предохранение соединений от влияния внешних факторов

Несмотря на то, что залитая и отвердевшая пластмасса хорошо прилегает к поверхности отверстия и вложенной в него дейдвудной трубы или втулки подшипника гребного вала и гарантирует точное их взаимное размещение, она не всегда обеспечивает полную плотность соединения. Это следует из-за изменений температуры и значительной разницы величин коэффициентов теплового расширения пластмассы и металла. Поэтому следует предвидеть применение также традиционных способов охраны таких соединений от влияния внешних факторов (морской воды, масла), как это делается при монтаже дейдвудных труб с применением пресса. Несколько способов таких предохранений, применяемых при монтаже дейдвудных труб гребных валов морских судов, представлено на рис. 5.20. Кроме показанных на этом рисунке, применяются также другие способы таких предохранений.

5.3. Вопросы безопасности труда и пожарной безопасности

Основой пластмассы EPY являются эпоксидные смолы. В жидком состоянии они в некоторой степени агрессивны. У людей с аллергией они могут быть причиной сыпи и экземы. Поэтому всегда следует обращать большое внимание на избежание контакта кожи и глаз с жидкостью пластмассой, а в особенности с очень агрессивным отвердителем. Необходимо применять защитную одежду. Испарения жидкой пластмассы могут вызывать раздражение дыхательных путей и глаз, поэтому в замкнутых помещениях следует применять вентиляцию. В случае загрязнения кожи, её нужно протереть тампоном, намоченным ацетоном, а затем промыть тёплой водой и смазать защитным кремом.

При работе с отвердителем строго запрещается принятие пищи и курение. Отвердители являются горючими жидкостями, а средствами их гашения являются: вода, огнегасительные порошки и двуокись углерода (углекислый газ). Подробная информация, касающаяся этих вопросов, находится в картах характеристик описанных химических веществ [101, 192].

Во время отверждения пластмассы протекает эзотермическая химическая реакция, во время которой не образуются летучие побочные продукты. После отверждения пластмасса EPY в консистентном состоянии безопасна для здоровья. Это подтверждает Гигиенический сертификат № 172/779/190/2009 Института морской и тропической медицины в Гдыне (Польша).

6

Практическое применение подкладок из пластмассы при монтаже машин и устройств

6.1. Общие замечания

Практическое применение подкладок, литых из химически отверждевающих пластмасс, для монтажа судовых машин и устройств датируется с середины 60-тих годов прошлого века и берёт своё начало в Соединённых Штатах Америки. Для этой цели на основе эпоксидных смол была разработана специальная композиция, названная Chockfast Orange. Польская пластмасса для фундаментных подкладок была разработана в Щецинском политехническом институте в 1970—1973 гг. прошлого века и впервые была применена в 1974 году на учебно-грузовом судне m/s „Kapitan Ledóchowski”, построенном на Щецинской судоверфи.

Химически отверждевающиеся пластмассы с точно определёнными свойствами, со временем усовершенствованные, оказались почти идеальным материалом для фундаментных подкладок машин. Для их практического применения главную роль сыграли следующие факторы:

1. возможность перемешивания композиций и лёгкой отливки фундаментной подкладки различных размеров и форм, в готовом виде, на месте их применения;
2. хорошая прочность отверждённой пластмассы;
3. относительно небольшая величина модуля упругости и очень хорошая автоматическая пригонка заливаемой пластмассы на большой поверхности стыка с фундаментом при наличии большого коэффициента поверхностного трения, что обеспечивает стабильность монтажа без появления поверхностной коррозии трения (fretting) и износа контактных поверхностей;
4. значительное сокращение времени и снижение расходов при монтаже машин и устройств на фундаменте;
5. лучшее гашение механических колебаний (виброизоляция) по сравнению со сталью и лучшая изоляция ударных шумов.

Подкладки из пластмассы являются удобными как при применении их для монтажа новых устройств, так и при ремонтных работах, выполняемых вне ремонтной мастерской. Не требуется никакая специальная подготовка поверхности фундамента, кроме грубой механической очистки и обезжиривания. Неровности, коррозионные язвы и непараллельные поверхности, затрудняющие или просто

исключающие применение металлических подкладок, в случае отливки их из пластмассы не создают трудности.

Значительные технические, экономические, а также эксплуатационные выгоды, возникающие при применении новых материалов и новых способов монтажа машин и устройств, оправдались на практике и причинили к тому, что эта методика в настоящее время стала стандартной в судостроении. В настоящее время она в широком масштабе стала применяться также при монтаже различных ответственных объектов на суще.

6.2. Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств

6.2.1. Двигатели и редукторы главного привода судов

6.2.1.1. Общие замечания

Судовые машины и устройства могут устанавливаться на фундаментах жёстким методом или эластически. Большие двигатели и редукторы главного привода судна обычно крепились к фундаменту жёстко, что обеспечивало им стабильное положение во время эксплуатации. По традиции в такого рода установках применялись металлические подкладки, но в настоящее время стали применять подкладки из специально разработанных для этих целей полимерных пластмасс. Необходимо при этом подчеркнуть, что применение этих пластмасс было обусловлено тем, что они могут также обеспечить жёсткое крепление таким объектам, но лучшим способом, чем традиционные металлические подкладки. Они не принадлежат к группе пластмасс (эластомеров), которые часто применяются для эластичных подкладок. Это пластмассы с относительно большой жёсткостью, поэтому они предназначены (например, по правилам GL [43]) для жёсткого крепления судовых машин и устройств.

Обсуждаемые здесь пластмассы нашли также применение для эластичного монтажа судовых двигателей. В таких случаях применяются фундаментные подкладки под амортизаторы, на которых эластично устанавливается двигатель. Пример такого конструктивного решения описан ниже в пункте 6.2.1.3.

6.2.1.2. Жёсткий монтаж машин и устройств

Пластмассы для фундаментных подкладок были разработаны прежде всего с мыслью о том, чтобы упростить и сократить время монтажа двигателей и редукторов главного привода. Традиционный метод монтажа этих объектов с применением металлических подкладок имел много недостатков, к которым относятся: механическая обработка фундаментной плиты и металлических подкладок, ручная индивидуальная их пригонка, а также многие другие трудоёмкие и обременительные работы. Требования, предъявляемые к монтажу главных двигателей (рис. 6.1), очень высокие, в связи с чем при применении металли-



Рис. 6.1. Главный судовой двигатель HCP-Sulzer 6RTA76 на тормозном стенде

ческих подкладок работы продолжались обычно очень долго (1—3 недели) и выполнение монтажных работ было очень дорогостоящим.

Применение подкладок из пластмасс,литых непосредственно под установленным двигателем, значительно сократило время его монтажа и снизило связанные с этим расходы, а также привело к появлению многих технических и эксплуатационных выгод.

Главные двигатели составляют самую большую группу объектов, установленных на подкладках из пластмассы. Их перечень представлен в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Перечень главных двигателей, установленных на подкладках, изготовленных из пластмасс за время с 1974 по 2014 год

Двигатели	Количество
Caterpillar	79
Deutz	106
HCP-Fiat	19
HCP-MAN	85
HCP-Sulzer	356
MAN-B&W	80
MaK	129
Puck	231
SKL	225
Wärtsilä	115
Wola	158
Другие	653
Всего	2236

Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств

Пример двигателя, установленного на подкладках, изготовленных из пластмассы ЕРУ, показан на рис. 6.2а. Этот двигатель установлен на 20-ти подкладках, расположение которых показано на рис. 6.2б, а на рис. 6.3 представлен редуктор главного привода судна, также установленный на подкладках из пластмассы ЕРУ.

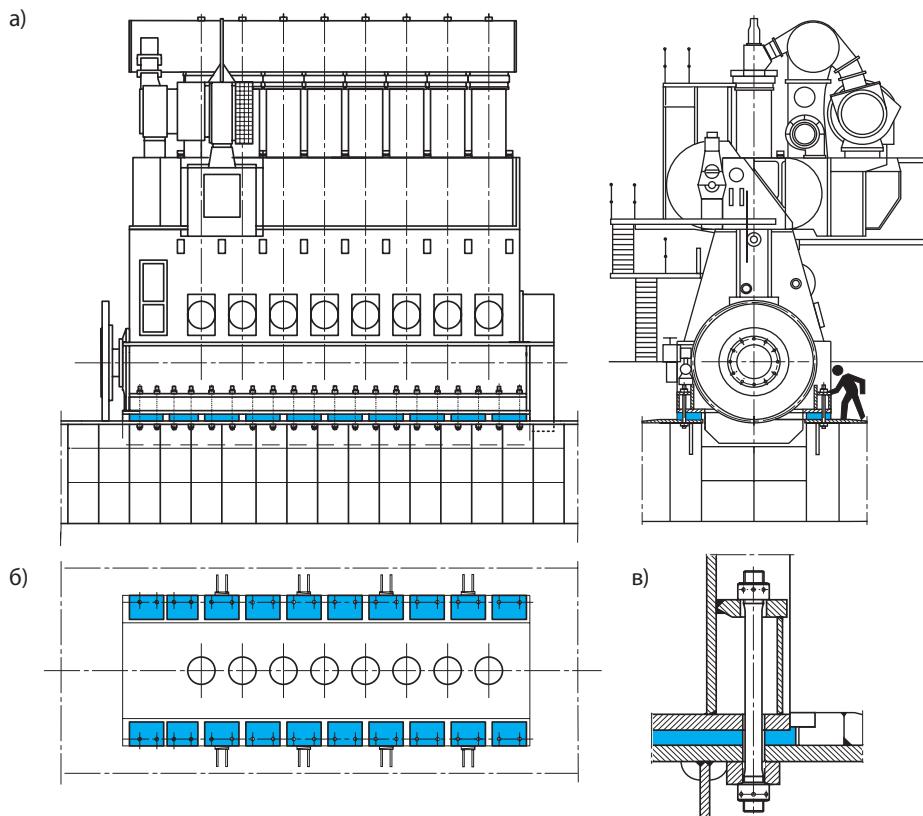


Рис. 6.2. Главный судовой двигатель 8RTA68T-B, установленный на подкладках из пластмассы ЕРУ: а) общий вид; б) размещение фундаментных подкладок; в) сечение фундаментного болтового соединения

Фундаментные болты, крепящие судовой двигатель или редуктор к их фундаментам, могут быть вставлены с некоторым зазором по отношению к отверстиям, в которых они помещены (рис. 6.4а, б), либо под развёртку (рис. 6.4в, г, д). Их посадка может быть выполнена в металле (рис. 6.4в) или в пластмассе (рис. 6.4г, д). В случае болтов, вставленных с зазором, в отверстия для них (перед отливкой подкладок) вставляются эластичные трубы из резины или из полиуретановой пены (рис. 5.1г). В случае болтов с посадкой в металле (рис. 6.4в) сначала свер-

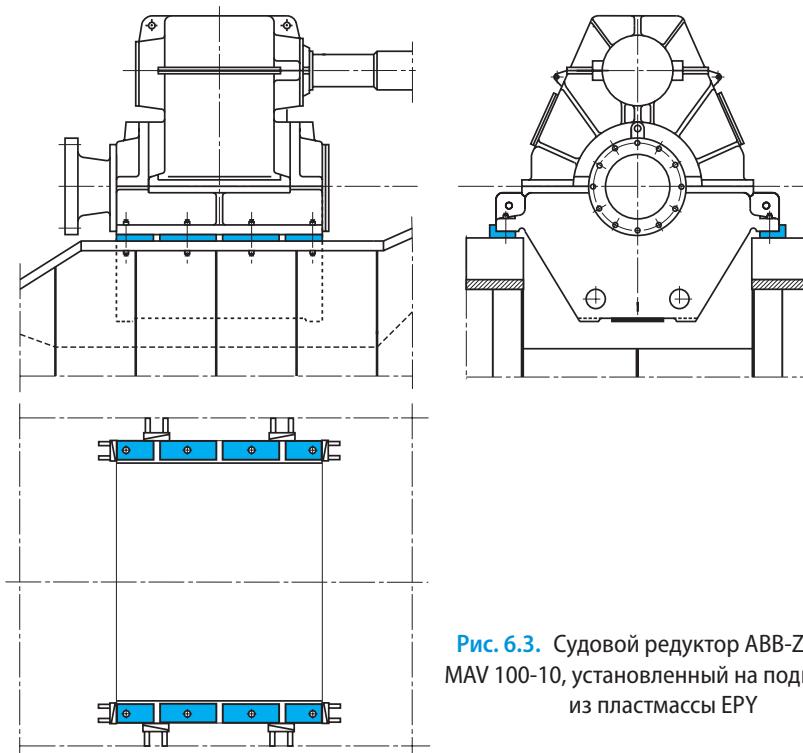


Рис. 6.3. Судовой редуктор ABB-Zamech MAV 100-10, установленный на подкладках из пластмассы EPY

лятся и рассверливаются отверстия, затем вставляют подогнанные к ним болты и только тогда заливают форму пластмассой. Это очень трудоёмкий процесс, особенно при больших диаметрах отверстий (40—60 мм). При посадке болтов в пластмассе (рис. 6.4г, д) сначала вставляются болты, а затем вокруг них отливаются подкладки вместе со втулками.

Посадка фундаментных болтов в пластмассе является оригинальным решением, на которое был получен патент [49] и которое получило признание классификационных обществ.

Втулка из пластмассы при стенке толщиной 2—10 мм отливается вместе с фундаментной подкладкой. Это исключает необходимость пригонки болтов к отверстиям фундаментной плиты и отверстиям основания главного двигателя во время его монтажа. Результатом является экономия времени и финансовых затрат. Фундаментные болты, установленные в пластмассе, могут безопасно переносить значительные статические и динамические нагрузки в направлениях, касательных к поверхности опоры.

Так как в составе пластмассы содержатся керамические компоненты, необходимо избегать механической обработки отверстий (сверления и развёртки) после отливки и отвердения подкладок.

Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств

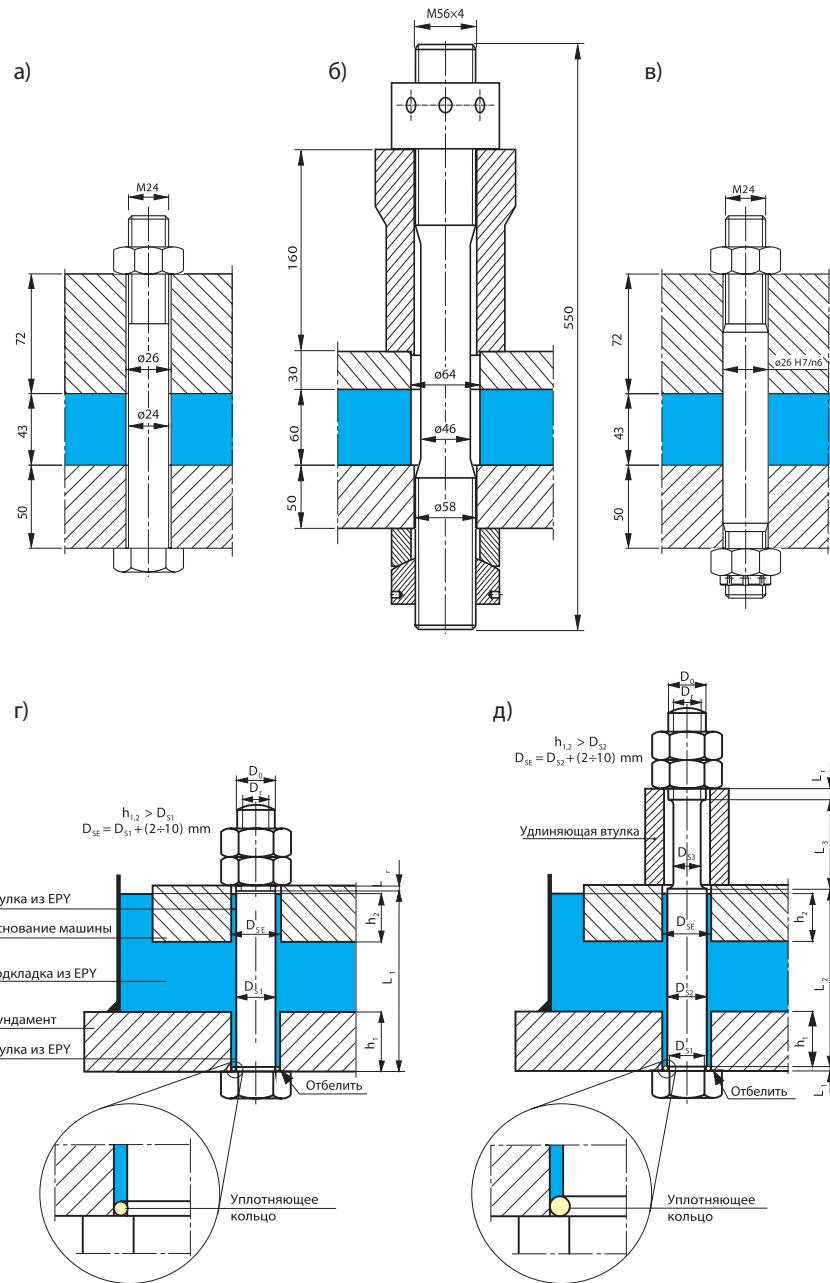


Рис. 6.4. Примерные сечения фундаментных болтовых соединений судовых машин и устройств:
а—б) с болтом, вставленным в отверстие с зазором; в) с болтом, вставленным в основание машины
и в фундамент традиционным способом под развёртку; г—д) призонные болты в пластмассе ЕРУ,
отлитые вместе с подкладкой

6.2.1.3. Эластичный метод монтажа машин и устройств с применением пластмассы

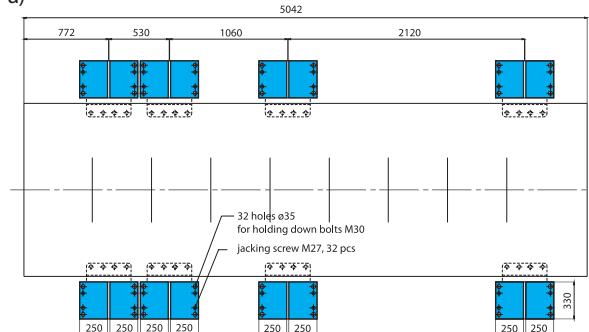
Фундаментные подкладки из пластмассы применяются как при жёстких, так и при эластичных монтажах главных двигателей судов. Пример двигателя с эластичным креплением и амортизаторами, установленными на подкладках из пластмассы EPY, показан на рис. 6.5—6.7. Это двигатель ME MaK 8 M32C судна „NORDERVON”, который был установлен на подкладках из пластмассы фирмой MSJ в январе 2010 года по заказу фирмы NSS Sp. z o. o. в Щецине под надзором DNV.

Схема размещения и размеры фундаментных подкладок из пластмассы представлена на рис. 6.6а. Рисунок 6.6б представляет эскиз амортизатора, установленного на подкладках из пластмассы. По обеим сторонам основания двигателя



Рис. 6.5. Фрагмент эластичного крепления судового двигателя на амортизаторах, установленных на фундаментных подкладках, отлитых из пластмассы EPY

а)



б)

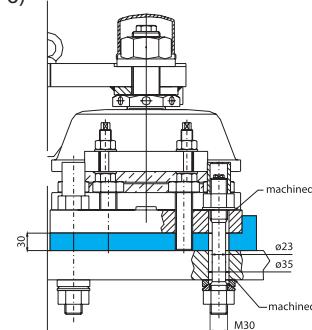


Рис. 6.6. Схема размещения и размеры фундаментных подкладок (а) и посадки амортизатора на подкладке из пластмассы EPY (б)

Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств

при помощи болтов были прикреплены 8 амортизаторов (по 4 с каждой стороны — рис. 6.6а). Размещение двигателя в рабочем положении по высоте было осуществлено при помощи установочных болтов, находящихся в основаниях амортизаторов — (рис. 6.7). Затем, на фундаменте были сделаны литейные формы



Рис. 6.7. Фундаментные подкладки из пластмассы ЕРУ под амортизаторами, установленными под главным двигателем морского судна: а) заливка формы; б) форма после заливки пластмассой; в) готовые подкладки после удаления формы

из листовой стали, уплотненные замазкой (рис. 6.7а, б). В местах, предвиденных для четырёх болтов, крепящих каждый амортизатор к фундаменту, были вставлены втулки из полиуретановой пены, предназначенные для отверстий в подкладке на эти болты. Затем, после проверки положения двигателя, формы были залиты пластмассой. После отверждения пластмассы формы были удалены и таким образом были получены подкладки с гладкими боковыми поверхностями, точно прилегающие к опорным поверхностям фундамента и амортизатора (рис. 6.7в).

Затем были ослаблены установочные болты, а болты, крепящие установку к фундаменту — соответственно натянуты. Выполненный таким образом монтаж этой системы обеспечивает ей высокую точность, стабильность и надёжность, а также устойчивость к воздействию воды, смазочных масел и химикатов.

6.2.2. Дейдвудные трубы гребных валов, втулки подшипников валопровода и баллеров рулей.

Применение жидкой композиции ЕРУ для заливки дейдвудной трубы втулок подшипников валопровода и втулок рулевых баллеров является процессом, проверенным на практике и широко применяемым с 1979 года.

Способ их монтажа представлен в пункте 5.2 настоящей книги. Благодаря многим его достоинствам в настоящее время стал стандартом при постройке и ремонте судов. С 1979 г. до конца 2013 г. было установлено 886 дейдвудных труб и втулок гребных валов с применением пластмассы. Три примера применения пластмассы ЕРУ для этих целей представлены на рисунках 6.8, 6.9 и 6.10.

На рисунке 6.8 представлен пример способа монтажа большой дейдвудной трубы гребного вала на морском судне. Рисунок 6.9 представляет пример монтажа элементов валопровода двухвинтового судна, а рисунок 6.10 — монтажа элементов валопровода и руля морского судна.

Монтаж дейдвудной трубы и руля с применением пластмассы является относительно простым, точным и очень быстрым, а также исключающим центровку и необходимость точной обработки отверстий большого диаметра.

6.2.3. Применение пластмассы для монтажа втулки подшипника судового валопровода

6.2.3.1. Введение

Оговоренный в пункте 6.2.2 способ монтажа дейдвудных труб, втулок подшипников гребных валов и баллеров рулей уже хорошо освоен и проверен на практике, и в настоящее время стал стандартом в судостроении.

В этом пункте будет представлен способ монтажа втулки подшипника судового валопровода, имеющего наружный диаметр равный 1055 мм и длину 4860 мм. Так как этот способ является оригинальным и новаторским решением монтажа большой втулки, будет он здесь оговорен более детально.

Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств

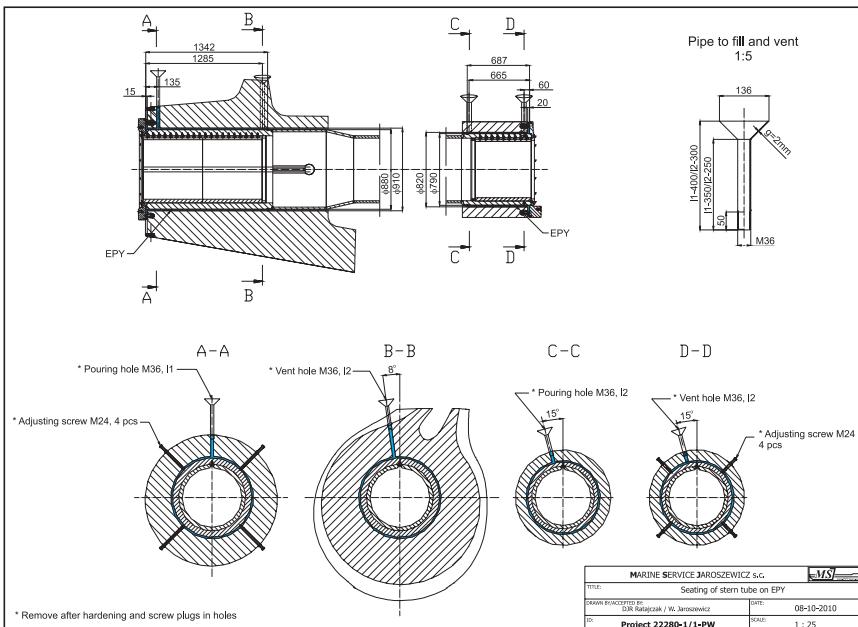


Рис. 6.8. Пример проекта монтажа дейдвудной трубы морского судна

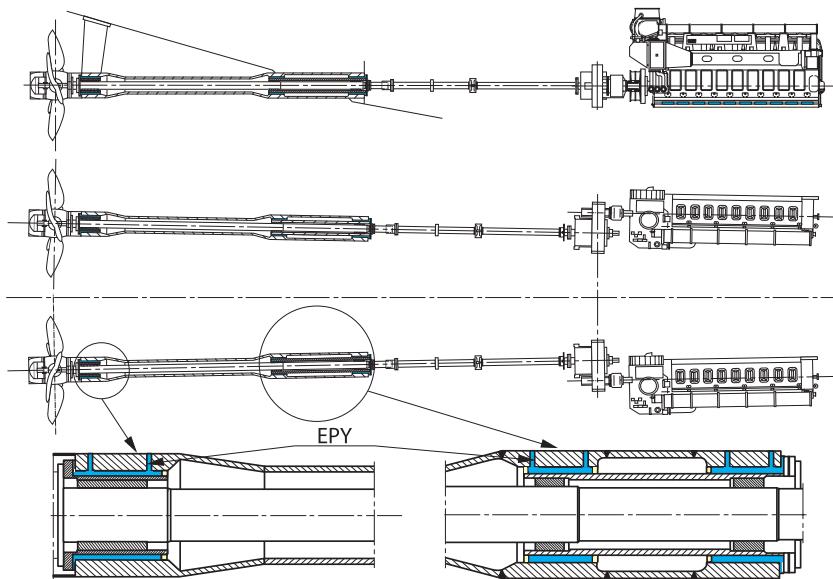


Рис. 6.9. Применение пластины EPY для монтажа валопровода двухвинтового судна

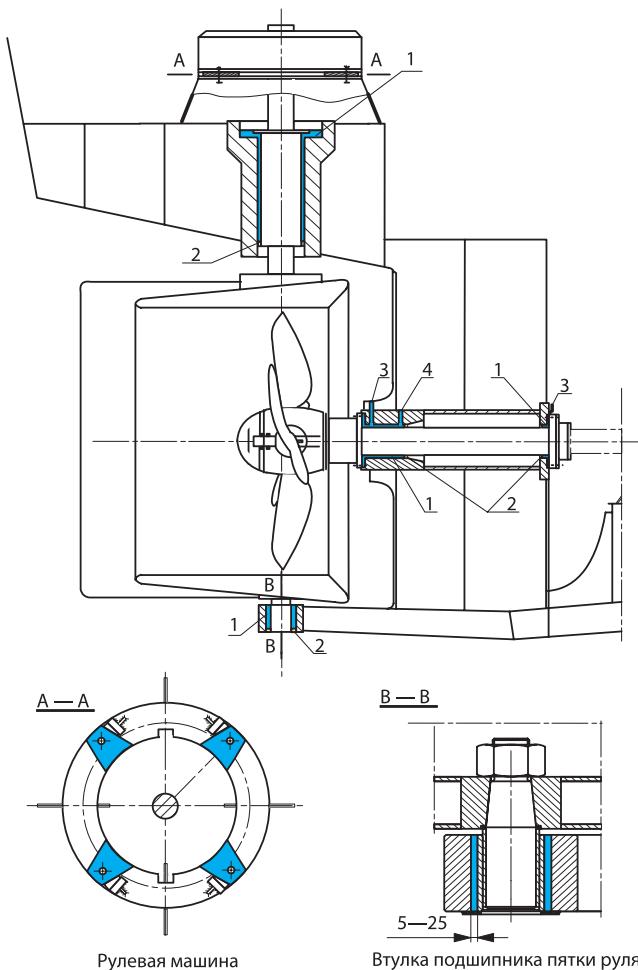


Рис. 6.10. Применение пластмассы ЕРУ для монтажа валопровода и баллера руля морского судна:
1) пластмасса ЕРУ; 2) уплотняющая пена; 3) заливные горловины; 4) переливные отверстия

До сих пор изготовленные из бронзы втулки подшипников осаживались на валопроводах как усадочное соединение. Их монтаж основывается на подогреве втулки и свободном наложении её на валопровод, а затем её охлаждении до температуры окружающей среды. Такое решение было также принято в случае рассматриваемого вала (рис. 6.11) во время постройки судна и две втулки валопровода были осажены методом усадки. Во время генерального ремонта этого судна появилась необходимость замещения одной из них на новую. Но эта же новая втулка, которая должна быть насажена на вал (законченный большим фланцем — рис. 6.11), имела размеры значительно больше, чем другая, которая



Рис. 6.11. Часть гребного вала судна, подготовленная для осадки на нём новой втулки подшипника

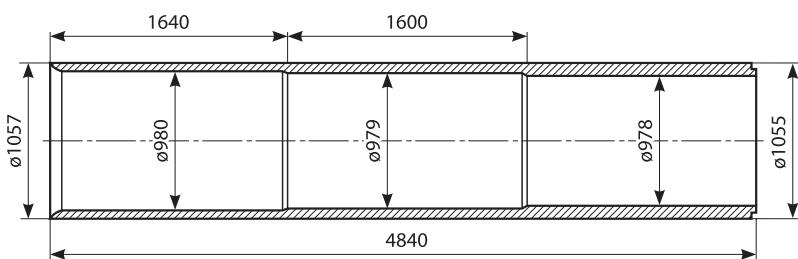


Рис. 6.12. Форма и размеры новой втулки подшипника, предназначеннной для осадки на гребном валу с использованием пластмассы

находилась в хорошем состоянии и оставалась на месте. Форма и размеры новой втулки представлены на рисунке 6.12.

Ремонт судна „Архангельск”, (район плавания Арктика), выполняла эстонская фирма (OÜ Wärtsilä BLRT) из Таллина на китайской верфи (Yiu Lian Dock Yard Ltd, Shenzhen) под надзором Российского морского регистра судоходства. На верфи, которая осуществляла ремонт этого судна, не было возможности насадки такой большой втулки на вал традиционным методом с применением усадки. Тогда было принято решение применить специальную полимерную пластмассу, которая в настоящее время широко применяется для монтажа многих судовых машин и устройств. Фирма, ремонтирующая это судно, обращалась ко многим специализированным фирмам, занимающимся монтажом судовых машин и устройств с использованием пластмассы, но все отказались от выполнения такого рискованного задания. Единственной, которая приняла эту рискованную работу, оказалась фирма Marine Service Jaroszewicz из Щецина.

Объем работ охватывал выполнение проекта способа осаживания втулки на валу и организацию его реализации. Работы были выполнены на китайской верфи, на которой проходил ремонт судна.

6.2.3.2. Проект осаживания втулки на валу

Проект осаживания втулки на валопроводе с использованием пластмассы ЕРУ показан на рис. 6.13. Вал был пустотелым в середине, а его наружный диаметр в месте осаживания втулки изменялся скачкообразно, имея три величины: 968 мм, 967 мм и 966 мм, на протяжении трёх частей его длины, соответственно: 1640 мм, 1600 мм и 1600 мм. Соответственно изменялся внутренний диаметр втулки: 980 мм, 979 мм и 978 мм. Разница диаметров вала и втулки величиной 12 мм оставалась постоянной на всех частях длины вала. Это означало, что заливной зазор для пластмассы имеет высоту 6 мм по всей длине соединения втулки с валом. Эта относительно небольшая величина (по сравнению с длиной втулки) угрожала возможностью выступления неисследованных до сих пор явлений и связанных с этим проблем. Они могли возникать из-за необходимости надле-

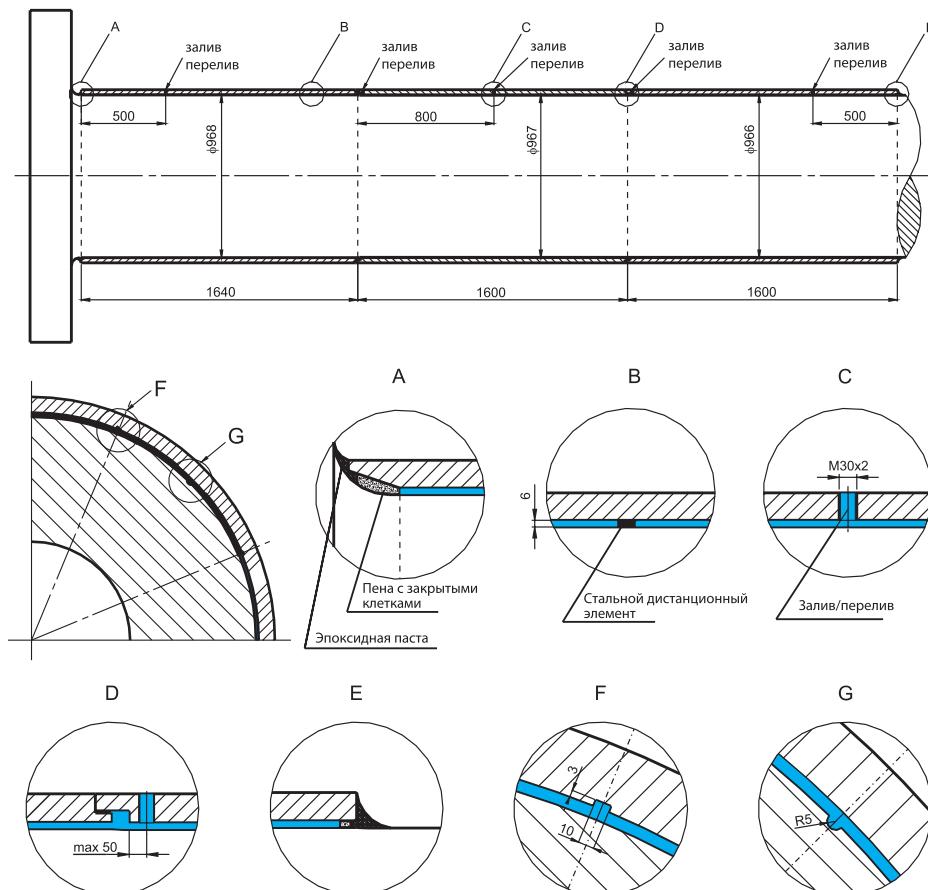


Рис. 6.13. Проект конструкции осадки втулки подшипника на гребном валу судна с применением пластмассы ЕРУ

жащего заполнения заливного пространства и получения качественной отливки малой толщины при её очень большой поверхности.

Из имеющегося практического опыта следовало, что на много меньших длинах втулок заливные зазоры имели высоту 15—20 мм. Эта значительная разница высоты заливного зазора составляла существенную, но не единственную разницу в этом проекте, по сравнению с имеющимся до сих пор опытом.

Полная длина втулки подшипника (рис. 6.12) равнялась 4840 мм, а её наружный диаметр имел постоянную величину по всей длине, равную 1055 мм. Это означало, что толщина её стенки изменялась скачкообразно, имея: 37,5 мм, 38,0 мм и 38,5 мм. Учитывая трудности при подготовке одной длинной втулки, имеющей скачкообразную толщину, и трудности осажения её на вал, предложено изготовление трёх отдельных втулок, которые — после осажения их на вал — будут соединены на закладку (рис. 6.13, деталь D), создавая одну сплошную втулку. С целью получения соосности втулок с валом и одинаковой высоты заливного зазора на поверхности вала были приварены 24 дистанционных элемента высотой 6 мм (рис. 6.13, деталь В). Эти элементы видны на рис. 6.15.

Перед монтажом на верхней части втулок вы сверлено и нарезано пять отверстий (M30) для помещения в них заливных и переливных трубок (рис. 6.13, деталь С и D). На обоих концах втулок были предусмотрены уплотнения (рис. 6.13, деталь А и Е): внутренние — из полиуретановой пены (для пластмассы) — а также постоянные наружные уплотнения, предохраняющие соединения от попадания через них морской воды. Эти уплотнения были выполнены из эпоксидной пасты (Phillybond Orange Sealant Resin, ITW Philadelphia Resins), предназначеннной специально для этой цели. В этих уплотнениях предусмотрено выполнение четырёх контрольных вентиляционных отверстий (внизу, в середине высоты и вверху), которые во время заливки были уплотнены немедленно после появления в них жидкой пластмассы.

Соединения внакладку отдельных частей втулки были уплотнены по окружности самокрепящейся лентой. В наивысших пунктах этих уплотнений также были предусмотрены контрольные вентиляционные отверстия, которые во время заливки были уплотнены после появления в них пластмассы.

Отвердевшая пластмасса, заполняющая заливное пространство, должна обеспечить не только стабильность соединения, но и перенос момента вращения, действующего на втулку. Принято, что обводные силы, действующие на соединения втулок, будут перенесены выступами пластмассы, находящимися в продольных шпоночных канавках, выполненных на внутренней поверхности втулок и на наружной поверхности вала.

С этой целью вдоль поверхности вала и вдоль внутренней поверхности втулки сделано восемь канавок, расположенных по периметру на 45° друг от друга. Формы и размеры этих канавок показаны на рис. 6.13. Заполненные канавки после отверждения пластмассы создали многошпоночное соединение вала с втулкой.

Выступы пластмассы в канавках подвергаются сдвигу и поверхностным нагрузкам. Величина этих сил была проверена расчётами, принимая за основу следующие исходные данные:

максимальная мощность на валопроводе	$P = 15400 \text{ кВт}$
обороты вала	$n = 120 \text{ мин}^{-1}$
плечо приложения касательной силы	$R = 483 \text{ мм}$
ширина шпонки	$B = 10 \text{ мм}$
глубина шпонки на вале	$H_w = 3 \text{ мм}$
глубина шпонки во втулке	$H_t = 5 \text{ мм}$
количество шпоночных канавок (по периметру)	$n_r = 8$
сопротивление сдвигу пластмассы	$R_t = 59,1 \text{ МПа}$
сопротивление сжатию пластмассы	$R_c = 169 \text{ МПа}$
момент вращения валопровода	

$$M_o = 9550 \cdot 10^3 \frac{P}{n_w} = 1225583 \text{ Нм} \quad (6.1)$$

касательная сила на поверхности стыка вала с пластмассой

$$F_T = \frac{M_o}{R} = 2537438 \text{ Н} \quad (6.2)$$

напряжение сдвига

$$\tau = \frac{F_T}{n_r B L_T} = \frac{2537438}{8 \cdot 10 \cdot 4840} = 6,55 \text{ МПа} \quad (6.3)$$

поверхностная нагрузка

$$p = \frac{F_T}{A_p} = \frac{2537438}{8 \cdot 3 \cdot 4840} = 21,84 \text{ МПа} \quad (6.4)$$

коэффициент безопасности сдвига

$$n_\tau = R_t / \tau = 8,95 \quad (6.5)$$

коэффициент безопасности действия поверхностной нагрузки

$$n_p = R_c / p = 7,74 \quad (6.6)$$

Из вышепредставленных расчётов следует, что величины коэффициентов безопасности сдвига и поверхностной нагрузки, учитывая экстремальную нагрузку втулки подшипника полным моментом вала, указывают высокий уровень безопасности конструкции.

Необходимо подчеркнуть, что вышепредставленные расчёты были выполнены с учётом крайне неблагоприятных условий работы рассматриваемой установки. Однако при их выполнении не учтены действия сил адгезии и сил трения пласт-

массы на контактных поверхностях с валом и втулкой, которые в действительности также выступают, но это действует в сторону увеличения запаса безопасности этого соединения. В расчётах принято, что на соединение пластмассы с валом и втулкой действует максимально возможная величина момента вращения со стороны двигателя. В нормальных условиях эксплуатации судна вал передаёт момент вращения движителю (гребной винт) и только небольшая его часть передаётся на преодоление сил трения, выступающих в подшипниках. Из этого следует, что действительные величины коэффициентов безопасности сдвига и поверхностной нагрузки для пластмассы в нормальных условиях эксплуатации будут в несколько раз больше, чем фактически определённые для аварийной ситуации работы подшипника, когда обороты вала в подшипнике будут внезапно полностью заблокированы, хотя выступление такой ситуации маловероятно.

Следовательно можно сделать вывод, что запроектированное соединение втулки с валопроводом с использованием пластмассы EPY выполнило условия безопасности с очень большим запасом.

6.2.3.3. Испытания на модели

Несмотря на имеющийся уже более 30-летний опыт в монтаже судовых машин и устройств с применением пластмассы, решено провести модельные испытания этого проекта с целью определения практических возможностей его реализации.

Исследуемая модель осадки втулки на валу с применением пластмассы EPY показана на рис. 6.14. Её диаметр имел величину 1000 мм, а длина — 2000 мм. Высота заливного зазора равнялась 4 мм, что было обеспечено размещением соответственных дистанционных элементов. Это означает, что условия, принятые для модели, были более сложными, чем для действительного объекта и касаются главным образом ограничения на 2 мм высоты заливного пространства.

Модель вала была сделана из дерева (модельной фанеры, намотанной на круглые щиты и укреплённой рёбрами). С целью обеспечения наблюдения за процессом наполнения заливного пространства жидкой пластмассой втулка была сделана из плексигласа. В верхней части втулки были сделаны два отверстия, в которые были вставлены трубы, заканчивавшиеся воронками, служащие в качестве заливной или переливной горловин для жидкой пластмассы. Расстояние между отверстиями горловин были такими же как и в действительной системе. Длина трубок 500 мм должна была обеспечить гидростатическое давление, необходимое для наполнения заливаемого пространства пластмассой, а также создать запас, необходимый для пополнения её убытков в заливаемом пространстве, вплоть до момента отверждения пластмассы. Существенной в этом эксперименте была проверка процесса заливки через одно отверстие, а также проверка способа и скорости распространения пластмассы и возможности хорошего заполнения всего заливного пространства до начала процесса её гелеобразования. Очень важным было также определение времени, необходимого



Рис. 6.14. Модельное исследование хода и времени заполнения жидкой пластмассой ЕРУ заливной щели между валом и втулкой

для выполнения всего процесса при определённой температуре. Уплотнение заливаемого пространства по краям было выполнено из полиуретановой пены, пропускающей воздух. Это создавало условия добавочного отвода воздуха из заливаемого пространства во время процесса его заполнения.

Важным фактором в этом эксперименте была проверка способа распространения пластмассы в заполняемом пространстве, а также качества образовавшейся отливки после её отверждения в условиях окружающей среды.

Результаты этого эксперимента оказались очень пригодными при последующей доработке многих деталей способа осадки действительных втулок на валопроводе судна. В способах монтажа элементов конструкции с использованием пластмассы есть много важных деталей, которые могут влиять на успех или провал этого рода конструктивных решений.

6.2.3.4. Подготовка элементов конструкции и их монтаж

Элементы втулки подшипника представлены на рис. 6.13, а часть вала, на котором они были насыжены, — на рис. 6.15. На внутренней поверхности втулки

и наружной поверхности вала были нарезаны восемь продольных канавок, форма и размеры которых показаны на рис. 6.13 (детали F и G). На поверхности вала были приварены соответственно расположенные 24 дистанционных элемента. Их высота 6 мм обеспечивала надлежащее расположение втулки по отношению к валу и равномерную высоту заливного зазора по всей длине втулки. Эти элементы были несколько перекошены (рис. 6.15г) с целью облегчения надвига втулки на вал.

Внутренние поверхности втулки были обработаны на расточном станке под надлежащий размер. Поверхность вала была тщательно очищена абразивной бумагой. Непосредственно перед монтажом втулки на вал их поверхности были тщательно обезжирены ацетоном.

Общий вид вала и первого отрезка втулки (подвешенного на подъёмном кране) показаны на рис. 6.16а. Втулка закладывается на тонкий конец вала, который в это время находился на роликовой опоре, на некотором расстоянии от конца



Рис. 6.15. Части втулки подшипника и гребного вала с нарезанными канавками и приваренными дистанционными элементами

вала (рис. 6.16б). Затем, после надлежащего закрепления свободного конца вала и раздвижения роликов на опоре (рис. 6.16б), втулка перемещалась при помощи подъёмного крана вдоль вала до её крайнего положения. Подобным образом закладывались на вал и перемещались по нему два следующих отрезка втулки, которые соединялись друг с другом на закладку. Монтаж третьего отрезка втулки представлен на рис. 6.16в.

Центровка втулки и заливного зазора обеспечивали дистанционные элементы, приваренные к валу (рис. 6.15г), а сохранение на них небольшого дополнительного зазора делало возможным перемещение втулок. На наружных периметрах втулок имелся тоже небольшой припуск на отделочную обработку в конце их монтажа.

После соединения отдельных частей втулки ввинчивались в них стальные заливные и переливные трубы с приваренными к ним воронками. На концах и соединениях отдельных частей втулки были сделаны уплотнения заливного пространства (рис. 6.13). Система вал-втулка, подготовленная для заливки пласти массой, показана на рис. 6.17а. Длина заливных и переливных трубок вместе



Рис. 6.16. Ход посадки отдельных отрезков втулки на подшипник вала

с воронками была равна 650 мм и подобрана таким образом, чтобы создать и удержать гидростатическое давление, необходимое для надлежащего заполнения заливного пространства. Важной деталью конструкции устройства являлся объём заливной и переливной систем, а также заливаемого пространства. Это было необходимо для пополнения убытков объёма этого пространства, возникающих из-за податливости уплотняющей пены, усадки пластмассы во время её отверждения и по разным другим причинам.

Температура в цеху во время работ равнялась 20—24°C. Перед заливкой пластмассы было решено увеличить её примерно до 30°C, что должно было привести к лучшему и более быстрому заполнению заливного пространства. Место работ было прикрыто брезентом и подогрето надувом тёплого воздуха в течение 24-х часов. В начале заливки измеренная температура втулки равнялась 27°C, а заливаемой пластмассы 30°C. Заливка пластмассы проводилась одновременно через три отверстия: два крайних и одно центральное (рис. 6.17а). Способ заливки пластмассой показан на рис. 6.17б. Заливка выполнялась непрерывно и равномерно.



Рис. 6.17. Состав, подготовленный к заливке пластмассой (а), и способ заливки (б)

Количество пластмассы было определено раньше. Во время заливки на конечных и промежуточных уплотнениях втулки, являющихся добавочными воздухоотводами заливаемого пространства, велось наблюдение за правильностью его заполнения пластмассой. После появления в них пластмассы они уплотнялись. Заливка длилась три часа. После заполнения заливного пространства, в течение двух часов велись наблюдения над пунктами залива и перелива и доливались новые порции пластмассы для пополнения её убытков и поддержания соответствующего гидростатического давления в заливном пространстве. Общее количество залитой пластмассы равнялось 98,6 л. Через два часа закончился процесс снижения уровня пластмассы в заливных и в переливных отверстиях. По истечении следующих 12 часов были удалены заливные и переливные трубы,

а также уплотнения из самоклеящейся ленты на стыках втулки. Отверстия, оставшиеся от заливных трубок, были заглушены навинченными пробками, изготовленными из той же самой бронзы, из которой были сделаны втулки.

Во время заливания и отверждения пластмассы не наблюдалось повышение температуры втулки, отверждение проходило при температуре окружающей среды (20—24°C) и продолжалось 36 часов.

Твёрдость пластмассы, измеренная на специально отлитых образцах, равнялась 42—46°В. Проверка заполнения залитого постранства была проведена остукиванием, а в сомнительных местах, указанных инспектором надзора, выполнением контрольных отверстий. Районы с отсутствием пластмассы не были обнаружены. После окончания монтажных работ поверхность втулки подвергалась финальной обработке и удалению имеющихся на её поверхности небольших припусков.

6.2.3.5. Финальные выводы и замечания

Вышепредставленное новаторское осаживание большой втулки подшипника на валопроводе морского судна с использованием для этой цели эпоксидной пластмассы EPY, выполненное на основе разработанного фирмой MSJ собственного оригинального проекта, закончилось большим успехом. После более годовой эксплуатации подшипника валопровода судна с новой втулкой от судовладельца получено письменное подтверждение правильности поведения отремонтированного вышеописанным способом кормового подшипника валопровода. До сих пор, т.е. в течение более четырёх лет эксплуатации установки, не предъявлено ни одного замечания по отношению к правильности монтажа втулки вышеописанного подшипника.

Результаты этой работы показали одну из возможностей практического применения пластмассы EPY для решения сложных задач, появляющихся постоянно на практике во время постройки и ремонта морских судов.

Благодаря разработке специальных полимерных пластмасс удалось решить много сложных проблем в области монтажа машин и устройств, которые раньше причиняли много хлопот конструкторам, верфям и судовладельцам. В некоторых случаях их применение было единственным способом решения задач, появляющихся на практике.

6.2.4. Палубные устройства

Фундаментные подкладки, литые из пластмассы, применяются не только при монтаже машин и устройств, находящихся в закрытых помещениях, под палубой, но также для монтажа устройств, работающих на открытых палубах. Пластмасса EPY характерна также высокой стойкостью к длительному воздействию атмосферных условий. Она пригодна для монтажа разного рода лебёдок: якорных (брашпилей), буксирных, швартовых и тральных. На рис. 6.18 представлен лайнер „FANTAZY“, на котором были установлены лебёдки Pusnes 102V14725

Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств



Рис. 6.18. Экскурсионное судно „Fantasy“ со швартовной лебёдкой, установленной на его палубе на подкладках ЕРАХ

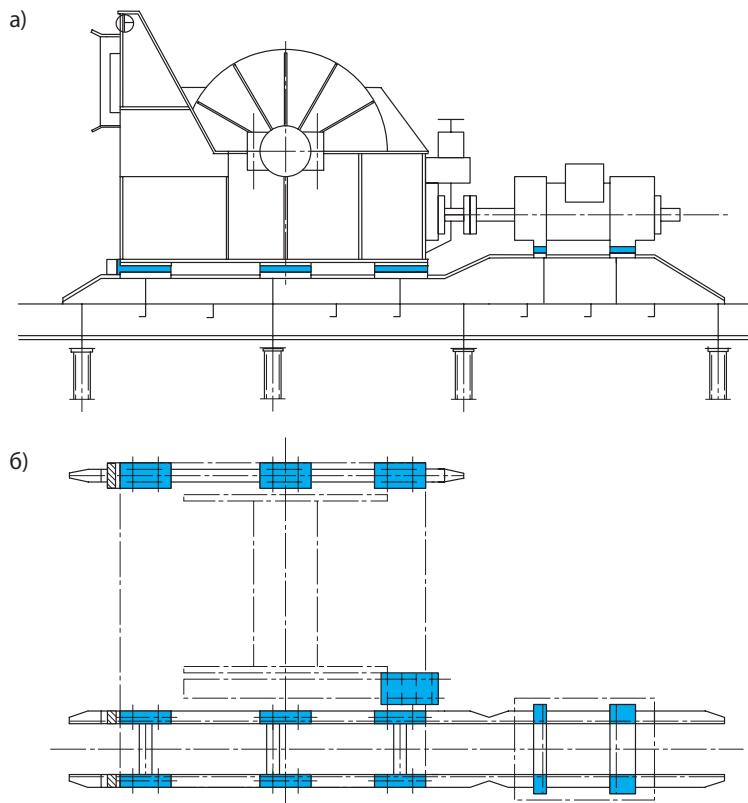


Рис. 6.19. Пример монтажа тралльной лебёдки на подкладках из пластмассы ЕРУ: а) схема монтажа лебёдки на фундаменте; б) размещение фундаментных подкладок

на подкладках, изготовленных из польской пластмассы ЕРАХ. Пример монтажа швартовной лебёдки показан на рис. 6.19.

Количество подкладок, применяемое при монтаже лебёдок, разное и зависит от типа лебёдки и её размеров, и может состоять из нескольких единиц или нескольких десятков штук.

На фотографии (рис. 6.20а) показано морское судно с кранами на колоннах, а на рис. 20б — упрощённая схема такого крана. Кран установлен на крупногабаритном шаровом подшипнике ($D = 2500$ мм).

Рис. 6.20в представляет традиционный способ монтажа подшипника, основанный на точной механической пригонке соединяемых поверхностей, а рис. 6.20г показывает установку того же самого подшипника на тонком (1—3 мм) слое пластмассы ЕРУ. Способ монтажа подшипника иллюстрирует рис. 6.21.

Благодаря применению во время монтажа жидкой пластмассы, избыток которой вытесняется по бокам, после её отверждения получается очень хорошая пригонка соединяемых поверхностей, без необходимости применения трудоёмкой механической пригонки поверхностей. Таким образом, сокращается время и стоимость монтажа, а работа установленного таким способом подшипника отличается высокой надёжностью.

6.2.5. Монтаж цистерн на палубах судов

Полимерные пластмассы оказались пригодными также при монтаже разного рода больших цистерн на палубах или внутри корпусов морских судов. Для иллюстрации пригодности применения для этой цели пластмассы здесь будет показано несколько примеров выполнения таких работ.

На рис. 6.22 представлена первая в мире плавучая платформа „Odyssey“ с пусковой ракетной установкой типа „Sea Launch“ для запуска на орбиту Земли телекоммуникационных спутников. Она была создана в рамках международной программы, в которой принимали участие: США (Boeing), Россия (Энергия), Украина (Южное), и Норвегия (Kvaerner). На платформе, построенной на верфи «Выборгский судостроительный завод», в России, в 1998 г, находятся две цилиндрические цистерны с ракетным топливом, каждая длиной 40 м и массой 80 тонн. Эти цистерны были установлены на палубе платформы с использованием фундаментных подкладок из пластмассы ЕРУ.

Каждая из этих цистерн опрета на четырёх фундаментах. В местах опор с цистернами были приварены стальные опоры (лапы). Монтажные поверхности фундаментов и опор (лап) сначала были механически обработаны и были плоскими, однако во время сварки подверглись значительным деформациям. Это сделало невозможным правильный монтаж цистерн с использованием для этой цели металлических подкладок. Хорошая пригонка к большим (1 m^2) деформированным поверхностям фундамента и лап цистерны была практически невыполнимой. В этой ситуации в ускоренном (аварийном) порядке были при-

Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств

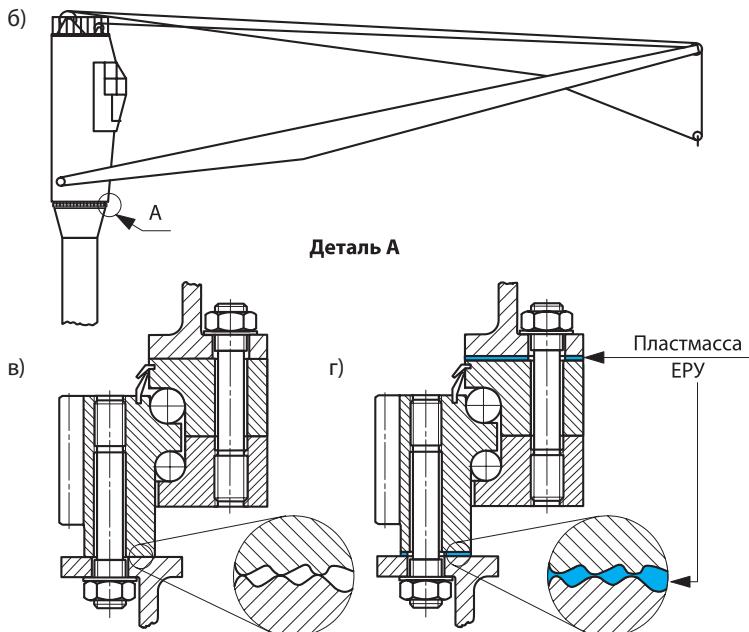


Рис. 6.20. Применение пластмассы ЕРУ для монтажа вращательных палубных кранов, установленных на колоннах: а) общий вид судна серии В567, построенного на Щецинской верфи; б) схематичный вид крана; в) крепление подшипника ($D = 2500$ мм) традиционным способом; г) крепление того же подшипника с применением тонкого слоя пластмассы ЕРУ

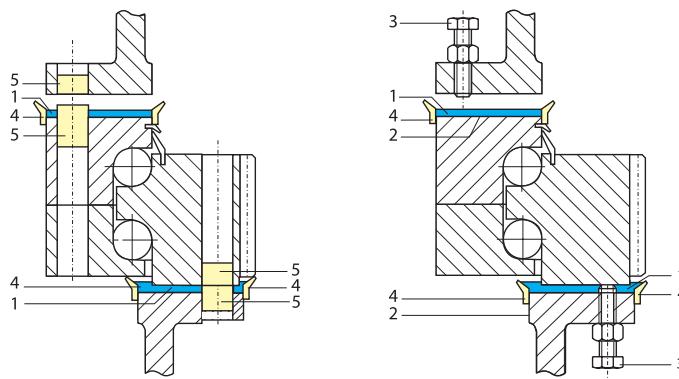


Рис. 6.21. Способ монтажа крупногабаритных подшипников качения с применением пластмассы EPY: а) сечение, предотвращающее вытекание пластмассы; б) сечение, показывающее винты регулировки положения подшипника; 1 — слой пластмассы EPY, 2 — поверхность прилегания подшипника, 3 — регулировочный винт, 4 — уплотнение краев, 5 — пробки из пеновой пластмассы



Рис. 6.22. Плавающая пусковая установка метеорологических ракет „Sea Launch“ с цистернами ракетного топлива, установленными на подкладках из пластмассы EPY

менены фундаментные подкладки из пластмассы ЕРУ, литые непосредственно под соответственно установленными цистернами. Это решение оказалось очень быстрым и простым в реализации, а также надёжным в эксплуатации. Оно дало гарантию идеальной автоматической припасовки друг к другу всех поверхностей стыка установки.

Пластмасса ЕРУ оказалась также пригодной при монтаже цилиндрических цистерн на палубе судов, предназначенных для транспорта жидким химикалий. В 2001—2007 гг. на Щецинской верфи в Польше было построено восемь судов такого типа B588, дедвейтом ок. 50000 тонн (рис. 6.23). В то время они были самыми большими в мире судами, предназначенными для транспорта химикалий.



Рис. 6.23. Судно для транспортировки жидким химикалий типа B588, построенное Щецинской верфью, с палубными цистернами, установленными на подкладках из пластмассы ЕРУ

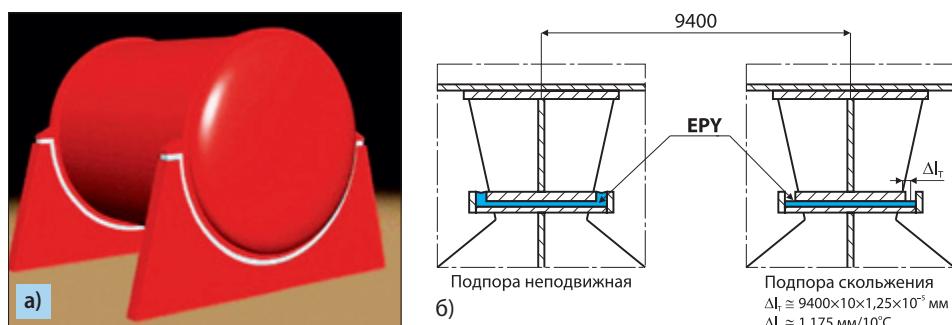


Рис. 6.24. Общая схема монтажа цистерны на палубе судна (а) и эскизы постоянной и скользящей подпоры цистерны (б)

Каждое судно имеет 40 цистерн общей ёмкостью 52000 м³, изготовленных из нержавеющей стали, из чего 34 являлись интегральной частью конструкции корпуса судна, а 6 цилиндрических цистерн были установлены на палубе судна (рис. 6.23). Судовладельцем этих судов является компания Odfjell Seachem из г. Берген (Норвегия).

Цистерны, находящиеся на палубе этих судов, это цилиндрические цистерны диаметром 5,3 м и длиной 17,12 м, каждая ёмкостью 377,7 м³ и массой (с грузом) 422 тонн. Каждая из этих цистерн установлена на двух полукруглых фундаментах, покрытых слоем пластмассы EPY по схеме, показанной на рис. 6.24а.

Каждая цистерна была закреплена при помощи четырёх болтов (M56×5,5). На одной опоре была закрепленаочно, а на другой могла перемещаться (рис. 6.24б), что было возможно благодаря применению овальных отверстий в лапах цистерны для крепёжных болтов.

Монтаж цистерн на судне представлен на рис. 6.25. После монтажа цистерны и уплотнения заливного пространства между цистерной и опорами фундамента (рис. 6.25а), его заливали жидкой пластмассой, перемешенной с отвердителем. Заливка велась сверху, через зазор при плоской опоре (рис. 6.25в). На рис. 6.25г представлена лата цистерны с отлитой на ней подкладкой. В период с 2001 г. по 2008 г. на таких судах было установлено 48 таких цистерн.

Здесь следует подчеркнуть, что все главные двигатели и дейдвудные трубы гребных валов этих судов были установлены на пластмассе EPY. Это были двигатели H. Cegielski-Wärtsilä NSD-6RTA 58TB мощностью 12750 kW, высотой 11 м, длиной 8 м, шириной основания 4 м и массой 322 тонны. Всего на этих судах пластмасса EPY была применена при монтаже 64 объектов разных типов. Все работы были выполнены под надзором DNV, а отсутствие, по сегодняшний день, всяких рекламаций означает их отличное выполнение.

На рис. 6.26 представлен монтаж двух цистерн, предназначенных для транспорта сжиженных газов LNG/LPG, диаметром ок. 12 м и длиной ок. 36 м, ёмкостью 3700 м³ и массой более 300 тонн с использованием пластмассы. Эти цистерны были установлены на судне ёмкостью ок 7500 м³, построенном Гданьским судоремонтным заводом.

Монтаж этих цистерн внутри корпуса судна был выполнен двумя плавучими кранами общей грузоподъёмностью более 500 тонн (рис. 6.26).

В настоящее время MSJ является единственной фирмой в Польше, имеющей кадры, опыт и все необходимые сертификаты, позволяющие выполнять монтаж подобных устройств на морских судах с применением пластмассы.

Каждая из этих цистерн была установлена на двух полукруглых фундаментах с применением пластмассы Erocاست 36-R, имеющей консистенцию замазки. Монтажные работы были проведены постепенно, этапами. Сначала была определена толщина слоя пластмассы в отдельных местах фундаментов цистерн. Затем в нескольких местах фундамента были наложены порции замазки

Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств



Рис. 6.25. Монтаж цистерны на палубе судна: а) и б) общий вид цистерны во время монтажа; в) заливка заливного пространства пластмассой; г) лата цистерны на подкладке из пластмассы, отлитой на верхней плоской поверхности фундамента цистерны



Рис. 6.26. Цистерны для транспорта сжиженных газов LNG и LPG, устанавливаемые на судне

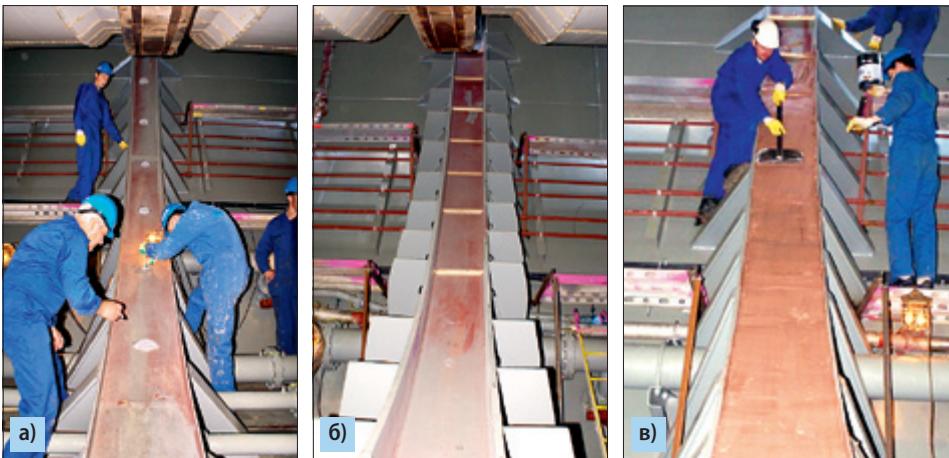


Рис. 6.27. Подготовка фундамента для монтажа на нём цистерны сжиженного газа (внутри корпуса судна)

толщиной большей, чем толщина пластмассы для расчетных фундаментных подкладок. Следующим этапом работ было опускание цистерны на высоту над фундаментом, на которой она должна быть установлена, что позволило прижать наложенную замазку на высоту, предвиденную для финального положения цистерны. Затем цистерна была поднята, высоты придавленной замазки измерены (рис. 6.27а), а замазка удалена. На основании полученных замеров высот были определены высоты подкладок в данных местах фундамента, с учётом профиля цистерны, так чтобы обеспечить надлежащее её прилегание к полной поверхности подкладки и чтобы избежать выдавливания излишнего количества пластмассы по бокам. Избыток выдавленной пластмассы влечёт за собой потери материала и портит эстетику выполненных работ. На наклонной части фундамента, поперёк его поверхности было приварено несколько металлических полос (рис. 6.27б), чтобы предотвратить сплыивание наложенной пластмассы. На рис. 6.27в показано накладывание слоя пластмассы (Eopcast 36-P) на ложе (фундамент).

После наложения слоя пластмассы на две ложи, с определённой раньше толщиной в каждом месте соприкосновения, цистерна была опущена до её финального положения (рис. 6.28а).

Показанное на рис. 6.28б небольшое количество выжатой пластмассы и её равномерное распределение является доказательством того, что толщина наложенного слоя была правильной.

Накладывание пластмассы и окончательное размещение цистерны должны были быть выполнены в течение времени, когда пластмасса сохраняет ещё свои

Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств



Рис. 6.28. Установливание цистерны на фундаменты, покрытые пластмассой (а) и фрагмент фундамента с заметной пластмассой, выдавленной из фундамента во время монтажа цистерны (б)



Рис. 6.29. Работники верфи и фирмы MSJ, участвующие в монтаже цистерн на судне NB 604/1, на Северной Верфи в Гданьске (июнь 2008)

пластические свойства. Для этого требовалось участие необходимого количества работников для перемешивания и накладывания пластмассы одновременно во многих местах, а также требовалась синхронность всех работ. Они были выполнены многочисленным коллективом сотрудников под руководством dra inż. Jędrzeja Ratajczaka. На фотографии (рис. 6.29) представлены работники Гданьского судоремонтного завода и Северной верфи в Гданьске, а также фирмы MSJ из Щецина, которые принимали непосредственное участие в монтаже цистерн на судне B 604/1.

Все стороны, заинтересованные качественным результатом выполнения этого задания, подтвердили своё удовлетворение.

Позднее (в 2013 году) были выполнены монтажные работы двух очень больших цистерн на судне B 787 для перевозки газов ёмкостью 9000 м³ (рис. 6.30а). Это судно с названием „Syn Antares“ было построено на верфи Gdańsk S.A. (Польша) для итальянского судовладельца Cantiere Navale di Pesaro.

Внутри корпуса этого судна, которое показано на рис. 6.30б, были установлены две большие цистерны, каждая массой около 500 тонн, диаметром 12,14 м. Длина носовой цистерны была равна 42,525 м, а кормовой — 42,00 м. Цистерны были построены итальянской группой Gas and Heat. Монтаж цистерн был реализован в сухом доке SD2 верфи Gdynia. Монтаж цистерны в корпусе судна показан на рис. 6.30б.



Рис. 6.30. Цистерна массой 500 тонн (а) в процессе монтажа внутрь корпуса судна „Syn Antares“ (б)

Каждая из цистерн была размещена на двух ложах с использованием пластмассы Phillymatic TG-7B (производства ITW Polymer Technologies, USA). Монтаж в основном был таким же, как в случае цистерн, раньше установленных с применением пластмассы Eocast-36Р. Однако здесь появились некоторые существенные различия. Монтаж предыдущих цистерн проводился в июле, в благоприятных для пластмассы температурных условиях. Монтаж же этих цистерн был выполнен 25 и 26 января при окружающей температуре -10°C , что вызвало много разных трудностей при его выполнении. Из-за того, что применение пластмассы требует надлежащей положительной температуры как для её накладывания и для разведения на монтажной поверхности ложа, так и надлежащего её отверждения, необходимо было подогревание и удерживание соответствующей температуры в течение долгого времени. Но эту проблему надлежащим способом решила верфь, что позволило выполнить монтажные работы в течение двух дней.

Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств



а)



б)

Рис. 6.31. Фрагменты монтажных работ, показывающих процесс накладки пластмассы на опорную поверхность фундамента цистерны (а) и прикрытия её тefлоновой фольгой (б)

На рис. 31а и 31б представлены некоторые фрагменты монтажных работ. Они показывают накладывание пластмассы на опору цистерны, а также накладывание тefлоновой фольги на поверхность наложенной пластмассы. Наложение этой фольги на одной подпоре означает создание на ней поверхности скольжения, позволяющей цистерне на продольное передвижение, выступающее в случае изменения температуры её конструкции.

Монтаж этих цистерн, несмотря на неблагоприятные температурные условия, был проведен согласно плану и закончился успехом. Это было результатом хорошо организованной работы и полного сотрудничества Гданьской верфи и фирмы MSJ, выполняющей все монтажные работы с использованием пластмассы. В реализации этого задания принимали участие 32 сотрудника Гданьской верфи и 22 сотрудника фирмы MSJ.

6.2.6. Применение пластмассы на морских плавучих буровых платформах

Пластмасса EPY получила широкое применение не только при постройке и ремонтах морских судов, но и при монтаже большого количества разных машин и устройств на морских буровых платформах. Всего на морских платформах на подкладках из пластмассы были установлены 143 разных объекта. Это были: лебёдки, электродвигатели, генераторы, насосы, подшипники, цистерны и другие вспомогательные устройства. Платформы, на которых были выполнены обсуждаемые здесь монтажи, показаны на фотографиях (рис. 6.32—6.35). В описаниях этих снимков поданы названия этих платформ, а также некоторая информация об установленных на них объектах.



Рис. 6.32. Буровые платформы „Petrobaltic“ и „Baltic Beta“; на первой из них якорная лебёдка (1984) и генератор (1994) были установлены на подкладках из пластмассы; работы были выполнены на судоремонтном заводе „Radunia“; на второй платформе подобным образом были установлены три генератора типа WAB 1240 D6, а также три подшипника; эти работы были выполнены в морских условиях (2004—2005)



Рис. 6.33. На буровой платформе „Bredford Dolphin“ на подкладках из пластмассы был установлен электродвигатель главного привода; работа была выполнена на заводе Gdańska Stocznia Remontowa под надзором DNV



Рис. 6.34. На буровой платформе „Полярная Звезда“ на подкладках из пластмассы были установлены 61 насос и другие вспомогательные устройства; работы были выполнены на верфи „Vyborg Shipyard“ (Россия, 2009)



Рис. 6.35. На буровой платформе „Северное Сияние“ на подкладках из пластмассы были установлены 61 насос и другие вспомогательные устройства; работы были выполнены на верфи „Vyborg Shipyard“ (Россия, 2010)

Примеры применения пластмасс при монтаже судовых машин и устройств

6.2.7. Монтаж роликовых путей вращательного барабана и крестовины ковша на судне, предназначенном для укладки кабеля на морском дне

Одним из более оригинальных практических применений пластмассы ЕРУ был монтаж на изготовленных из неё фундаментных подкладках линий роликовых путей вращательного барабана на палубе морского судна, предназначенного для укладки энергетического кабеля на морском дне. Общий вид этого судна представлен на рис. 6.36.

Это судно было построено на Корейской верфи STX (в 2011 г.) с предназначением для засыпки щебнем и камнем кабелей и трубопроводов, уложенных на морском дне (stone dumping vessel). Его переоборудование на кабельное судно



Рис. 6.36. Судно для укладки кабеля на морском дне „Willem de Vlamingh“



Рис. 6.37. Линии роликовых путей, являющихся подпорой вращательного барабана с намотанным на нём кабелем: а) общий вид; б) фрагмент

(cable lying vessel) и общий ремонт были выполнены фирмой Elektromontaż-Połnoc Gdynia Sp. z o.o. (Польша) в 2013 году. Во время переоборудования судна с него были удалены старые устройства и установлены новые, служащие для укладки кабеля на морском дне.

На палубе этого судна был установлен вращательный барабан диаметром 28 м, вмещающий 5400 тонн энергетического кабеля. Барабан был сделан шотландской фирмой Caley Ocean System и перевезен в сухой док верфи Gdynia, где был установлен на палубе судна.

Для обеспечения возможности вращения этого барабана на палубе нужно было построить пять круговых концентрических дорожек, на которых были размещены ролики, по которым перемещался барабан во время его вращения вокруг вертикальной оси (рис. 6.37). Ролики были закреплены на подшипниках, которые переносили вес барабана с намотанным на нём кабелем и делали возможным вращение всей этой массы. Вся эта линия после тщательного выравнивания поверхности опор всех роликов с помощью геодезических инструментов и установочных болтов была смонтирована на палубе судна с использованием фундаментных подкладок, литых из пластмассы EPY. Все работы, касающиеся мон-

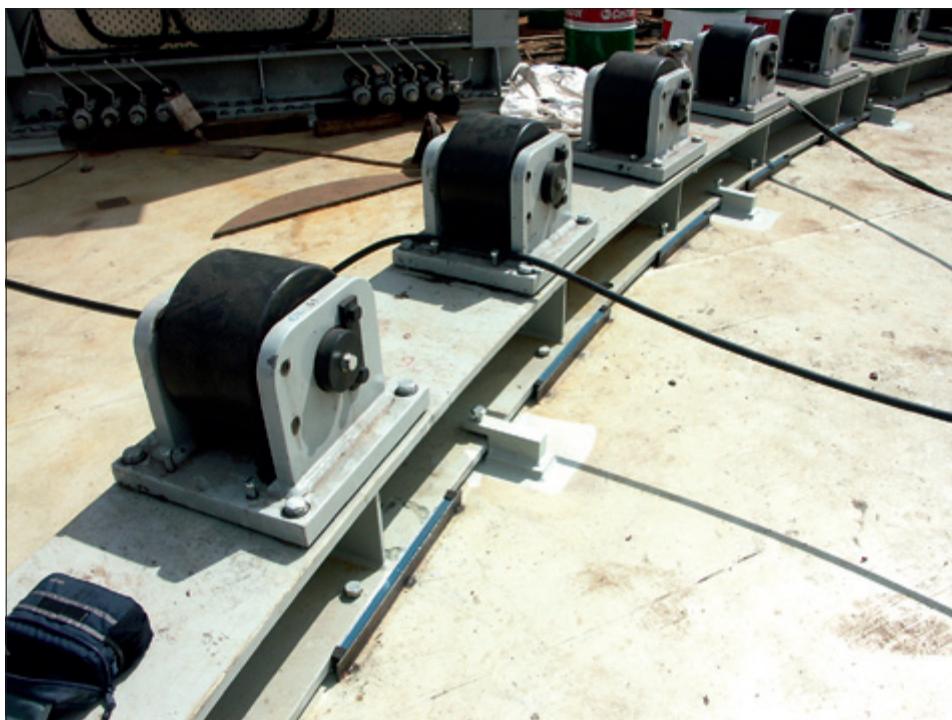


Рис. 6.38. Фрагмент пути, показывающий ролики и подкладки из пластмассы EPY

тажа роликовых линий, были выполнены сотрудниками фирмы, осуществляющей переоборудование этого судна, но закладка форм и отливка подкладок были выполнены сотрудниками фирмы MSJ под надзором инспекторов Bureau Veritas.

Полный вес барабана с намотанным кабелем равнялся 80,38 тонн. С целью равномерного распределения этой массы на поверхности палубы судна применено 236 роликов, а также такое же количество фундаментных подкладок из пластмассы EPY. Подкладки были размером 500×500 мм и были расположены под роликами (рис. 6.38). Из-за значительных неровностей палубы подкладки имели разную высоту 5—45 мм.

Следует добавить, что на этом судне кроме роликовых линий, на дне ковша, в котором был уложен кабель, была установлена крестовина оси оборота ковша (рис. 6.37а) — также с применением пластмассы EPY. Изготовление 236 подкладок под роликовыми дорожками выполнялось с 16-го по 18-ое июня 2013 года, а под крестовиной оси ковша — 9-ого июля 2013 года.

Как известно, конструкции, опёrtые более чем в трёх пунктах, являются многократно статически неопределимыми и нуждаются в необходимости выполнения многих расчётных и практических действий, особенно при применении фундаментных подкладок, выполненных из металлических элементов. В данном случае было бы это особенно трудно, имея в виду вышеупомянутые неровности поверхности, на которой должна быть установлена эта конструкция. Только применение готовых подкладок, литых из пластмассы, выравнивающих деформации палубы, ликвидирует эти неудобства, намного сокращая монтажные работы при монтаже этого устройства и гарантирует равномерное распределение нагрузки на все подкладки.

6.2.8. Применение пластмассы EPY при монтаже уключин трансокеанской гребной лодки

Пластмасса EPY нашла практическое применение не только при монтаже больших двигателей огромных океанских судов и громадных наземных устройств, но и при монтаже мельчайших элементов самых малых плавающих объектов, какими являются одноместные гребные лодки.

Особенным случаем в этой области, заслуживающим внимания, было применение пластмассы EPY при монтаже „приводной системы“ одноместной лодки, предназначенной для океанического рейса „Trans Pacific Solo“. Эта лодка показана на фотографии (рис. 6.39), а её детальное описание, а также описание рейса, совершённого Ромуальдом Коперским - героем этого рейса — находятся в его книге „Неспокойный Океан“ [164].

Пластмасса EPY была применена в этой лодке для крепления уключин, являющихся опорными узлами для вёсел. Общий вид уключины показан на рис 6.40а, а способ применения пластмассы EPY для крепления её к лодке иллюстрирует рис. 6.40б.



Рис. 6.39. Одноместная гребная лодка „Pianist'a”, предназначенная для рейса по Тихому океану, в момент старта из местности Choshi в Японии

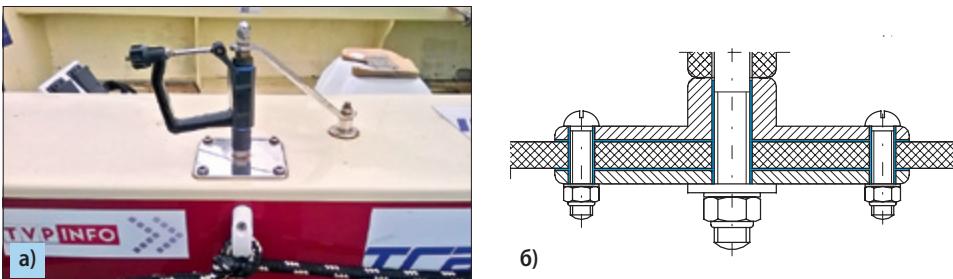


Рис. 6.40. Уключина одноместной трансокеанской гребной лодки „Pianist'a”: а) общий вид; б) способ применения пластика ЕРУ для её крепления к лодке

Здесь использованы опыты, полученные при исследованиях и при практическом применении тонких слоёв пластика в соединениях конструкционных элементов, а также призонных болтов в пластике, подробно описанных в пунктах 8.1 и 8.2 настоящей книги.

Стыковые поверхности соединённых конструкционных элементов не являются идеально гладкими. Выступающие на их поверхностях отклонения от идеального состояния (шероховатость, волнистость, отклонения формы) вызывают то, что они соприкасаются друг с другом только в отдельных точках (микроповерхности

тях), а их реальные поверхности стыка составляют обычно очень небольшой процент их номинальной поверхности. В таких соединениях выступают явления, которые часто приводят к быстрому их разрушению, а иногда к авариям.

Тонкий слой пластмассы заполняет все макро и микрощели, выступающие между соединяемыми поверхностями. После отверждения пластмассы заданная внешняя нагрузка равномерно распределяется по поверхности стыка без появления отрицательных явлений местного характера.

Пластмасса EPY является устойчивой к длительному воздействию морской воды и предохраняет соединяемые поверхности от появления деструкции. В результате можно получить большую надёжность и прочность вышеописанного, конструкционного узла, являющегося существенным элементом этого специфического „главного привода“ этой лодки.

6.3. Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на сушке

6.3.1. Применение пластмассы при ремонтах и модернизации крупногабаритных поршневых компрессоров

6.3.1.1. Общая характеристика крупногабаритных поршневых компрессоров и выступающие в них проблемы

Крупногабаритные тихоходные поршневые компрессоры устанавливают на предприятиях химической промышленности, на газокомпрессорных станциях и на многих других промышленных предприятиях. Это установки мощностью от нескольких сотен до нескольких тысяч kW являются источником больших динамических сил, вибраций и шумов, сильно влияющих на окружающую среду.

Большинство этих устройств работало в польских предприятиях уже 20, 30 и даже больше лет. Эти компрессоры были установлены традиционным способом на фундаментных железобетонных блоках и жёстко закреплены к ним при помощи фундаментных, сквозных или анкерных болтов, согласно указаниям их производителей. Пример такого компрессора, установленного традиционным способом и эксплуатированного с 1966 года, представлен на рис. 6.41.

Из информации, полученной от потребителя этих компрессоров, следует, что уже после относительно непродолжительного времени их эксплуатации начали появляться некоторые проблемы, которые со временем накапливались, создавая много хлопот. Это были главным образом следующие проблемы:

- появление колебаний;
- появление разрозненности болтовых соединений и срывание фундаментных болтов;
- выкручивание и растрескивание бетонного фундамента (например, отламывание углов фундаментных плит);



Рис. 6.41. Общий вид поршневого компрессора синтезного газа (типа 6HGP/4), установленного традиционным способом на бетонном фундаменте

- растрескивание элементов корпусов компрессоров, а также их картеров;
- большая аварийность и связанные с этим большие расходы на ремонты.

Правильная работа, надёжность и прочность крупногабаритных поршневых компрессоров зависят не только от их конструкции и качества, но и в значительной степени от способа их монтажа на фундаменте. Большие расходы на ремонты и немалые текущие потери из-за непланированных простоев вызвали необходимость решения этой проблемы.

Впервые она была замечена и организационно разработана в США, где в эксплуатации было много поршневых компрессоров. В 90-х годах прошлого века в рамках деятельности Gas Machinery Research Council (GMRC) появилось много разработок и рапортов на эту тему [105—109]. Они были результатом совместных работ исследовательских институтов и инженеров-практиков, также занимающихся этой проблематикой. Целью этих разработок было исследование причин появления чрезмерных колебаний, большой аварийности компрессоров, а также многих других связанных с этим проблем технического характера и рост эксплуатационных расходов, исчисляемых в миллионах долларов США [107]. Было установлено, что главной причиной такого положения является низкое качество и ненадёжность традиционных способов крепления этих объектов к фундаментам во время их монтажа.

Были разработаны рекомендации [108, 109] для инженеров, ответственных за монтаж и ремонты фундаментов поршневых компрессоров. Эти директивы могут быть пригодными для повышения качества работы этих устройств при их установке и во время ремонтов.

Подобные проблемы, касающиеся поршневых компрессоров, выступают также в странах Евросоюза. В 1999 г. был создан Европейский форум по поршневым компрессорам (European Forum Reciprocating Compressors — EFRC), который объединяет исследовательские институты, проектантов, производителей и потребителей этих устройств, а также фирмы, занимающиеся их монтажом и ремонтами в странах Европы. Основной целью создания этого форума было образование платформы обмена научным и техническим опытом между потребителями, производителями, а также фирмами, занимающимися монтажом этих устройств, определение процедур и директив по методам измерения и классификации колебаний в поршневых компрессорных установках; анализ причин возникновения этих явлений и поиски способов их минимализации [110].

Проблемы чрезмерных колебаний и высокой аварийности поршневых компрессоров хорошо известны также в Польше. Это относится в особенности к компрессорам, работающим в химической промышленности, а также на газокомпрессорных станциях, находящихся в разных районах Польши. Из исследований, проведенных в этой области, бесспорно следует [111], что основной причиной большинства проблем, возникающих в этих компрессорных установках, является низкое качество и высокая ненадёжность традиционных способов монтажа на бетонных фундаментах, изготавливаемых во время их установки. Поэтому с некоторого времени в Польше, как и в других странах, ведутся систематические ремонтные и модернизационные работы, касающиеся способов монтажа этих объектов. При этом используются самые современные научные и практические знания в этой области, а также новые материалы, а в особенности, специально разработанные для этой цели полимерные пластмассы.

Согласно современному подходу к компрессорным установкам их следует рассматривать как интегрированные динамические системы, состоящие из трёх основных составных элементов [105—110]:

- машины (компрессора и двигателя);
- железобетонного фундамента;
- крепёжной системы, состоящей из крепёжных болтов и опорных плит, залитых в бетоне или в пластмассе, выравнивающие фундаментные подкладки из металла или пластины, а также стальные конструкции (рамы), если они находятся между машиной и бетонным фундаментом.

В этой системе компрессор рассматривается как генератор колебаний (осциллятор), который действует на бетонный фундамент через крепёжную систему, имеющую определённые упруго-глушительные свойства. Необходимо здесь учесть существенный факт, что так называемое жёсткое крепление не является в действительности совершенным жёстким креплением. Выступающие в его элементах напряжения и деформации, а также контактные явления имеют существенное влияние на качество работы компрессора, а также на надёжность и прочность системы.

6.3.1.2. Сравнительный анализ традиционных и современных способов монтажа компрессорных установок

На основании литературы [105—109], а также собственных исследований [33, 111] было установлено, что главной причиной появления больших колебаний и многих, связанных с этим, хлопот являются основные дефекты традиционного способа монтажа этих систем на бетонных фундаментах. Они возникали из-за применения стальных опорных плит, заливаемых в бетоне, а также стальных подкладок и пакетов тонких стальных листов (0,1—1 мм), применяемых для выравнивания отдельных элементов системы компрессора и удаления зазоров в местах их опоры во время его монтажа на фундамент (рис. 6.42).

Такой способ монтажа тяжёлых поршневых компрессоров является сильно устаревшим и ненадёжным на практике. Он имел два существенных технических недостатка, причиной которых были:

- большие трудности достижения надёжной пригонки всех подкладок к опорным поверхностям фундамента и основы устанавливаемого объекта;
- невозможность обеспечения хорошего поверхностного контакта между бетоном и плитой или стальной подкладкой, а также между двумя металлическими поверхностями.

Применение стальных плит, осаждённых в бетоне, и стальных выравнивающих подкладок при традиционном способе монтажа поршневых компрессоров (рис. 6.42) вытекало из-за трудностей во взаимной пригонке больших опорных поверхностей фундаментов и основ устанавливаемых объектов, а прежде всего

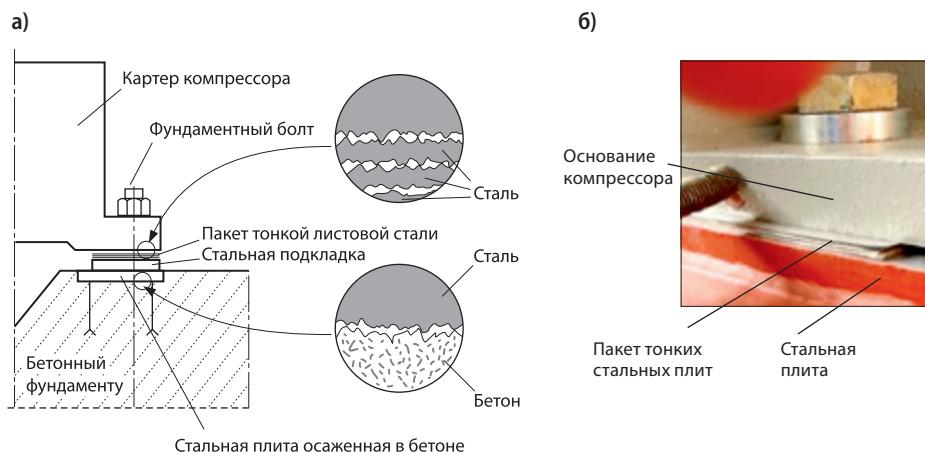


Рис. 6.42. Схема традиционного способа монтажа картера компрессора на бетонном фундаменте с применением стальных плит и стальных подкладок, а также пакета из тонкой листовой стали (а) и взятый из практики пример применения пакета тонкой листовой стали на фундаментной раме (б)

из-за необходимости точной расстановки взаимодействующих элементов системы (напр. электродвигателя и поршневого компрессора).

Применение фундаментных подкладок влечёт за собой замену непрерывного (поверхностного) крепления как бы дискретным креплением в определённом количестве пунктов. В случае, когда таких пунктов более трёх, система становится статически неопределенной и тогда возникают большие трудности при пригонке всех подкладок и трудности определения сил взаимодействия машины и фундамента. В тяжёлых компрессорах и взаимодействующих с ними устройствах есть обычно более трёх фундаментных подкладок. Таким способом они являются многократно статически неопределенными, что в большой степени усложняет проблему их надлежащего монтажа. Даже при очень небольших отклонениях пригонки металлических фундаментных подкладок и взаимодействующих с ними элементов комплекса компрессора, из-за их большой жёсткости, в устанавливаемой системе образуются обычно большие непредвиденные монтажные напряжения.

Результаты появления этих напряжений, вместе с термическими и рабочими напряжениями, будут обнаруживаться лишь во время эксплуатации и будут причиной различных аварий.

Из проведенных исследований кроме того следует [33, 111], что даже при нормально хорошей пригонке отдельных фундаментных подкладок выступающие на их поверхностях макро и микронеровности приводят к тому, что контакт взаимодействующих поверхностей имеет дискретный характер и происходит только на поверхностях самых высоких неровностей (рис. 6.42а). Действительная поверхность стыка подкладки с фундаментом и установленным на нём объектом является очень малой по сравнению с их номинальной поверхностью стыка.

Кроме того, не выступают силы адгезии в контакте металла с бетоном, а также металла с металлом. Под влиянием динамических сил под металлической плитой очень скоро образуются микровыкрошивания и верхний слой бетона превращается в мелкую пыль. В результате это ведёт к проседанию соединений и увеличению колебаний, а часто также к образованию макротрещин и разрушению бетона в верхнем слое фундамента. Пример образовавшихся таким образом серьёзных разрушений, взятый из практического опыта, представлен на рис. 6.43. Отдельной проблемой является появление коррозии на стыке стали с бетоном, а также низкая устойчивость бетона к действию химических факторов.

Выравнивание зазоров при помощи пакета тонких металлических листов (рис. 6.42) при точном монтаже тяжёлых машин и устройств на фундаменте (как на бетонном, так и на стальном) имеет ряд существенных недостатков и в настоящее время считается неправильным из-за большой контактной упруго-пластической податливости взаимодействующих металлических поверхностей. Это вызывает так называемое оседание и выбивание несущей поверхности подкладок, а также появление зазоров в болтовых фундаментных соединениях.

В результате такой способ крепления картера, а также других элементов установки, как на рис. 6.42, не выполняет, как следует, своего назначения и часто является главной причиной многих проблем, выступающих и нарастающих во время эксплуатации компрессора.

Некоторый прогресс в этой области совершился после разработки и применения для фундаментных подкладок специальных полимерных пластмасс. Фундаментные подкладки, литые на готово из этих пластмасс непосредственно под устанавливаемым компрессором, сделали значительно более простыми монтажные работы и обеспечили лучшее качество установки машин и устройств.

Современный способ монтажа машин и устройств на стальных или бетонных фундаментах с использованием специально разработанной для этих целей полимерной пластмассы схематически показан на рис. 6.44а. Он основан на



Рис. 6.43. Пример полного разрушения верхней части фундамента поршневого компрессора с видимым пакетом ослабленных стальных плит вблизи фундаментных болтов (а) и глубокими разрывами бетона, а также вытекание масла (б, в)

Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на суще

точном размещении объекта на фундаменте (в рабочей позиции) при помощи установочных болтов или клиньев, а затем на изготовлении между фундаментом и основанием заливных форм из полиуретановой пенки и стального листа и заполнении их жидкой композицией, перемешанной с отвердителем (рис. 6.44б).

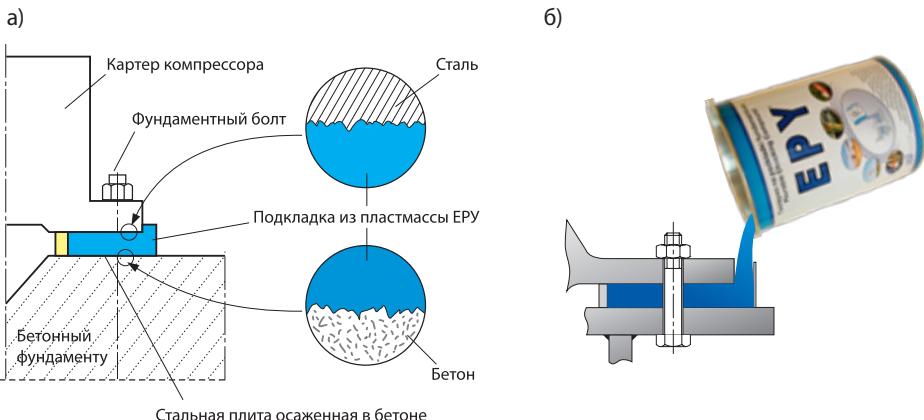


Рис. 6.44. Схема установки картера компрессора на бетонном фундаменте с применением подкладок, литых из пластмассы EPY (а), а также способ отливки фундаментной подкладки (б)

После отверждения этой композиции получаются готовые фундаментные подкладки. Благодаря применению технологических надливок, вызывающих гидростатическое давление, полученные таким способом подкладки точно прилегают ко всем макро и микронеровностям бетонного фундамента. Они обеспечивают значительно лучшую пригонку опорных поверхностей устанавливаемой машины и фундамента, чем стальные подкладки (рис. 6.42). Появилось также хорошее прилипание (адгезия) подкладок к бетону, что предохраняет его от выкрашивания. В результате получено более равномерное распределение монтажных напряжений в установке, более стабильная её работа, а также снижение уровня механических колебаний и шумов.

6.3.1.3. Модернизация монтажа поршневых компрессоров

Вышепредставленный способ ремонта компрессорных установок, основанный на замене отработанных металлических подкладок подкладками, изготовленными из полимерной пластмассы, несомненно является выгодным и экономически эффективным решением проблемы. Однако не устраняет всех проблем, связанных с монтажом этих компрессоров на бетонном фундаменте, а в особенности касающихся его физической стойкости. Лучшие эксплуатационные результаты и большую стабильность установки можно достичь в случае помещения стальной рамы между железобетонным фундаментом и основанием компрессора.

Первая этого типа модернизация (запроектированная и практически осуществлённая польской фирмой TECHMARIN из города Свиноустье в 1993 г.) была применена для мотокомпрессора GMVY-12 (весом ок. 85 тонн и мощностью 2026 кВт), установленного в Одалянове, в Польше, на заводе деазотирования газа. Монтаж этого компрессора (перед и после модернизации) представлен на рис. 6.45а и 6.45б, в.

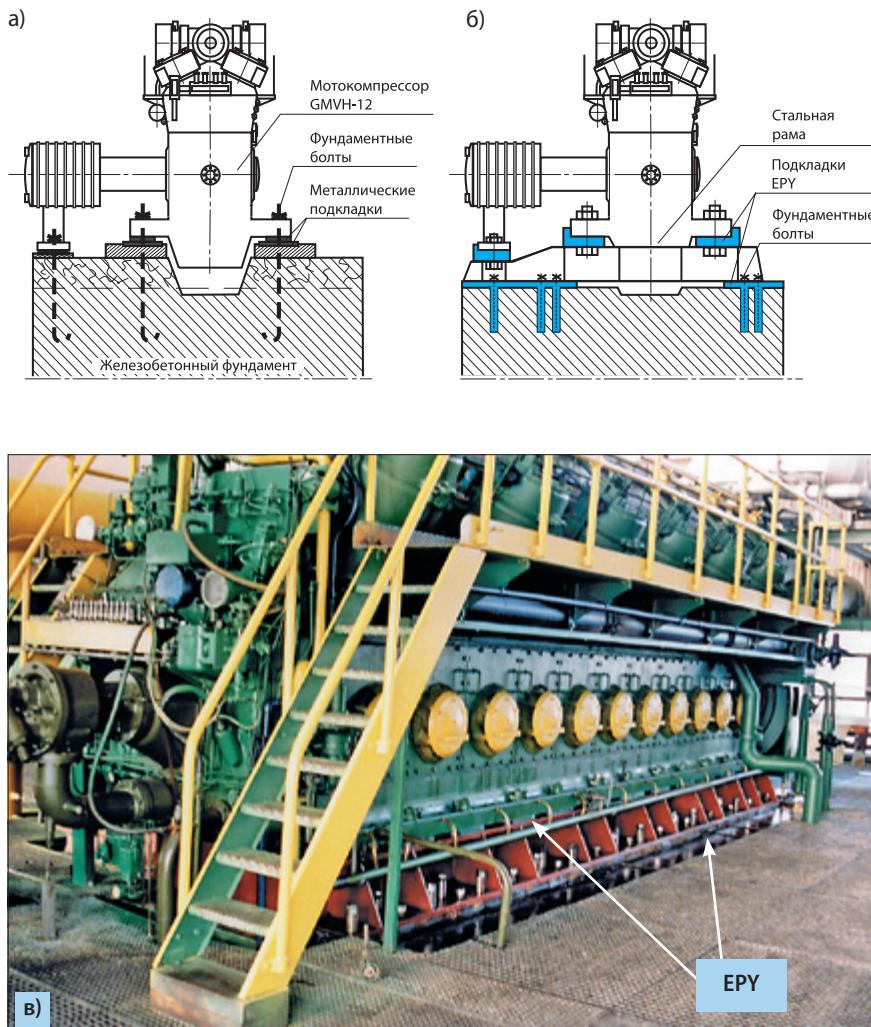


Рис. 6.45. Монтаж мотокомпрессора GMVH-12 на железобетонном фундаменте: а) до модернизации (на стальных подкладках); б и в) после модернизации (на стальной конструкции и подкладках, отлитых из пластмассы EPY)

В течение многолетней эксплуатации этой установки до времени вышеупомянутой её модернизации, было обнаружено появление следующих проблем:

- растрескивание железобетонного блока в его верхней части;
- срыв фундаментных болтов, закреплённых в железобетонном блоке;
- рост амплитуды механических колебаний и интенсивности шума;
- увеличение трудностей удерживания величины зазоров в коленчатой системе мотокомпрессоров;
- появление трещин блоков и головок двигателя, а также противопульсационных баллонов;
- большая аварийность установки.

Было установлено, что главной причиной возникающих проблем были дефекты монтажа этих установок на металлических подкладках. Ремонт и модернизация фундамента этой установки сводились к:

- снятию верхнего разрушенного слоя (ок. 440 мм) железобетонного блока;
- изготовлению стальной фундаментной рамы;
- выверлению в железобетонном блоке 62 отверстий глубиной 600 мм для болтов (M40), крепящих металлическую раму к фундаменту;
- заливке фундаментных болтов пластмассой;
- монтажу стальной рамы на фундаментном блоке с применением подкладок, литых из пластмассы (рис. 6.45б);
- затяжке гаек болтов, крепящих раму к фундаментному блоку (после отверждения пластмассы);
- установке мотокомпрессора на металлической фундаментной раме при помощи регулируемых винтов в его эксплуатационное положение;
- литью подкладок из пластмассы ЕРУ между опорой мотокомпрессора и металлической фундаментной рамой;
- затяжке гаек болтов, крепящих мотокомпрессоры к металлической раме (после отверждения подкладок).

Подробности, касающиеся этой модернизации, представлены в статье [29]. Такие действия затем были применены для модернизации монтажа всех пяти таких установок, существующих на этом заводе, а после этого и на всех других предприятиях этого типа в Польше.

Многолетняя эксплуатация мотокомпрессоров (типа GMVH-12) после их модернизации подтвердила актуальность ожидаемых эффектов. Особенно нужно подчеркнуть, что согласно замерам, проведенным разными учреждениями и оценке потребителей этих установок, было достигнуто:

- уменьшение больше, чем в десять раз уровня механических колебаний;
- значительное уменьшение уровня интенсивности шума;
- значительное повышение надёжности работы установки.

Модернизация установок, показанных на рис. 6.45, была проведена позднее также для поршневых компрессоров типа Halberstadt 1HB 5K-400/250 (рис. 6.46).

Такие компрессоры были установлены на газокомпрессорных станциях на железобетонных фундаментах традиционным способом по проекту и указаниям их поставщика. Способ монтажа такого компрессора схематически показан на рис. 6.46а.

Представленные здесь компрессоры работали на газокомпрессорных станциях с 1992 г. Но уже после относительно короткого времени проявляли большие и быстро возрастающие колебания, переносящиеся на значительное расстояние. Часто выступали аварии и связанные с этим простои, а также необходимость выполнения многочисленных ремонтов. Польская Госинспекция охраны труда потребовала приостановить в какой-то момент дальнейшую эксплуатацию этих установок из-за очень больших колебаний, превышающих допустимые нормы для людей (обслуживающего персонала), также опасных для окружающих их технических инсталляций и строительных объектов. Главной причиной появления чрезмерных колебаний и связанных с этим многочисленных хлопот (аналогичных

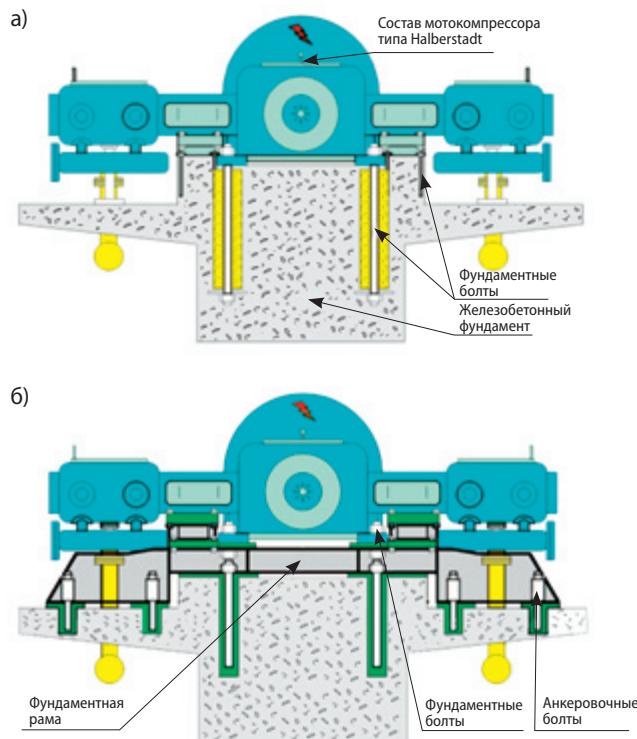


Рис. 6.46. Монтаж компрессоров Halberstadt 1HB 5K-400/250 на железобетонном фундаменте: а) до модернизации (на стальных подкладках); б) после модернизации (на стальной конструкции и подкладках, отлитых из пласти массы ЕРУ)

тем, которые выступали на компрессорных установках типа GMVH-12 [29]) был традиционный и — как оказалось — ненадёжный, также в этом случае, способ монтажа этих компрессоров на железобетонных фундаментах с применением стальных плит, залитых в бетоне, и стальных выравнивающих подкладок (как на рис. 6.42). Относительно быстро наступали: появление зазоров гаек, расщепления и выкрашивания бетона в районах сильного воздействия болтов и стальных плит, закреплённых в бетоне.

В этой ситуации было принято решение провести основательную модернизацию способа монтажа этих компрессорных установок. Она основывалась на запроектировании и изготовлении соответствующей стальной конструкции, которую закрешили к существующему железобетонному фундаменту с применением выравнивающих подкладок, изготовленных из полимерной пластмассы и заанкерированных в фундаменте болтов, также с использованием такой же пластмассы (рис. 6.46б).

Принимая во внимание „консольную“ форму существующего фундамента (рис. 6.46), был удалён только верхний слой раздробленного бетона, оставляя всю остальную часть бетона, так чтобы не ослабить остальной части структуры фундамента. Стальная конструкция, приспособленная к форме существующего фундамента и закреплённая на подкладках, изготовленных из полимерной пластмассы, вызвала существенное его упрочнение, а также придала фундаменту жёсткость. Это особенно относится к его консолям, выступающим на значительное расстояние вне очертания главного блока фундамента (рис. 6.46б). Применение стальной конструкции, в этом случае без удаления верхнего слоя бетона значительной толщины (как это было сделано при мотокомпрессорах GMVH-12, рис. 6.45), вызвало увеличение высоты крепления компрессора и главного двигателя на ок. 400 мм.

Первая модернизация монтажа компрессорного агрегата Halberstadt 1НВ 5К-400/250 была выполнена в 1995 году. В следующем году были сделаны аналогичные модернизации остальных компрессорных агрегатов, работающих на той же газокомпрессорной станции.

В каждом случае значительно уменьшались колебания, достигая даже величины в пределах, допускаемых (по ISO) для таких установок. Они до сих пор работают безотказно. Положительные результаты этой модернизации стали началом выполнения подобных работ на других газокомпрессорных станциях на территории Польши.

На рис. 6.47 представлен монтаж элементов одного из таких компрессоров на стальной раме, закреплённой раньше на бетонном фундаменте с применением пластмассовых подкладок и закреплённых в пластмассе анкерных болтов.

Центровка отдельных элементов установки на этой раме выполнена при помощи установочных болтов и клиньев. Только после проверки правильности центровки изготавливаются формы из полиуретановой пены для фундаментных подкладок в предусмотренных для них местах. Способ изготовления таких форм показан на рис. 6.47. Эти формы заливают жидкой пластмассой после прикрытия



Рис. 6.47. Размещение составных элементов компрессора на фундаментной раме с помощью установочных болтов и клиньев

их на доступных краях гладкими металлическими листами. Благодаря применению надливных трубок формы получаются целиком заполненные пластмассой, и наступает очень хорошая автоматическая припасовка подкладки к опорным поверхностям фундамента и основания машины. После отверждения пластмассы получаются готовые подкладки без необходимости их дополнительной обработки (рис. 6.48). Надливки, выступающие на доступном краю подкладки, обычно остаются на своём месте. В случае необходимости они могут быть выполнены так, чтобы легко можно было их удалить (см. рис. 5.5).



Рис. 6.48. Элементы компрессорного состава, установленного на подкладках, отлитых из пластмассы: а) коробка водилка; б) двигатель

Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на сушке

При очень хорошей пригонке всех подкладок напряжения, вызванные натяжкой фундаментных болтов, имеют местный характер и не деформируют всей системы. Иначе дело обстоит при традиционно выполненном монтаже, при котором такая точность припасовки всех фундаментных подкладок практически невозможна. В таком случае при натяжке фундаментных болтов часто выступают большие монтажные напряжения в корпусной системе, которые могут иметь существенное влияние на её деформацию и ухудшение взаимодействия отдельных элементов установки, а также на ухудшение центровки коленчатого вала двигателя.



Рис. 6.49. Общий вид поршневых компрессоров 1НВ 5К-400/250, эксплуатированных в газокомпрессорных станциях природного газа: а) перед; б) после модернизации конструкции их фундаментов

Общий вид компрессорных агрегатов перед и после модернизации представляет рис. 6.49. Финальным дополнением модернизации является эстетическое выполнение лестниц и площадок вокруг компрессоров, облегчающих доступ к важнейшим элементам установки. Перед модернизацией они были не нужны, т. к. компрессорный агрегат находился на 400 мм ниже.

На рис. 6.50 показан поршневой компрессор синтез-газа (типа 6HGP/4) перед и после модернизации монтажа, основанного на применении стальной рамы, крепёжных анкерных болтов, осаженных в пластмассе, а также фундаментных подкладок, литых из пласти массы.



Рис. 6.50. Общий вид поршневого компрессора синтез-газа 6HGP/4: а) до модернизации; б) после модернизации фундамента

Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на суще

В заключение необходимо подчеркнуть, что все вышеописанные ремонтные и модернизационные работы, касающиеся монтажа поршневых компрессоров, были выполнены фирмой TECHMARIN из Свиноустья (Польша). Выполненные этой фирмой работы характеризуются профессионализмом и высоким качеством реализации с учётом научных и практических знаний в этой области и использованием современных материалов. Вышеописанные, выполненные фирмой работы являются оригинальными и новаторскими и получили высокие оценки потребителей.

К примеру здесь можно представить одну оценку их работ, касающуюся компрессоров синтез-газа типа 6HGP/4:

„Применённые решения привели к правильному фундаментированию машин, ограничили колебания, эмиссию шума и привели к решительному ограничению их аварийности и простоеv, что в результате даёт измеримый производственный и экономический эффект“.

6.3.2. Современные методы монтажа поршневых компрессоров фирмы NEUMAN & ESSER

На рис. 6.51 показан современный метод монтажа одного из двух поршневых компрессорных агрегатов фирмы NEUMAN & ESSER типа 1TZL300, выполненного под надзором фирмы MSJ по заказу швейцарской фирмы Koch-Glitsch

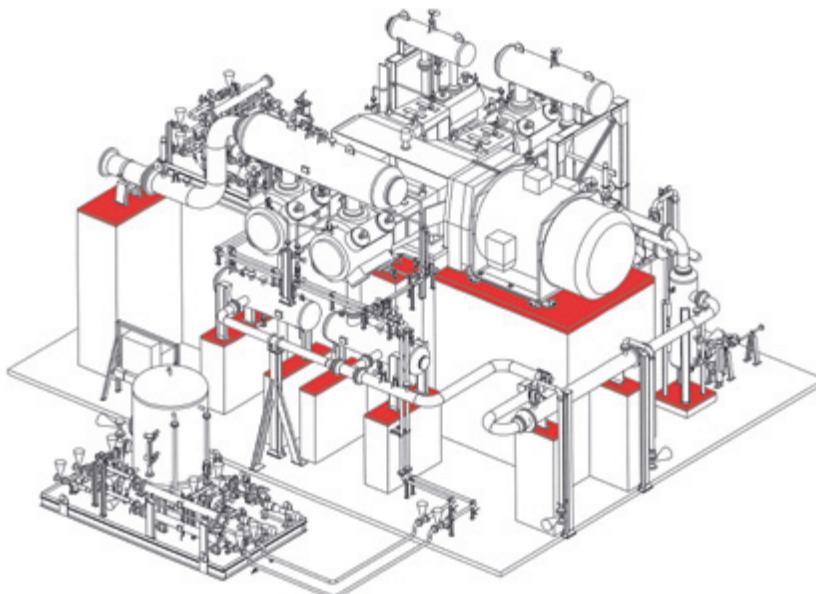


Рис. 6.51. Общий вид монтажа блока поршневого компрессора фирмы Neumann & Esser типа K-401

Schweiz GmbH. Это касалось новой инвестиции в Pavlodor (Казахстан) в 2008 году по проекту и указаниям производителя этих устройств.

Для монтажа этого агрегата, согласно требованиям заказчика, была применена пласти масса фирмы Chockfast Red S.G. (производства США). Это трёхкомпонентный полимерный раствор с большой прочностью для широкого применения при монтаже тяжёлых машин и устройств, устанавливаемых на бетонных фундаментах. По сравнению с бетоном эта пласти масса имеет много существенных положительных качеств, к которым относятся: большое сопротивление сжатию ($125 \text{ Н}/\text{мм}^2$), короткое время отверждения до достижения полной прочности, большая адгезия к металлу и бетону, значительная устойчивость к воздействию атмосферных условий, масел и разных агрессивных факторов, а также малая усадка и большая прочность.

Эта пласти масса предназначена для заливки верхней поверхности бетонного фундамента после постановки на ней объекта на установочных болтах. Рекомендуемая толщина слоя этой пласти массы равна 25—100 мм.

На рис. 6.52 представлены фрагменты установки, т. е. компрессора и его двигателя. Фундаментные болты, крепящие компрессор и двигатель, были осажены в квадратных отверстиях (14×14 мм) и заанкерованы с применением пласти массы. Эти болты не крепят непосредственно компрессор и его двигатель к фундаменту, зато крепят стальные полосы плит толщиной 100 мм, к которым прикреплены отдельные элементы установки. Перед окончательным монтажом на фундаменте компрессор и его двигатель сначала были установлены на полосах этих плит и прикреплены к ним болтами (M42; рис. 6.52б). После

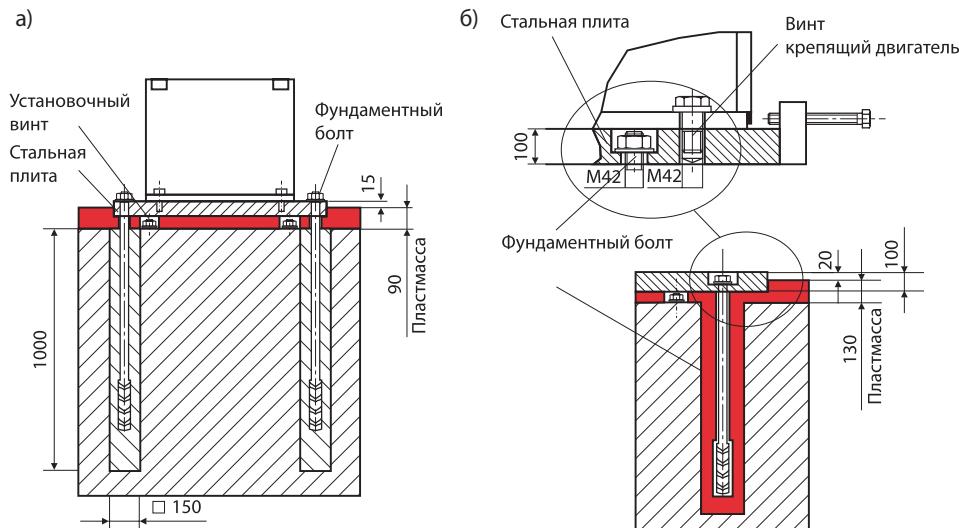


Рис. 6.52. Детали фундамента картера компрессора (а) и двигателя (б)

Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на суще



Рис. 6.53. Монтаж компрессорного блока: а) укладка форм для пластмассы; б) отлитые и отвердевшие слои пластмассы после удаления форм

этого на фундаменте были установлены компрессор и электрический двигатель (с прикреплёнными к ним полосами плит) и была проведена регулировка их установки в рабочем взаимном расположении, гарантирующем надёжную центровку двигателя и компрессора. Эти действия были выполнены при помощи подобранных для этой цели установочных болтов, размещённых в полосах плит. Между этими плитами и фундаментом было оставлено значительное расстояние (ок. 30 мм) для заливки пластмассой. После проверки надлежащего расположения компрессора с двигателем на бетонном фундаменте были подготовлены формы из досок (рис. 6.53а), которые затем были залиты перемешанной пластмассой Chockfast Red S.G. Фундаментные полосы плит были залиты пластмассой согласно проекту, т. е. не на полную их толщину (рис. 6.52), а так, чтобы выступали на 15—20 мм выше поверхности пластмассы (рис. 6.53б). После отверждения пластмассы полосы плит были прикреплены к фундаменту путём наложения, а затем затяжки гаек на фундаментных болтах, как это показано на рис. 6.52.

Таким же способом были выполнены монтажи всех остальных элементов компрессорной установки, показанной на рис. 6.51. Монтажи, выполненные с применением пластмассы Chockfast Red S.G., гарантируют стабильное крепление и стойкость к действию разных внешних факторов.

6.3.3. Применение пластмассы при монтаже горных машин и устройств

В 1995 году пластмасса EPY впервые была применена для фундаментных подкладок при монтаже на фундаменте главного продувочного компрессора на шахте KWK „Wieczorek” (Польша). Схема этой установки показана на рис. 6.54а, а план расположения фундаментных подкладок — на рис. 6.54б. Масса этого объекта была равна ок. 40 тонн. В последующие годы на разных польских шахтах было установлено ещё пять таких объектов.

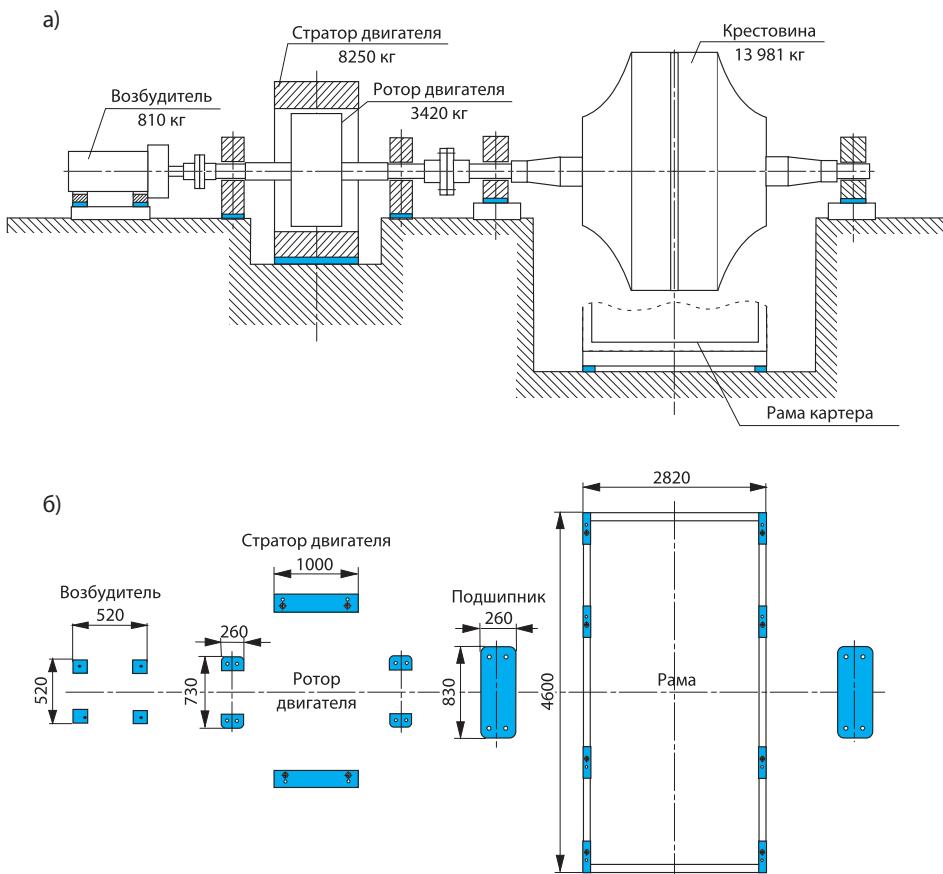


Рис. 6.54. Применение пластмассы ЕРУ при монтаже вентилятора главной системы вентиляции шахты KWK „Wieczorek” (Польша): а) схема монтажа вентилятора; б) план размещения фундаментных подкладок

В 1996 г. пластмасса ЕРУ впервые в Польше была использована для монтажа шахтной подъёмной машины (рис. 6.55а). Это была машина К-6000 шахты „Pułaski” (скиповое отделение шахты KWK „Wieczorek” в Katowicach). Во время длительной эксплуатации этой машины в результате повреждений из-за горных убытков выступили значительные смещения фундаментов, вследствие чего появились неточности расположения подшипников главного вала и статоров приводных двигателей машины (рис. 6.55б).

Во время ремонта появилась необходимость восстановления правильного расположения главного вала подъёмной машины и статоров приводных двигателей. Для достижения этой цели были применены фундаментные подкладки из пластмассы ЕРУ. Поправка расположения в вертикальном направлении достигала 0—35 мм.

Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на суще

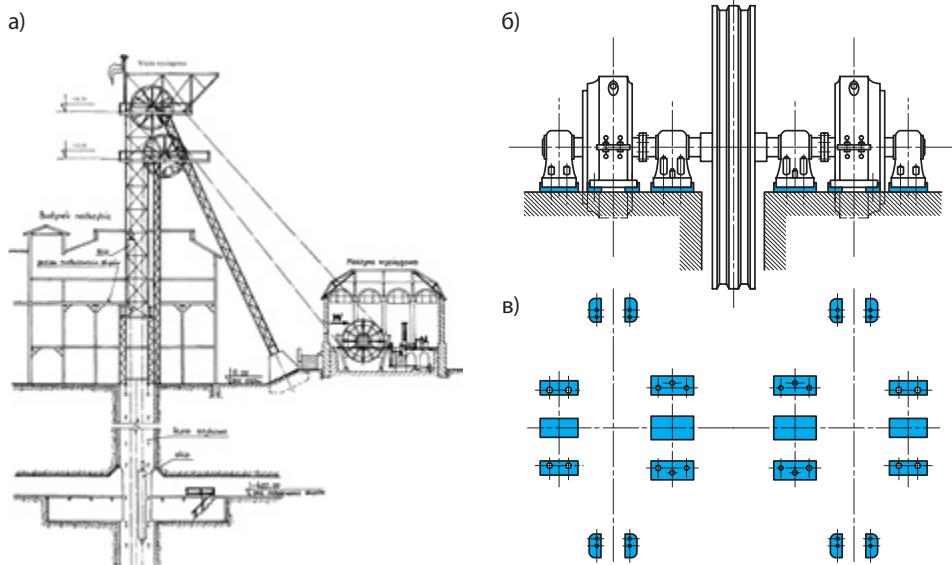


Рис. 6.55. Применение пластмассы ЕРУ при монтаже шахтной подъёмной машины К-6000 на шахте „Wieczorek”: а) подъёмная башня и подъёмная машина; б) схема монтажа подъёмной машины; в) размещение фундаментных подкладок

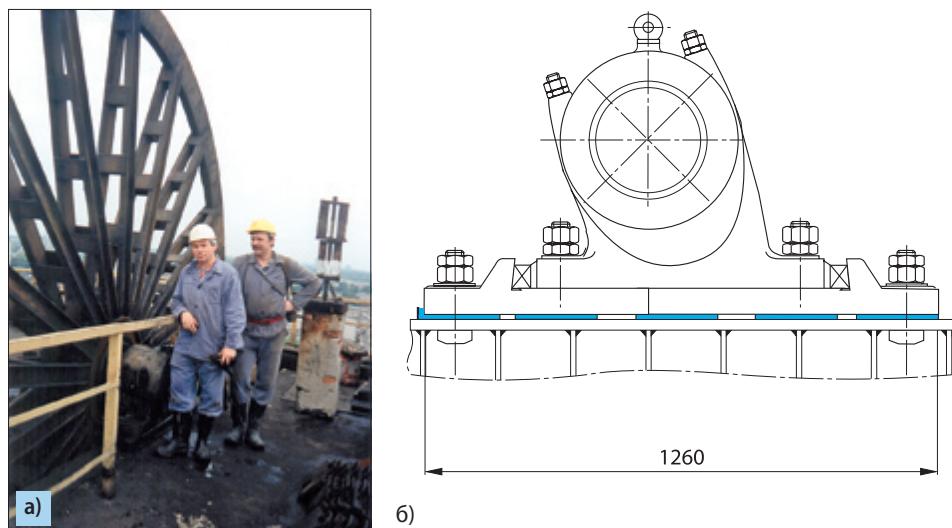


Рис. 6.56. Применение пластмассы ЕРУ при посадке подшипника канатного шкива Ø 6000 на конструкции подъёмной башни шахты „Wieczorek”: а) вид канатного шкива на подъёмной башне; б) схема посадки подшипника канатного шкива

Монтаж машины был выполнен в апреле 1996 г. С того времени она работала ещё на протяжении многих лет. Применённый в этом случае способ изготовления фундаментных подкладок из пластмассы EPY полностью оправдал её пригодность и преимущества. Значительно сократилось время ремонта и была достигнута точность размещения подшипников главного вала и статоров приводных двигателей. Машина работала стабильно и не было никаких замечаний по её поведению.

Подобные эффекты были получены в октябре 1996 г. при монтаже подъёмных машин типа 4L-4000/2400 на шахте KWK „Zabrze-Bielszowice”. В феврале 2001 г. была смонтирована с применением пластмассы EPY подъёмная машина на медном руднике Rudna около Polkowic. На рис. 6.56 представлен пример применения пластмассы EPY для размещения подшипников канатного шкива Ø 600 мм на конструкции подъёмной вышки (показанной на рис. 6.55а). Эта работа была выполнена в 1999 г. на шахте KWK „Wieczorek”.

Монтажи горных машин и устройств, выполненные с применением пластмассы EPY, вполне подтвердили значительные технические и экономические достоинства применения этого нового метода в горной промышленности. Такой способ монтажа даёт возможность существенно усовершенствовать и повысить качество работы как новых устройств, так и ремонтируемых, в пользу их правильной и безопасной работы.

6.3.4. Применение пластмассы для монтажа экскаваторов и отвалообразователей в карьерной горной промышленности

Экскаваторы и отвалообразователи в карьерах являются очень большими объектами, работающими в особенно трудных условиях. Монтаж этих устройств на месте их работы является сложным и дорогостоящим. Способ и качество его выполнения имеют значительное влияние не только на стоимость постройки объекта, но и в большой степени на надёжность его работы, а также стоимость обслуживания, что сводится к увеличению эффективности его эксплуатации. Одним из основных условий правильности работы такого экскаватора является надлежащий монтаж применённых в нём крупногабаритных подшипников.

Традиционный способ монтажа этих подшипников требует очень точной механической и ручной обработки опорных поверхностей несущей конструкции и вращательной части, установленной на этом подшипнике. Этот способ очень трудоёмкий и дорогостоящий и не гарантирует высокой надёжности и стойкости. Так как стоимость ремонтов и потери, связанные с простоями этих объектов, очень высокие, было принято решение по повышению качества их монтажа. Эти цели были достигнуты благодаря применению полимерной пластмассы способом, применяемым уже при монтаже других машин и устройств в вышеупомянутых и других областях промышленности.

Возможности применения пластмассы при монтаже таких объектов представлены ниже на конкретных примерах.

Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на суше

а)



б)

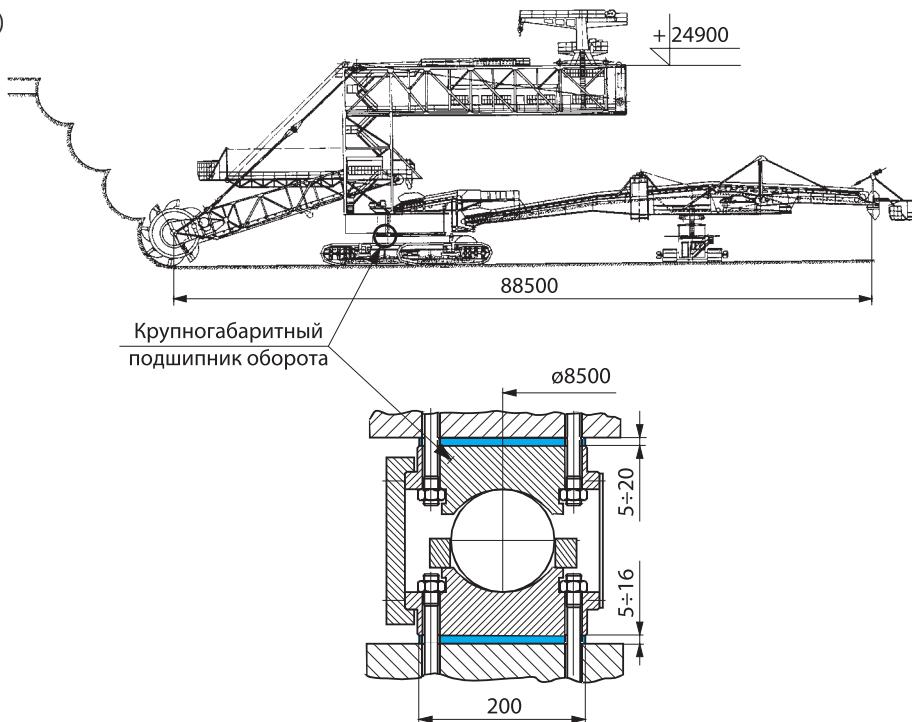


Рис. 6.57. Применение пластмассы ЕРУ для монтажа подшипника кантователя (\varnothing 8,5 м) экскаватора SRs-1200 карьера „Konin”: а) общий вид экскаватора; б) схема экскаватора с сечением подшипника кантователя

В 1994 г. впервые была применена пластмасса EPY в горной промышленности в карьере KWB „Konin“ (Польша) для экскаватора SRs-1200 (рис. 6.57). Во время ремонта этого экскаватора, при монтаже сегментного шарикоподшипника поворотного крана диаметром 8500 мм был применён тонкий слой пластмассы EPY (рис. 6.57б). Ширина этого слоя равнялась 200 мм, толщина 5—20 мм, а статическая нагрузка станины экскаватора 12000 кН. Благодаря применению пластмассы можно было избежать очень трудоёмкой и дорогостоящей обработки поверхностей элементов несущей конструкции экскаватора, соприкасающихся со станиной, а также необходимости его демонтажа. Пластмасса обеспечила очень точную пригонку взаимодействующих поверхностей конструкции и станины, а также равномерную нагрузку шаров подшипника диаметром 110 мм. Таким образом, было сокращено время и снижение стоимости выполнения ремонта.

В последующие годы пластмасса EPY была применена при монтаже таких же самых подшипников на четырёх других экскаваторах типа SRs-1200. Последующая многолетняя эксплуатация этих экскаваторов подтвердила высокое качество и стойкость монтажа, выполненного с применением пластмассы EPY.

Другим большим и важным объектом, в котором крупногабаритный шарикоподшипник вместе с зубчатым венцом были установлены с применением пластмассы EPY, является отвалообразователь машина ZGOT-15400.120, спроектированная и построенная в Польше (рис. 6.58).

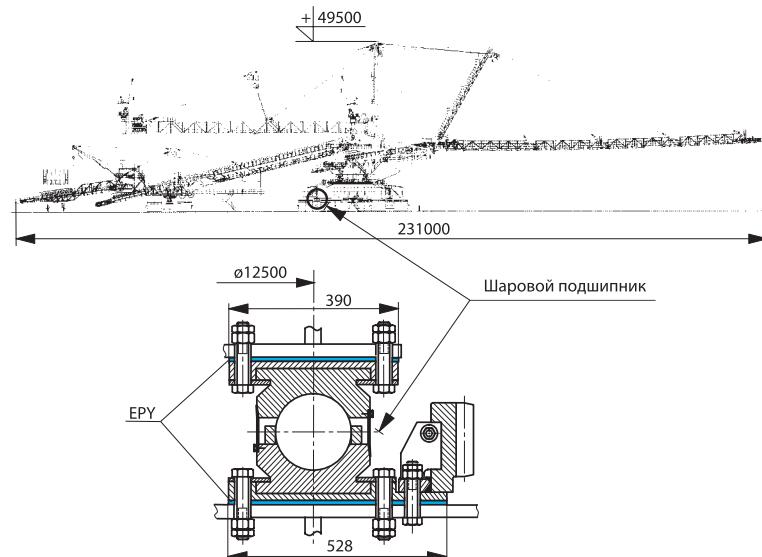


Рис. 6.58. Отвалообразователь ZGOT-15400.120 с шаровым подшипником ($\varnothing 12,5$ м), установленным с использованием пластмассы EPY

Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на суще

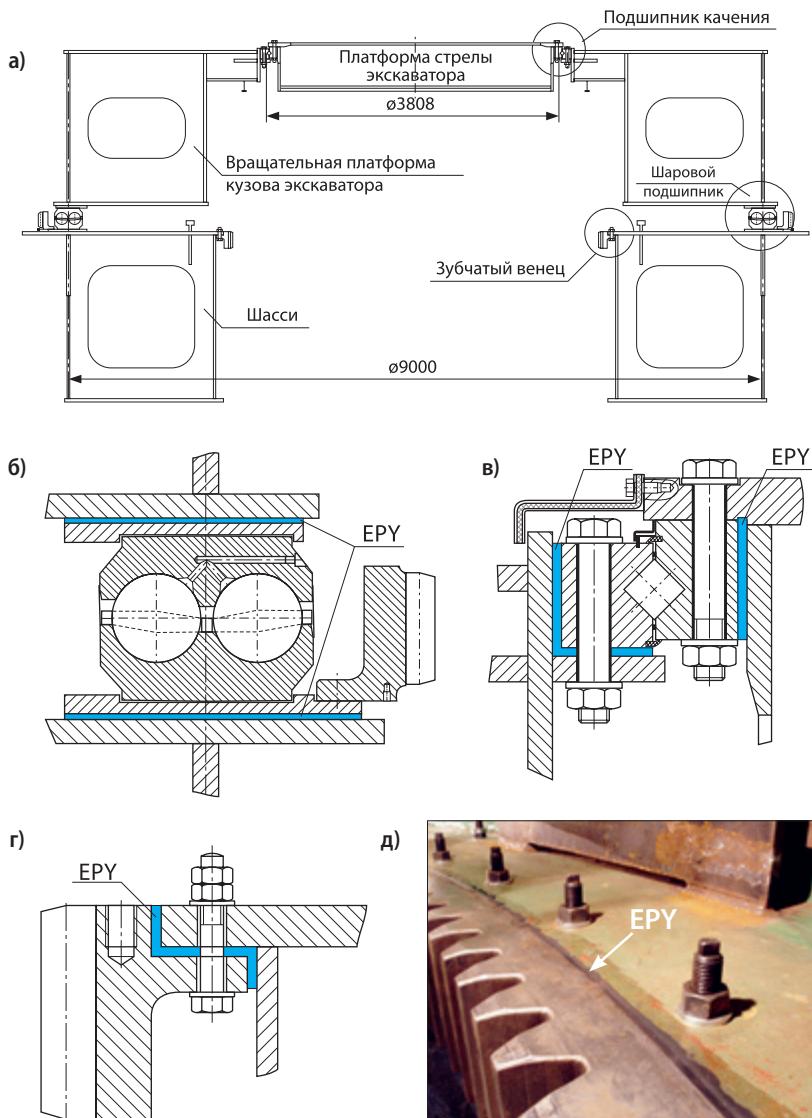


Рис. 6.59. Применение пластмассы EPY при монтаже шарового подшипника ($\varnothing 9,0$ м), подшипника качения ($\varnothing 3,808$ м) и зубчатого венца на экскаваторе KWK-910: а) схема инсталляции; б) шаровая станина; в) венцевой подшипник; г) и д) зубчатый венец

Диаметр шарикоподшипника в этом объекте равен 12500 мм, а диаметр шара подшипника — 200 мм. Вес частей отвалообразователя, вращающихся на подшипнике, равен 34 тонны. Эта машина была сдана в эксплуатацию в KWB „Bełchatów“ (в карьере „Szczerców“) в конце 2004 года.

В 2004 году в KWB „Bełchatów“ был установлен с применением пластмассы EPY самый большой шариковый подшипник диаметром 18 м, изготовленный для экскаватора K41.

В более широком масштабе пластмасса EPY была применена при монтаже экскаватора KWK-910. Кроме шарикоподшипника (\varnothing 9000 мм), на котором была установлена вращательная платформа кузова, пластмасса EPY была применена также при монтаже особо тяжёлого (радиально-упорного) подшипника качения (\varnothing 3808 мм) платформы стрелы грузоподъёмного крана, а также зубчатого венца механизма оборота кузова. Схема монтажа вышеприведенных элементов, а также некоторые детали показаны на рис. 6.59. Также в этом случае, благодаря применению пластмассы удалось избежать тяжёлой и трудоёмкой обработки монтажных поверхностей конструкции, и был обеспечен монтаж всех элементов. Сначала были установлены отдельные элементы в рабочем положении при помощи установочных болтов, оставляя некоторый зазор (мин. 5 мм) между опорными поверхностями соединяемых элементов, который затем был залит жидкой пластмассой. После отверждения пластмассы были удалены установочные болты и затянуты крепёжные болты.

6.3.5. Применение пластмассы EPY при монтаже энергетических машин и устройств

Пластмасса EPY всё чаще применяется при монтаже разных энергетических машин и устройств, таких как турбины, шаровые мельницы, вентиляторы и др. Она используется при монтаже различных устройств, как на бетонных, так и на стальных фундаментах. Применение пластмассы для фундаментных подкладок,литых на месте под надлежаще установленными устройствами, также значительно упрощает монтажные работы, сокращает время их выполнения и снижает затраты, а кроме того, гарантирует лучшее качество работ, чем при применении металлических подкладок. На рис. 6.60 в качестве примера представлена схема монтажа на подкладках из пластмассы EPY редуктора шаровой мельницы на электростанции „Siekierki“.

На рисунке 6.61 показан способ применения пластмассы для монтажа тяжёлых машин и устройств на плитах скольжения.

Рисунок 6.62а показывает большую цистерну для хранения сорбента на электростанции „Siekierki“, установленную на стальной опорной конструкции высотой около 25 м, на фундаментных подкладках, отлитых из пластмассы EPY. Схема размещения и размеры отдельных подкладок показаны на рис. 6.62б. Высота (толщина) подкладок была непостоянной и изменялась в пределах от около нуля до 20 мм.

Поверхности фундамента и основания цистерны характеризовались большими неровностями в масштабе макро. Применение в этом случае металлических выравнивающих подкладок, обеспечивающих стабильную посадку цистерны, было практически невозможно из-за больших и неровных опорных поверхностей. Литьё фундаментных подкладок из пластмассы EPY на месте, непосредственно

Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на сушке

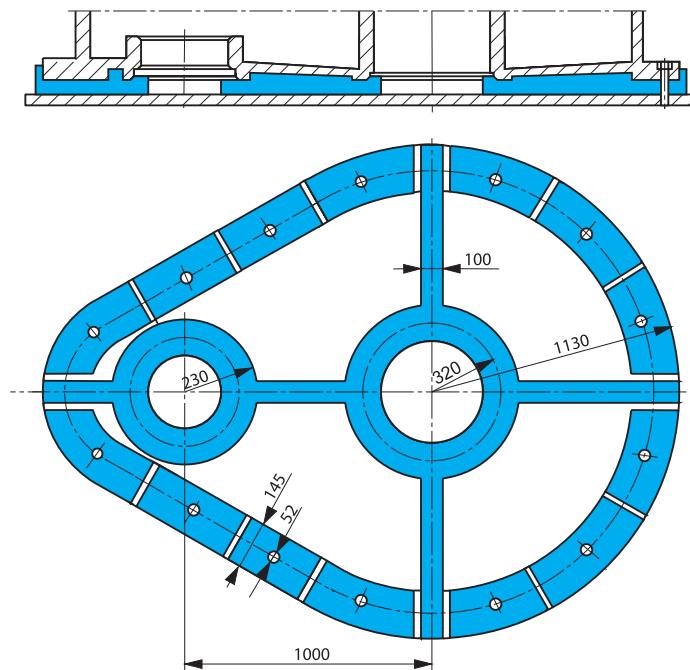


Рис. 6.60. Схема посадки передачи типа КАУ шаровой мельницы на подкладках из пластмассы ЕРУ

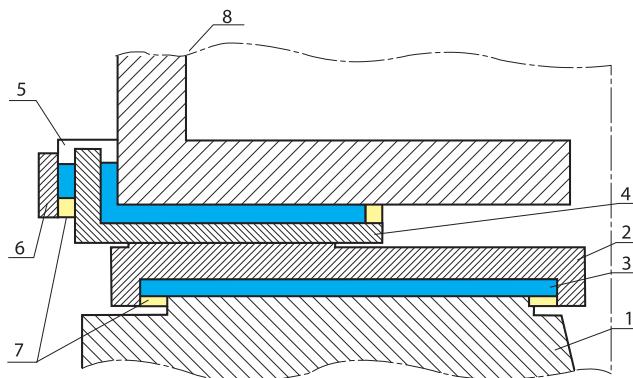


Рис. 6.61. Применение пластмассы ЕРУ при монтаже турбины на скользящих плитах:
1 — стальной или бетонный фундамент машины, 2 — нижняя скользящая плита, 3 — пластмасса ЕРУ, 4 — верхняя скользящая плита, 5, 6 — элементы блокады верхней скользящей плиты,
7 — уплотнения, 8 — основание машины

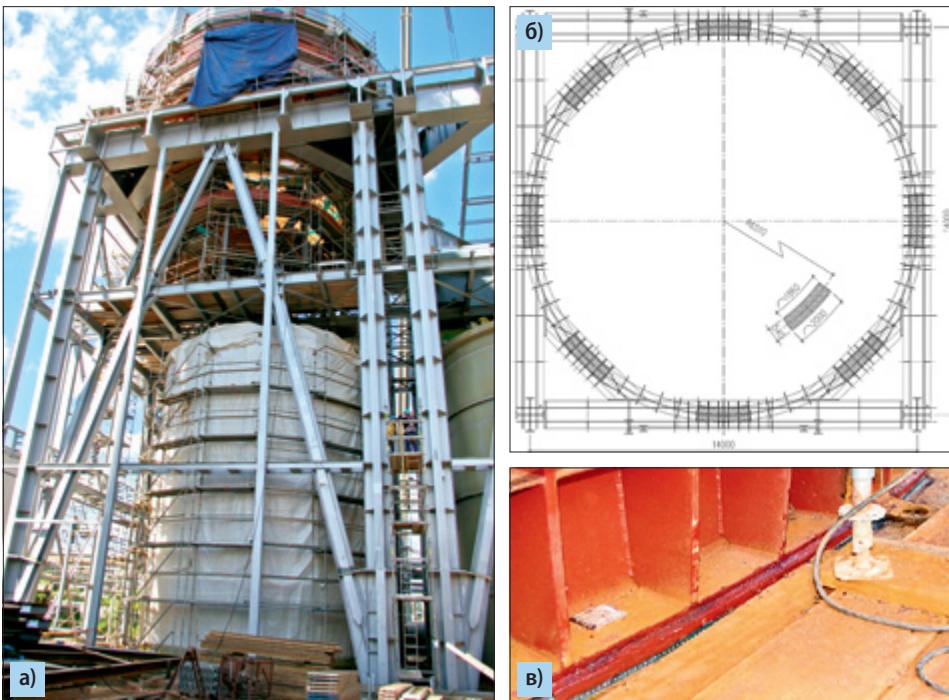


Рис. 6.62. Цистерна сорбента электрической теплоцентрали „Siekierki” (Warszawa), установленная на подкладках из пластмассы EPY: а) общий вид; б) размещение и размеры фундаментных подкладок; в) фрагмент основания цистерны с видимой отлитой из пластмассы фундаментной подкладкой

под надлежаще установленной цистерной (при помощи клиньев), с применением технологической надливки, обеспечило точную их припасовку на всех предназначенных для них поверхностях стыка основания цистерны и фундамента. Выступающие здесь неровности и непараллельности поверхностей не были препятствием в получении хорошей и стабильной подпоры.

Проведенные раньше исследования показали, что применённая здесь жидкая пластмасса EPY очень хорошо заполняет все зазоры, даже высотой около нуля. Полученные таким образом фундаментные подкладки гарантируют равномерное распределение нагрузки по всей поверхности стыка.

Максимальная масса цистерны вместе с её предвиденным содержанием (на основании полученных данных) приблизительно равнялась 58000 кН. Вычисленная средняя величина нагрузки на подкладки равна $p = 6,8$ МПа, что при прочности этой пластмассы $R_c = 142$ МПа даёт очень большой расчётный запас безопасности, равный $n = 20,9$. Из-за очень большой величины отношения попечерных размеров к высоте подкладок действительный запас безопасности является в данном случае многократно выше.

Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на суще

6.3.6. Применение пластмассы при укладке рельсов на стальных конструкциях и на железобетонных фундаментах или шпалах

Пластмасса EPY всё чаще применяется при укладке рельсов, уложенных прямо или по окружности, на стальных конструкциях, а также на фундаментах или шпалах, изготовленных из железобетона. Примеры таких применений EPY показаны на рис. 6.63 и 6.64.

На рис. 6.65 показано применение пластмассы EPY при монтаже подрельсовых накладок рельсового пути оборота экскаватора на стальной конструкции

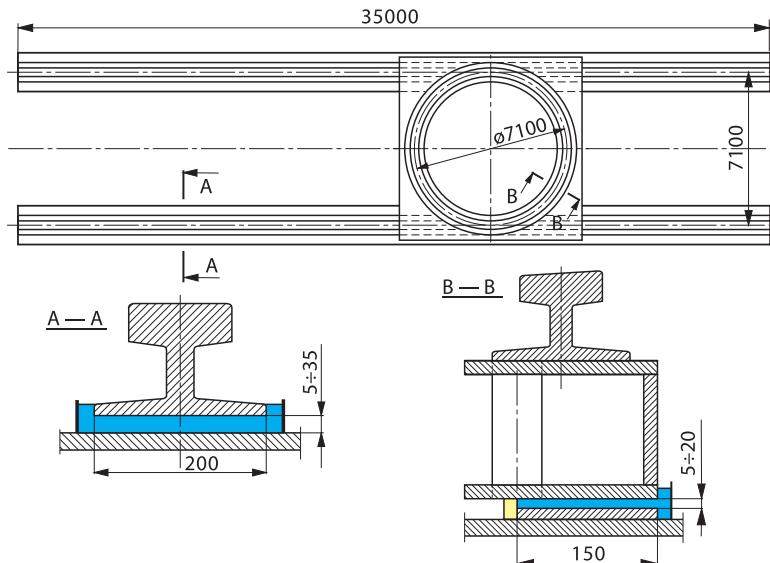


Рис. 6.63. Применение пластмассы EPY для укладки подкранного рельсового пути и рельса пути вращательного портового крана (Щецин, Польша)

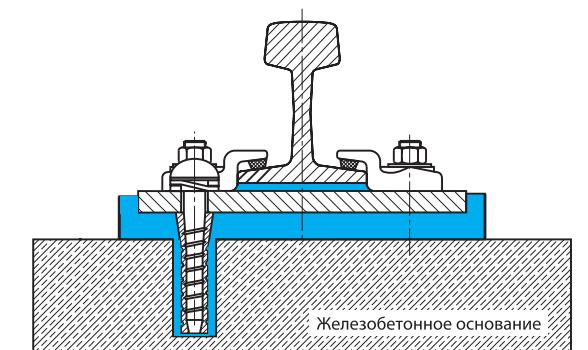


Рис. 6.64. Способ укладки рельса на железобетонном основании с применением пластмассы EPY

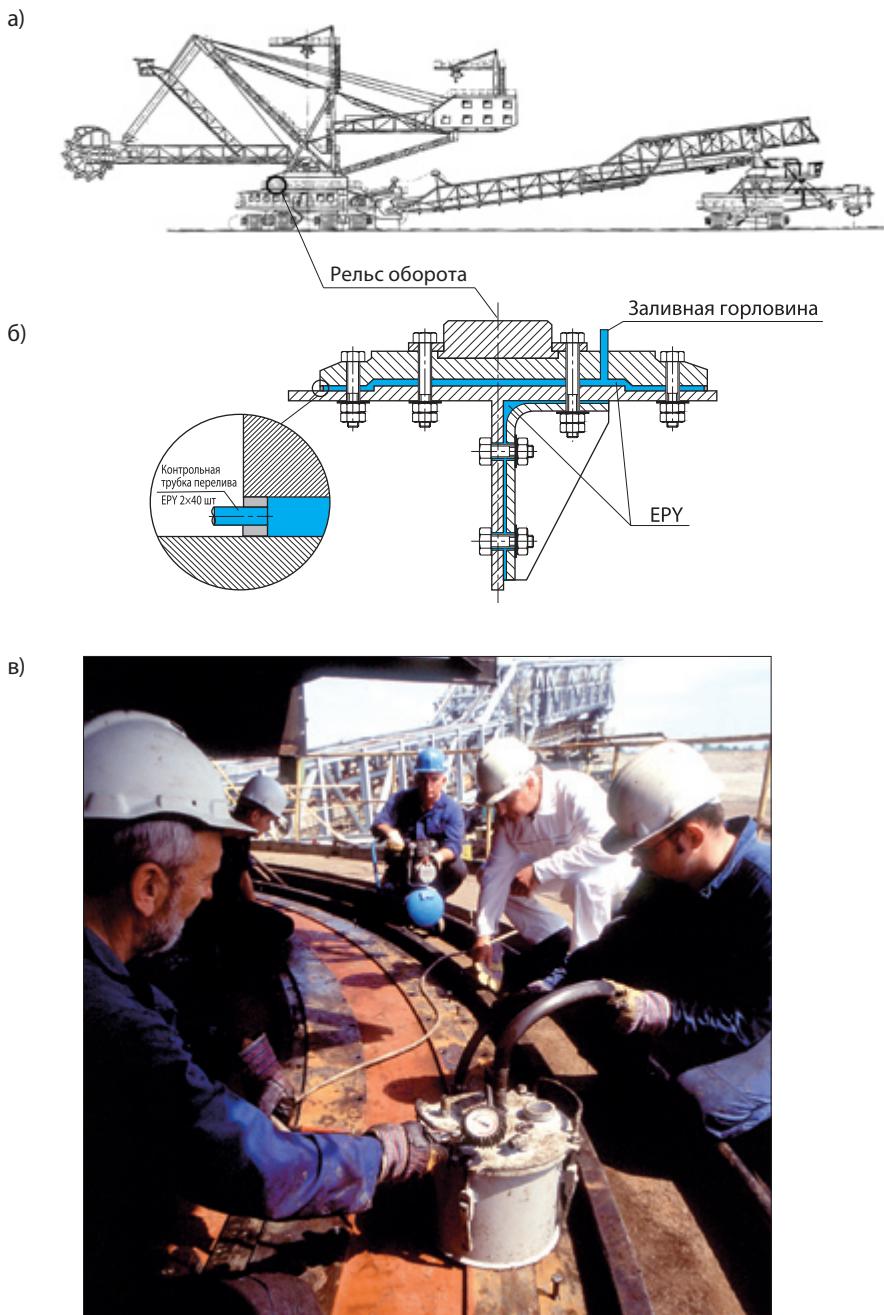


Рис. 6.65. Круговой рельс пути вращательного кузова экскаватора KWK-1500s (карьер „Konin”, Польша), уложенный на пласти массе EPY: а) схема экскаватора; б) схема уложения кругового рельса на пласти массе EPY; в) вдавливание пласти массы в подрельсовое заливное пространство

его шасси, а также применение пластмассы для придания жёсткости узлам этой конструкции. После укладки подрельсовой подкладки в требуемом рабочем положении (при помощи дистанционных элементов) и при соблюдении удержания минимальной высоты зазора около 5 мм, а также после закладки соответствующих уплотнений и лёгкой затяжки крепёжных болтов, пространства, образовавшиеся между опорными поверхностями, были залиты пластмассой, вводимой под определённым давлением (рис. 6.65в). После отверждения пластмассы были затянуты болты, крепящие подрельсовую надкладку.

Размещение тонкого слоя пластмассы в конструкционных узлах, являющихся болтовыми соединениями (рис. 6.65б), придаёт им не только значительную жёсткость, но и лучший, более равномерный перенос нормальных и касательных нагрузок, без появления микроскольжения, коррозии при трении и других форм износа. Положительные технические эффекты, полученные благодаря применению тонкого слоя пластмассы, были подтверждены опытными исследованиями, представленными в разделе 7 (седьмом). Этот метод оправдал себя на практике.

6.3.7. Применение пластмассы ЕРУ при строительстве мостов

Пластмасса ЕРУ имеет одобрение Польского Исследовательского института дорог и мостов (Instytut Badawczy Dróg i Mostów — № AT/2006-03-0018). На рис. 6.66 схематически показаны различные практические способы применения этой пластмассы при монтаже подшипников мостовых пролётов. Несколько примеров применения этой пластмассы для этих целей показано на рис. 6.67-6.71.

На рис. 6.71 представлено новое применение пластмассы ЕРУ при строительстве мостов. В этом случае эта пластмасса оказалась пригодной в соединениях многоболтовых железобетонных сегментов арочных балок моста, строящегося в Rytru. Железобетонные сегменты заканчиваются стальными лобовыми монтажными плитами, приваренными к стальной арматуре балки (рис. 6.71г, д). При этом требуется очень высокая точность монтажа. Отклонение монтажных плоскостей мостовых балок не должно превышать ± 5 мм также как и отклонения координат оси арочной балки, которые тоже не должны превышать величины 5 мм. Для обеспечения необходимой точности соединения таких балок (в пространстве) уже на этапе их проектирования было заложено оставление некоторого зазора между их лобовыми поверхностями. После пригонки соединяемых балок в конечном пространственном расположении этот зазор был залит жидкой пластмассой ЕРУ. После её отверждения была получена прокладка, которая очень хорошо приставала ко всем неровностям соединяемых поверхностей. После затяжки болтов, соединяемых эти поверхности, получалось стабильное соединение, гарантирующее надлежащее их положение

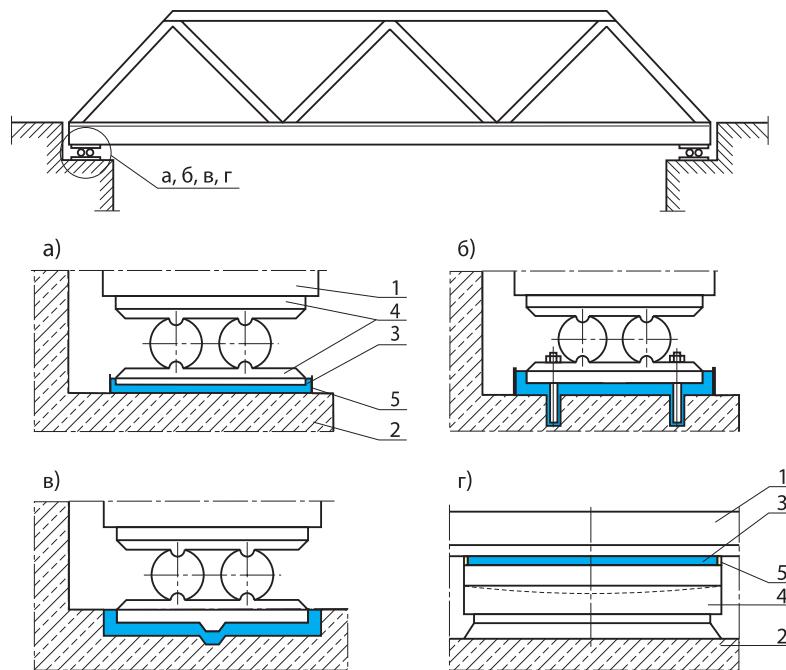


Рис. 6.66. Схемы способов основания мостовых подпор на подкладках из пластмассы ЕРУ: верх-схема пролета моста, 1 — пролет, 2 — бык, 3 — пластмасса ЕРУ, 4 — подшипник, 5 — форма для заливки пластмассы



Рис. 6.67. Железнодорожный мост (Wolin, Польша) с подшипниками, установленными на подкладках из пластмассы ЕРУ (по схеме на рис. 6.66а)

Примеры применения пластмассы при монтаже машин и устройств на сушке



Рис. 6.68. Мост „Siekierkowski” в Варшаве во время постройки (2001 год): а) общий вид моста; б) вид пролета; в) вид подшипника, установленного на пластмассе ЕРЫ по схеме, показанной на рис. 6.66г

в пространстве, прочность на срез и на поверхностную нагрузку. Благодаря таким соединениям непредвиденные монтажные напряжения и деформации практически не выступают. Такого рода напряжения и деформации выступают зато при „силовой пригонке” соединяемых элементов во время их монтажа. Они могут иногда достигать достаточно высоких величин и быть причиной хлопот во время эксплуатации. В таких случаях пластмасса значительно облегчает монтаж и гарантирует его высокое качество. Отверждённая пластмасса имеет гораздо большую прочность на сжатие, чем бетон, а также высокую ползучепрочность. Такое соединение хорошо переносит также срезывающие силы, без появления микро и макроскольжений, фреттинга и других видов

6. Практическое применение подкладок из пластмассы при монтаже машин и устройств

Рис. 6.69. Мост и эстакада с подшипниками, установленными на пластмассе ЕРУ (Wolin)



Рис. 6.70. Пример применения пластмассы ЕРУ для уложения железнодорожных рельсов на стальной эстакаде (Щецин)

Подведение итогов проведенного анализа и количественные данные



Рис. 6.71. Применение пластмассы ЕРУ для монтажа сегментов железобетонных арочных балок:
а) общий вид моста во время его постройки; б) фрагмент арочной балки; в) вид поверхности стыка сегмента арочной балки; г) соединение двух фрагментов арочной балки с видимой щелью для заполнения её пластмассой; д) фрагмент многоболтового скрепления сегментов с видимой щелью, заполненной пластмассой ЕРУ

износа. Они не подлежат коррозии и влиянию изменяющихся атмосферных условий. В результате они гарантируют высокое качество соединений, большую их надёжность и прочность.

6.4. Подведение итогов проведенного анализа и количественные данные, относящиеся к монтажам машин и устройств, выполненным на подкладках, литых из пластмасс, за 1974—2014 годы

Пластмассы для фундаментных подкладок были разработаны для применения в судостроении и там же были сначала применены на практике. В настоящее время они повсеместно применяются при монтаже двигателей и редукторов,

при монтаже дейдвудных труб, втулок рулей, а также многих типов вспомогательных судовых устройств, устанавливаемых как внутри судов, так и на палубах. Благодаря многим преимуществам в настоящее время они всё чаще стали применяться при монтаже также многочисленных различных наземных машин и устройств, работающих в машиностроительной и химической промышленностях, в энергетике, горной промышленности и в карьерах, в промышленном строительстве, в строительстве дорог и мостов, а также в других областях промышленности и хозяйства.

Применение пластмасс для фундаментных подкладок машин и устройств оправдалось на практике и приносит большие технические, эксплуатационные и экономические эффекты.

Польская пластмасса ЕРУ, которая является результатом многолетних систематических научно – исследовательских работ, принадлежит к мировому авангарду в группе специальных пластмасс, предназначенных для фундаментных подкладок машин. Она получила мировое признание и ничем не уступает известным заграничным (Chockfast Orange, Eopcast 36), предназначенным для этой же цели. Она имеет все сертификаты, необходимые для её практического применения при монтаже всякого рода судовых и наземных машин и устройств.

Занимаясь этой проблематикой в течение 40 лет, получен большой исследовательский и практический опыт. В 1974 году впервые были применены польские пластмассы на морском судне. В начале работы при монтаже машин выполняли сотрудники Щецинского политехнического института, а также авторизованные группы фирм, получившие лицензию от этого института. Позднее (в 1989 г.) была

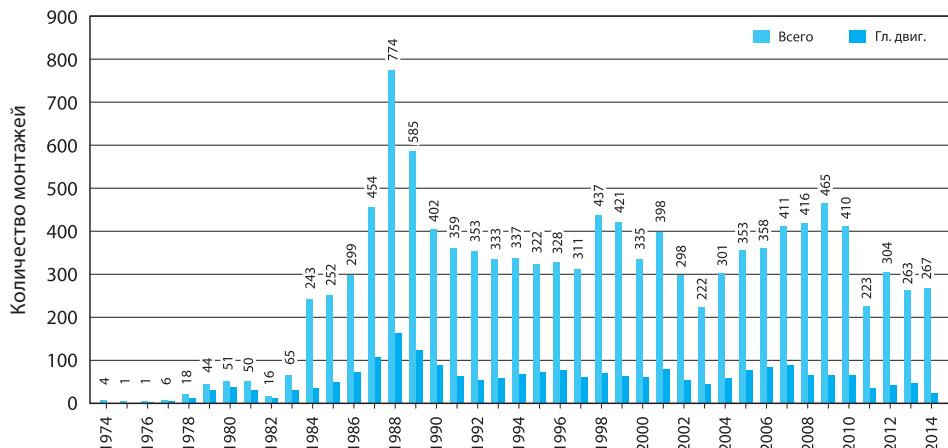


Рис. 6.72. Количественные данные, касающиеся монтажа машин и устройств на подкладках, литьих из пластмассы, за время 1974—2014

Подведение итогов проведенного анализа и количественные данные

Таблица 6.2. Типы и количество машин и устройств, установленных на подкладках, литых из пластмасс за время с 1974 по 2014 год

Судовые машины и устройства	Количество	Наземные машины и устройства	Количество
Главные двигатели	2236	Двигатели	26
Главные передачи	822	Передачи	57
Подшипники валопроводов	945	Подшипники	47
Рулевые машины	326	Станки	354
Дейдвудные трубы и втулки подшипников валопроводов	916	Компрессоры и мотокомпрессоры	54
Втулки баллеров рулей	761	Железнодорожные пути	84
Лебёдки (якорные, швартовные, буксируемые, траловые)	1157	Прессы	87
Генераторы	209	Турбины	37
Насосы	687	Вентиляторы	58
Цистерны	98	Подъёмные машины	6
Другие машины и устройства	1944	Другие машины и устройства	579
Всего	10101	Всего	1389
Всего судовых и наземных		11490	

создана специализированная фирма Marine Service Jaroszewicz (MSJ) в Щецине, руководимая dr inż. Wiesław Jaroszewicz, бывшим сотрудником Щецинского политехнического института, занимающегося этой проблематикой.

Эта фирма переняла все дела, касающиеся изготовления пластмасс, а также выполнения всех работ, связанных с их применением. Тесно сотрудничая со Щецинским политехническим институтом, получила широкое мировое признание и достигла больших успехов как в области исследовательских работ, относящихся к развитию, так и в реализации монтажа машин и устройств на подкладках, литых из пластмассы. Dr inż. W. Jaroszewicz является автором или соавтором многих исследовательских работ, а также научных и технических публикаций. К его достижениям можно причислить много оригинальных новаторских решений, применённых на практике. Группа сотрудников под его руководством сначала в рамках Щецинского политехнического института (1974—1981), а позже в рамках заграничного предприятия PZ KITI в Польше (1982—1989), а с 1990 г. в рамках собственной фирмы (MSJ) — установила в 1974—2014 гг. на подкладках, литых из пластмассы, всего 11490 объект, в том числе 10101 судовых машин и устройств (2236 главных двигателей) и 1389 наземных машин и устройств. Подробные количественные данные, касающиеся этих работ в каждом отдельном году, представлены в виде графика на рис. 6.72, а относящиеся к типам установленных объектов — в таблице 6.2.

7

Испытания пластмасс, применяемых для фундаментных подкладок машин

7.1. Общие требования, предъявляемые пластмассам для фундаментных подкладок машин

Существует много пластмасс, прочность которых больше удельных поверхностных нагрузок, действующих на фундаментные подкладки, применяемые при монтаже судовых машин и устройств. Эта констатация является очень важной, но недостаточной для выбора и применения пластмассы для этой цели. Кроме достаточной прочности на сжатие, пластмасса должна отвечать многим другим общим требованиям, касающимся пластмасс, применяемых на судах [42, 43], а также дополнительным требованиям для пластмасс, предназначенных для фундаментных подкладок машин и устройств [41].

Согласно общим требованиям, сформулированным правилами Польского регистра судов [112], пластмассы, применяемые на судах:

- должны быть подвергнуты огневой пробе согласно требованиям пункта 2.4 правил [41];
- не должны выделять взрывчатые газы (даже тогда, когда их температура будет выше температуры, при которой они должны работать), а также ядовитые и удушливые газы в случае горения;
- если из условий эксплуатации не следует необходимость других пределов, то материалы должны обеспечить надёжную работу машин при температурах: от -40°C до 70°C на открытой палубе и от -10°C до 70°C во внутренних помещениях судна;
- во время эксплуатации они не должны становиться хрупкими, а их механические свойства не должны ухудшаться более, чем на 30% по сравнению с начальным состоянием;
- должны быть гнилостойкими, стойкими к плесени, а также не должны оказывать отрицательное влияние на материалы, соприкасающиеся с ними.

Кроме вышеприведенных общих требований, пластмасса для фундаментных подкладок должна отвечать многим дополнительным требованиям, необходимым для разработки конструкции и способа выполнения монтажа, а также надёжности установленных объектов во время их длительной эксплуатации. В случае литья подкладок из химически отверждённой пластмассы непосредственно под устанавливаемым на судне объектом существенное значение имеют:

- способ подготовки и использования композиции;
- литьевые свойства;
- условия отверждения;
- литьевая усадка, а также осадка подкладок во время монтажа и эксплуатации;
- правила безопасности и гигиена труда.

Благодаря отливке фундаментных подкладок непосредственно под надлежаще установленным объектом, полностью устранена их кропотливая и трудоёмкая пригонка. Литьевые свойства должны обеспечить полное заполнение пространства, предусмотренного для подкладок, а особенно их прилегание к несущим поверхностям фундамента и основания машины. Литьевая усадка пластмассы и осадка подкладок во время монтажа должны быть минимальными. Приготовление композиции, литьё подкладок и их отверждение должны быть выполнены при натуральных или возможных для реализации условиях во время постройки или ремонта судна (напр. температура отверждения).

Вышеуказанные общие и дополнительные требования были основой для разработки соответствующей композиции для фундаментных подкладок, а также способа их литья и монтажа на них судовых машин и устройств.

7.2. Общие замечания, касающиеся испытаний пластмасс, предназначенных для фундаментных подкладок

Испытания и требования, предъявляемые пластмассам для фундаментных подкладок судостроительных машин и устройств, можно разделить на два вида: стандартные и специфические.

Стандартные испытания обычно проводятся на небольших испытательных образцах пластмассы. Форма и размеры образцов, а также способ проведения испытаний точно определены соответствующими нормами, относящимися к этим материалам. Результаты таких испытаний в основном служат для контроля качества пластмассы, а также для сравнения с подобными или другими материалами, испытываемыми таким же способом. Подробный объём такого вида испытаний, а также актуальные стандарты, согласно которым они должны быть проведены, представлены во втором разделе.

Действительные физические свойства пластмассы, играющие существенную роль в отлитой фундаментной подкладке, часто не обнаруживаются при стандартных испытаниях этого материала. Эластичность и вязкость пластмассы являются причиной того, что малые образцы под простыми нагрузками ведут себя иначе, чем конструкционные элементы (напр. подкладки) натуральной величины, выполненные из этого материала. Пластмассы характеризуются особенно большой прочностью и объёмной жёсткостью в случае появления трёхосной нагрузки. Основными преимуществами подкладок, литых из пластмассы и имеющих существенное значение для монтажа объектов, являются:

- их точная пригонка к опорным поверхностям фундамента и к основанию машины;
- почти идеальная величина модуля упругости;
- высокая эффективность коэффициента трения при контакте со сталью.

В результате это даёт равномерное распределение и хорошую передачу нагрузок в нормальном и касательном направлениях к поверхности фундамента. Вполне понятно, что пластмассы обладают ещё другими существенными технологическими и эксплуатационными преимуществами, как например, простота литья готовым способом подкладок любых форм и размеров на месте их применения. Они хорошо поглашают колебания и изолируют перенос шумов. Разнообразные преимущества химически отверждённых пластмасс способствовали их всё более частому применению сначала при ремонте и постройке судов, а позднее также при монтаже различных наземных машин и устройств.

Рациональное и эффективное применение этих пластмасс на практике тесно связано с соответствующими знаниями по их переработке и по поведению в разных эксплуатационных условиях. С этой целью было проведено много разных стандартных и специфических испытаний.

В последующих пунктах этого раздела представлены способы и результаты испытаний, касающихся самой пластмассы в качестве конструкционного материала. Эти испытания в большинстве своём имели стандартный характер и были проведены согласно обязывающим в этой области требованиям. Результаты этих испытаний показывают влияние разных факторов на физические и механические свойства стандартных образцов этого материала. Они имели основное значение, решающее о качестве этой пластмассы и доступности её применения для фундаментных подкладок.

Нестандартные испытания, показывающие поведение пластмассы во время разных реальных практических применений, представлены в следующем разделе.

7.3. Исследования влияния разных сред и температуры на прочность пластмассы ЕРУ на сжатие

Фундаментные подкладки судовых машин и устройств во время эксплуатации часто соприкасаются с водой и маслами. Поэтому они должны обладать соответствующей прочностью при длительном воздействии этих агентов. Пластмасса ЕРУ отвечает этим требованиям, что подтвердили соответствующие исследования.

Испытаниям подверглись образцы диаметром Ø20×25 мм. После отливки в стальных формах эти образцы отвердевали в течение трёх суток при температуре 20°C, а затем их подогревали в течение двух часов при температуре 80°C. Все образцы были разделены на 4 группы. Первую группу образцов подвергли испытанию на сжатие непосредственно после их подогрева и после охлаждения до температуры 20°C. Остальные группы образцов подвергли испытанию на

сжатие спустя 31 день. В течение этого времени они находились соответственно на воздухе, в машинном масле и в водопроводной воде. Результаты испытаний на сжатие представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1. Результаты испытаний на сжатие образцов, хранящихся на воздухе, в масле и в воде

№ группы образцов	Среда и время хранения образцов	№ образца	Сопротивление сжатию R_c , МПа	
			результаты опытов	средние величины
1	Воздух; образцы, испытанные непосредственно после их изготовления	1	146	146
		2	148	
		3	145	
2	Воздух; образцы, испытанные после 31 дня хранения в этой среде	1	151	151
		2	151	
		3	150	
3	Машинное масло; образцы, испытанные после 31 дня хранения в этой среде	1	158	157
		2	156	
		3	158	
4	Водопроводная вода; образцы, испытанные после 31 дня хранения в этой среде	1	150	149
		2	151	
		3	146	

Результаты испытаний не показали отрицательного влияния воздуха, машинного масла и водопроводной воды на подкладочную пластмассу. Небольшой рост сопротивления на сжатие после 31 дня хранения образцов можно объяснить влиянием времени на полное отверждение этой пластмассы.

Испытания влияния температуры на прочность R_c пластмассы ЕРУ были проведены на образцах, изготовленных и отверждённых таким же образом, как при исследованиях влияния масла и воды. Охлаждённые образцы были выдержаны в течение 24 часов в метиловом спирте при температуре -20°C . До такой же температуры были охлаждены элементы оснастки, соприкасающейся с образцом во время испытания на сжатие. Испытания при положительных температурах были проведены с использованием нагревательной камеры. Перед испытанием на сжатие образцы выдерживались в течение двух часов в заданной температуре. Результаты испытаний представлены в таблице 7.2.

Проведенные испытания (таблица 7.2) показали бесспорное влияние температуры на прочность пластмассы ЕРУ при сжатии. При снижении температуры наблюдается заметный рост прочности, а при повышении температуры – уменьшение прочности. Это является типичным для всех подкладочных пластмасс, изготовленных на основе эпоксидных смол.

Кроме вышеописанных кратковременных испытаний влияния воздуха, масла и воды на результаты испытаний на сжатие образцов из пластмассы ЕРУ (таблица 7.1) в Щецинском политехническом институте на протяжении многих лет

Таблица 7.2. Результаты испытаний образцов на сжатие при разных температурах

№ серии	Температура опыта, °C	№ образца	Сопротивление сжатию R_c , МПа	
			результаты опытов	средние величины
1	−20	1	181	
		2	181	
		3	167	176
2	+20	1	146	
		2	148	
		3	145	146
3	+60	1	102	
		2	108	
		3	100	103
4	+80	1	98	
		2	95	
		3	84	92
5	+100	1	90	
		2	99	
		3	81	90

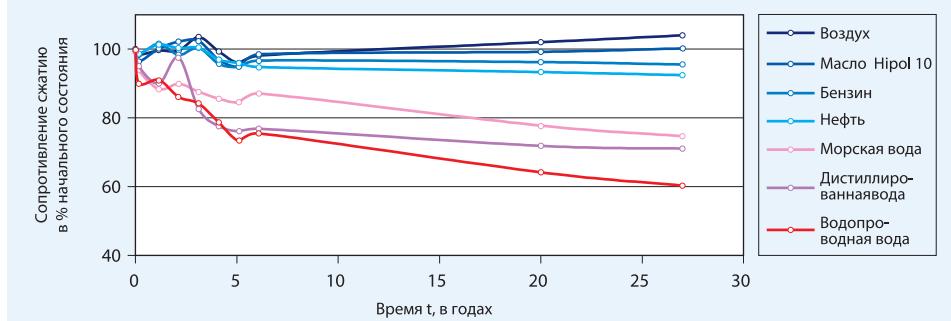
были проведены также испытания, касающиеся длительного влияния разных сред на прочностные свойства эпоксидной пластмассы. Эти испытания начались в 1975 году. С того времени цилиндрические образцы из эпоксидной пластмассы EP-571 диаметром $d = 20$ мм, высотой $h = 20$ мм и состав которых близок к пластмассе EPY, хранятся в стеклянных банках с различными средами. Эти образцы были отверждены при комнатной температуре в течение трёх суток (без их позднейшего дополнительного отверждения). По истечении определённого периода времени несколько штук из этих образцов вынимали из банок и подвергали испытанию на сжатие. Результаты этих испытаний показаны в таблице 7.3.

Из проведенных исследований следует, что только водопроводная и дистиллированная вода заметно уменьшила прочность на сжатие исследованной пластмассы. В водопроводной воде по истечении 27 лет прочность пластмассы уменьшилась на 40%. Значительно меньше снижение прочности (примерно на 25%) в то же самое время было вызвано воздействием воды из Атлантического океана. Но в то же время устойчивость исследуемой пластмассы к длительному воздействию воздуха, бензина, керосина и смазочных масел (Hipol 10) является очень большой. В этом случае никакие существенные количественные и качественные изменения при испытании на сжатие не были обнаружены.

Следует подчеркнуть, что условия вышеупомянутых лабораторных испытаний были значительно хуже, чем реальные условия эксплуатации фундаментных подкладок. Это связано с большой поверхностью образцов по отношению к их объёму. В реальных подкладках контакту с окружающей газовой или жидккой

Таблица 7.3. Сопротивление сжатию образцов, изготовленных из пластмассы ЕР-571 и подвергнутых продолжительному действию разных сред

Время хранения образца в данной среде в годах	Среднее сопротивление сжатию R_c , МПа образцов, хранящихся в разных средах						
	воздух	масло Hipol 10	бензин	нефть	морская вода	дистиллированная вода	водопроводная вода
0,000	102,9	102,9	102,9	102,9	102,9	102,9	102,9
0,164	101,3	99,2	101,1	106,6	96,8	97,9	92,7
1,151	102,5	103,0	104,5	104,2	91,0	93,0	93,7
2,137	102,5	105,0	101,1	103,2	92,5	90,2	88,6
3,123	106,5	105,4	103,3	103,3	90,1	85,0	86,5
4,110	102,2	99,7	98,5	99,8	88,1	79,2	81,0
5,096	98,8	97,8	97,7	98,8	87,1	78,3	75,4
6,082	100,9	101,4	99,5	97,5	89,6	79,1	77,7
20,000	105,1	102,1	99,1	96,2	80,1	74,0	66,1
27,000	107,0	103,1	98,3	95,1	76,9	73,2	62,0



средой подвергаются только лобовые свободные поверхности. Выводы из проведенных лабораторных испытаний вполне подтверждаются результатами эксплуатации внедрённых подкладок.

7.4. Испытания влияния низких температур на характеристику пластмассы и величины некоторых параметров прочности на сжатие

Целью испытаний было определение влияния низких температур ($0, -20, -60$ и -120°C) на механические характеристики пластмассы ЕРУ, полностью отверждённой в разных температурах ($50, 80$ и 120°C в течение 4 часов), а также определение величины её основных показателей сопротивления сечения, определённых при испытании на сжатие.

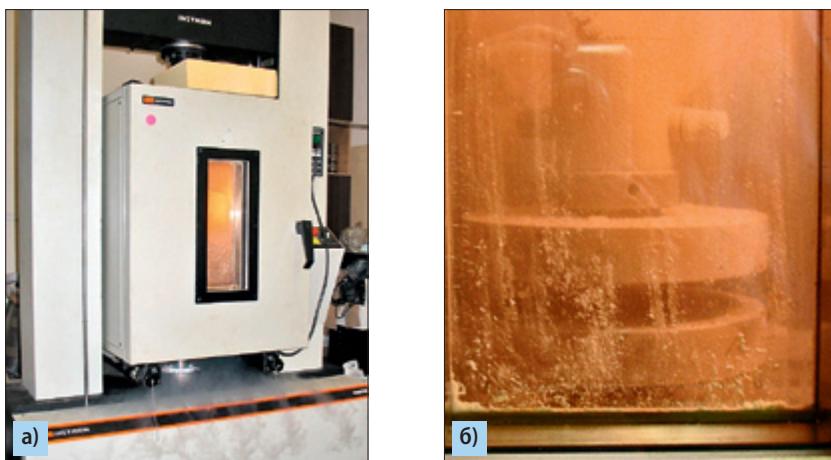


Рис. 7.1. Термическая камера испытательной машины Instron во время работы: а) общий вид; б) вид полости камеры

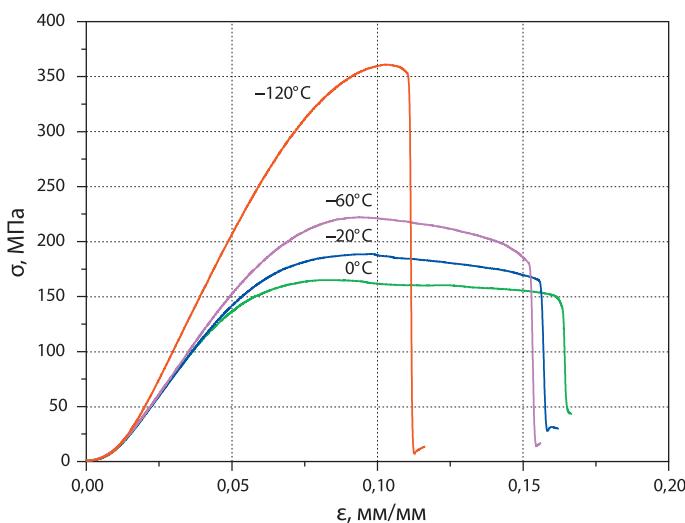


Рис. 7.2. Характеристики сжатия образца пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённого при температуре 80°C в течение 4 часов, определённые при разных низких температурах

Испытания на сжатие были проведены на универсальной машине Instron (модель 4026), оборудованной термической камерой (рис. 7.1) с использованием специального программирования.

Испытания были проведены при температурах: 0, -20, -60 и -120°C (в атмосфере азота) на цилиндрических образцах размером Ø10×20 мм, которые были

полностью отверждены при температурах: 50, 80 и 120°C после предыдущего их отверждения при температуре 22 ±1°C в течение 24 часов. После размещения образцов в термической камере был мониторинг достижения заданной температуры испытаний и её удержания в образцах (с точностью ±1°C) при помощи термопар, помещенных внутри дополнительных контрольных образцов в данном состоянии отверждения.

Затем подготовленные серии образцов (по 5 шт.) подверглись одноосному сжатию (в камере при низких температурах) со скоростью тактов поршня машины 1,3 мм/мин (что отвечает скорости деформации 0,208 мин⁻¹) вплоть до их разрушения.

На рис. 7.2 показано примерное изменение характеристик сжатия при вышеуказанных низких температурах образцов пластмассы EPY, доотверждённой при 80°C. Суммарное сопоставление величин выбранных моментов сопротивления сечения, установленных при испытаниях на сжатие пластмассы, отверждённой постепенно в разных условиях, показано на рис. 7.3—7.6. Подобные описания и результаты проведенных опытных испытаний представлены в работе [162].

Как показано на рис. 7.2, низкие температуры уподобляют расположение кривых «напряжение — относительная деформация эпоксидной пластмассы» образу характеристик естественно хрупких материалов. Здесь можно наблюдать, что вместе с понижением температуры интенсивно увеличивается модуль Е и наступает всё большее сжимание, типичное для пластических материалов, плоской линии кривых так, что при температуре -120°C пластмасса EPY достигает состояния хрупкости, при котором уже не видно следов пластичности.

Рост модуля Е и утрата пластичности пластмассы при низких температурах из-за своеобразного „замораживания“ движения цепи молекул полимера дают результаты увеличения величин моментов сопротивления сечения вместе с понижением температуры при испытании (рис. 7.3—7.6). Однако влияние низких температур на прочностные свойства эпоксидной пластмассы является очень сложным, а термодинамический анализ деформаций под влиянием нагрузки, хотя и подобный как в металлургии, является ещё более сложным, т. к. должен рассматриваться в категориях нуклеации и коалесценции микродомен сдвига, ограничений молекулярных движений, а также нанофлюктуации плотности структурирования и концентрации дефектов сети [163].

7.5. Определение зависимости степени структурирования пластмассы EPY от температуры гелеобразования

Непосредственную зависимость между температурой гелеобразования (T_g), увеличивающейся по мере отверждения пластмасс, и степенью их структурирования (α) описывает эмпирическое уравнение DiBenedetto [113], которое согласно Nielsen'у [81] имеет вид:

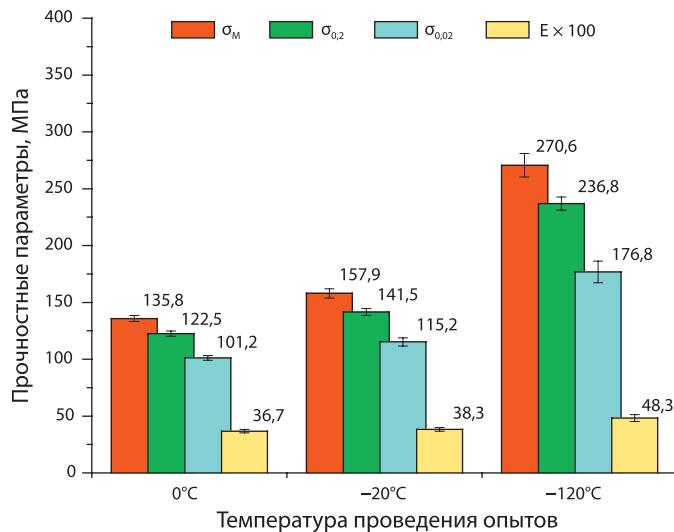


Рис. 7.3. Сравнение величин выбранных показателей прочности пластмассы ЕРУ, отверждённой при температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 24 часов, определенных при низких температурах

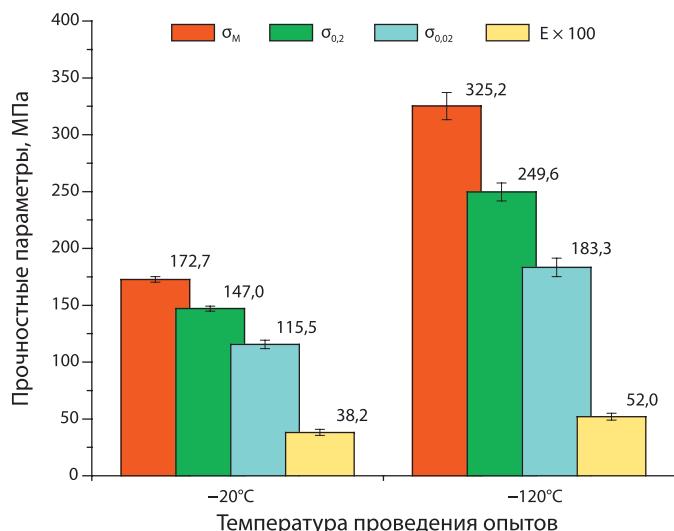


Рис. 7.4. Сопоставление выбранных показателей прочности пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённой при температуре 50°C в течение 4 часов, при определенных низких температурах

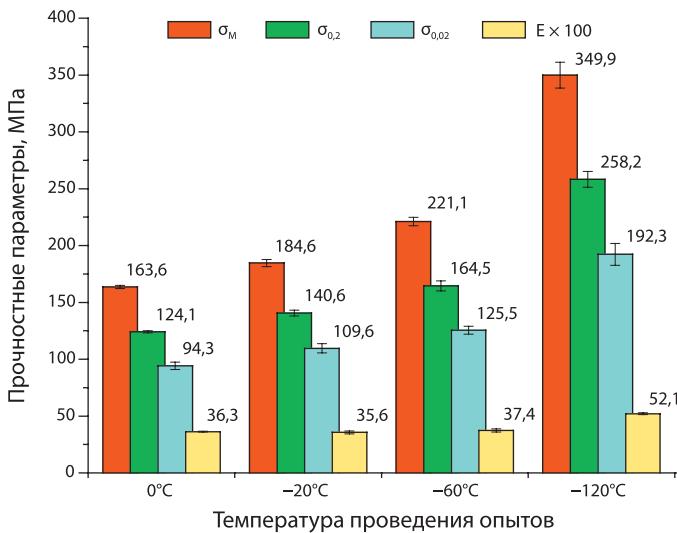


Рис. 7.5. Сопоставление выбранных показателей прочности пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённой при температуре 80°C на протяжении 4 часов, при определенных низких температурах

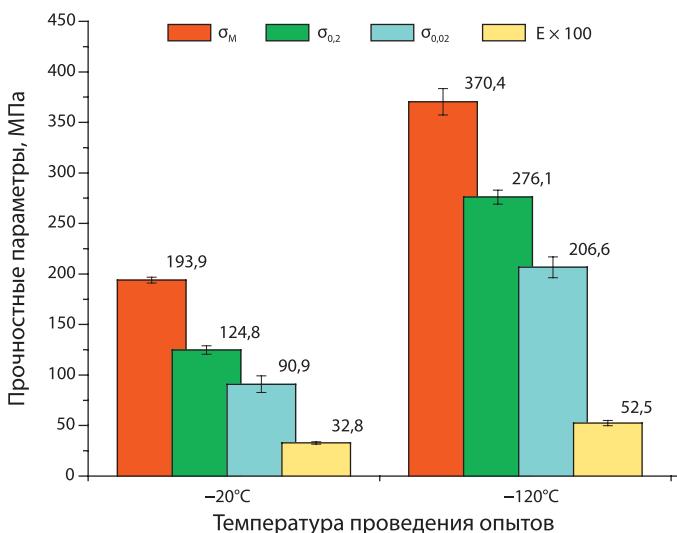


Рис. 7.6. Сопоставление выбранных показателей прочности пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённой при температуре 120°C на протяжении 4 часов, при определенных низких температурах

$$T_g = T_{g0} + \frac{(T_{g\infty} - T_{g0})\lambda\alpha}{1 - (1 - \lambda)\alpha} \quad (7.1)$$

где:

T_{g0} — температура гелеобразования неструктурной смолы ($\alpha = 0$);

$T_{g\infty}$ — температура гелеобразования структурированной смолы ($\alpha = 1$);

λ — параметр, зависящий от структуры, величина которого находится между 0 и 1.

Параметр λ , как доказали Pascault и Williams [86, 114], можно определить из зависимости:

$$\lambda = \frac{\Delta C_{p\infty}}{\Delta C_{p0}} \quad (7.2)$$

где: $\Delta C_{p\infty}$ и ΔC_{p0} — разница удельной теплоты эпоксидной системы в соответственно гелеобразованном и эластичном (или жидком) состоянии в T_g для полностью структурированной и неструктурной смолы.

Однако уравнение DiBenedetto (7.1) по трактовке Pascault'a и Williams'a [86, 114], Oleinik'a и Hale'a, описывающее зависимость $T_g = f(\alpha)$ для пластмассы EPY, представлено в работе [92].

В уравнении (7.1) величина α находится в пределе (0, 1) и вообще принято, что система эпоксид – амин может достигнуть 100%-ую конверсию ($\alpha = 1$) после дополнительного структурирования.

Подстановление полученных экспериментальным путём величин температур гелеобразования (см. раздел 3, пункт 3.3.2) и вычисленной из уравнения (7.2) величины параметра $\lambda = 0,426$ [87, 88] в уравнении DiBenedetto (7.1) дают возможность представить зависимость между T_g и α для пластмассы EPY в следующей форме:

$$T_g = -45,6 + \frac{(111,2 + 45,6)0,426\alpha}{1 - (1 - 0,426)\alpha} \quad (7.3)$$

Рисунок 7.7 представляет эту зависимость в виде кривой $T_g = f(\alpha)$ (сплошная линия), которая показывает, что температура гелеобразования системы повышается нелинейно с начальной величины T_{g0} до максимальной $T_{g\infty}$ вместе с увеличением степени её структурирования (α). Во время структурирования системы, когда его степень является ещё небольшой, T_g увеличивается благодаря всё большей численной величине среднего молекулярного веса эпоксидной смолы (M_n), а начиная с пункта гелеобразования ($\alpha = 0,58$) [87, 88] дальнейший рост T_g наступает в результате увеличения плотности структурирования материала.

Верификация принятой модели DiBenedetto (7.1), проведенная выше пункта системы EPY ($0,58 < \alpha < 1$) на отверждённых образцах при температуре 23°C в течение разных отрезков времени (4—168 часов), а также на полностью отверждён-

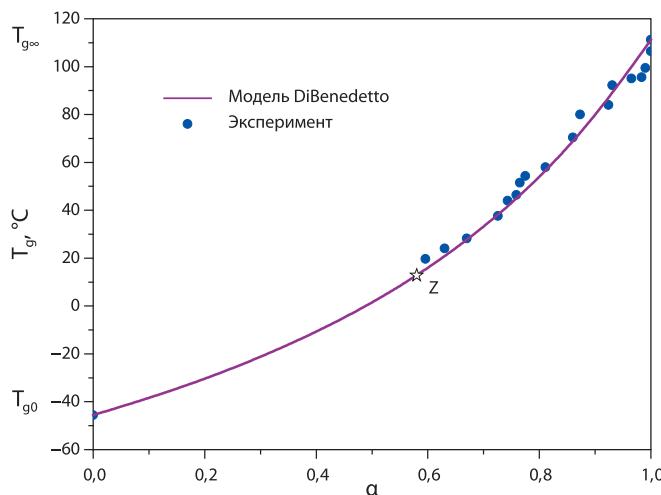


Рис. 7.7. Температура гелеобразования (T_g) в функции структурирования (α) пластмассы EPY: модель DiBenedetto (сплошная линия) и результаты экспериментов (символы); на рисунке буквой (Z) отмечен пункт гелеобразования пластмассы

ных образцах при разных температурах (30—100°C) в течение разных отрезков времени (1—4 часов), подтвердила её хорошее соответствие с результатами экспериментальных исследований, что показано на рис. 7.7 (символы), а также в работах [87, 88, 93, 94]. Небольшой разброс величины T_g при высших степенях структурирования можно приписать меньшей чувствительности устройства DSC при измерении уровня конверсии по сравнению с измерением T_g [115].

При верификации принятой модели степень структурирования (α) пластмассы вычислена по формуле [116]:

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta H_{\text{res}}}{\Delta H_T} \quad (7.4)$$

где: ΔH_{res} — остаточная энталпия частично структурированного образца пластмассы; ΔH_T — суммарная энталпия реакции, отвечающая образцу „в состоянии смешения”, без раньше проведенного структурирования ($\Delta H_T = 273,8 \text{ Дж/г}$) [88].

Доказанная для пластмассы EPY связь между температурой гелеобразования и степенью полного структурирования является независимой от температуры структурирования, т. е. определённая по формуле (7.3) непосредственная зависимость T_g может служить подлинной мерой конверсии. С практической точки зрения это является существенной выгодой, т. к. T_g системы можно с большой точностью и легче измерять, чем конверсию, особенно при её больших величинах, при которых T_g растёт, несмотря на то, что калориметр DSC не показывает уже изменения остатков тепла [117].

7.6. Исследование влияния состояний отверждения и дополнительного отверждения пластмассы ЕРУ на её прочностные характеристики при сжатии

Целью исследований было определение влияния температуры полного отверждения (в пределах 40—180°C) пластмассы ЕРУ (предварительно отверждённой при температуре 22 ±1°C) на её механические характеристики и величины некоторых показателей, определённых при испытании на сжатие.

Исследования были проведены при температуре 23°C на цилиндрических образцах (Ø20×25мм). После отливки образцов в стальных формах, они сначала в течение 24 часов отверждались при температуре 22 ±1°C, потом эти образцы были разделены на восемь групп (по 5 шт.) и подвергнуты отверждению в течение двух часов при температуре в пределах от 40°C до 180°C, с интервалом в 20°C. Так отверждённые группы образцов подвергли испытанию на сжатие с рекомендованной нормами скоростью такта поршня машины 1,3 мм/мин (с быстрой деформации $\dot{\epsilon} = 0,208 \text{ мин}^{-1}$). Испытания на сжатие были проведены на испытательной сервогидравлической машине Instron, применяя соответствующее программирование. Кроме того, четыре группы образцов (по 5 шт.), полностью отверждённых при температурах 40, 60, 80, и 100°C (в течение 2 часов), были подвергнуты испытанию на сжатие со скоростью, отличающейся величинами одного ряда скорости деформации $\dot{\epsilon}$, и с диапазоном 0,208—20,8 мин^{-1} (т. е. при скоростях тактов поршня машины от 0,13 до 130 мм/мин). Результаты испытаний представлены на рис. 7.8—7.11.

На рис. 7.8 в системе координат «напряжение—относительная деформация» представлены характеристики, показывающие поведение исследуемой пластмассы во время испытания на сжатие (со стандартной скоростью деформации 0,208 мин^{-1}) в зависимости от температуры дополнительного отверждения (T_c) образцов. Общий вид кривых «напряжение—относительная деформация» для температур дополнительного отверждения до 60°C сохраняет свою типичную форму. Он делает наглядным область быстрого перехода от эластичного состояния в эластично-пластическое состояние, а также обширные области почти идеального «пластического» плавания. При этом наблюдается некоторое увеличение прочности (σ_M), а также уменьшение района плавания с повышением температуры дополнительного отверждения. При температуре этого отверждения выше 60°C наступает упрочнение материала и увеличивается прочность на сжатие (σ_M).

Величина избранных моментов сопротивления сечения (σ_M , $Rc_{0,2}$, $Rc_{0,02}$, E) вместе с их стандартными отклонениями, определёнными при испытании на сжатие образцов пластмассы, дополнительно отверждённых при разных температурах, представлены на рис. 7.9.

Из исследований следует (рис. 7.9), что величина модуля упругости Young'a (E) уменьшается всё больше по мере роста температуры дополнительного отверждения.

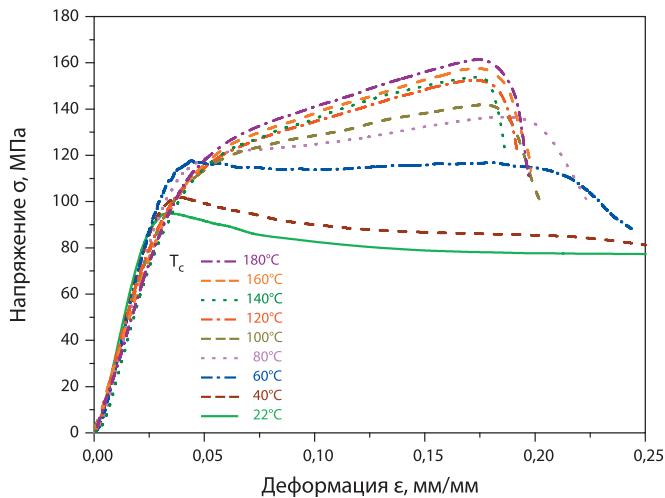


Рис. 7.8. Кривые напряжение—деформация, полученные во время сжатия — со стандартной скоростью деформирования — образцов пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённых при разных температурах

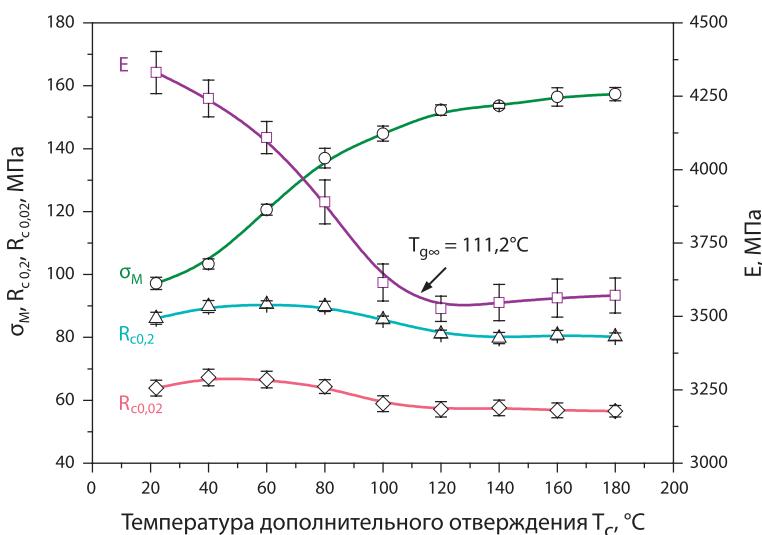


Рис. 7.9. Величины выбранных показателей прочности пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённой при разных температурах, определенные во время сжатия со скоростью деформирования при температуре 23°C; указанная величина $T_{g\infty}$ определена из DSC при 10°C/мин (смотри раздел 3, пункт 3.3.2)

дения до величины, отвечающей температуре гелеобразования ($T_{g\infty}$) полностью структурированной пластмассы EPY, точная величина которой, измеренная при помощи аппарата DSC, равна 111,2°C (см. раздел 3, пункт 3.3.2). Уменьшение величины модуля упругости объясняется тем, что вместе с повышением температуры начинается спад связей второго ряда, благодаря чему сегменты цепей легко могут перемещаться по отношению друг к другу. По мере того, как повышающаяся температура превышает температуру гелеобразования T_g , полимер расширяется, добавочный свободный объем делает возможным появление скольжения больших районов макрочастиц [118], которое вызывает чёткое уменьшение величины модуля Young'a. Таким же образом уменьшаются величины сжимающих напряжений, определяющих условный предел plasticности ($R_{c0,2}$) и условный предел эластичности ($R_{c0,02}$) в районе температуры гелеобразования исследуемой пластмассы (рис. 7.9).

Прочность на сжатие (σ_M) в функции температуры дополнительного отверждения (T_c) ниже температуры гелеобразования полностью структурированной термореактивной пластмассы можно аппроксимировать следующим уравнением Lesser'a [119]:

$$\sigma_M = \alpha(T - T_{g\infty}) + \sigma_M^{T_g} \quad \text{для } T = T_c < T_g \quad (7.5)$$

где: $\sigma_M^{T_g}$ — прочность на сжатие в $T_{g\infty}$, α — коэффициент, описывающий рост σ_M , когда $T = T_c < T_g$

В случае исследуемой пластмассы получено хорошее соответствие (коэффициент корреляции $R^2 = 0,9899$) результатов опытных измерений (рис. 7.10) с результатами расчётов по зависимости (7.5), что можно представить следующим образом:

$$\sigma_M = 0,6584 (T_c - 111,2) + 154,0 \quad (7.6)$$

В таком виде уравнение может использоваться на практике для предсказывания прочности на сжатие пластмассы EPY в зависимости от температуры её дополнительного отверждения.

Прочность на сжатие (σ_M) пластмассы EPY, отверждённой при разных температурах (40—100°C в течение двух часов), увеличивается вместе с увеличением скорости деформаций (рис. 7.11) и также, как и в пластмассе, отверждённой только при температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 24 часов, это увеличение является линейным во всём диапазоне изменений скорости деформации.

Однако наклон линии $\sigma_M = f(\dot{\varepsilon})$ показывает, что вместе с повышением температуры дополнительного отверждения пластмассы, её чувствительность к изменению скорости деформации незначительно уменьшается.

Полученные результаты испытаний на сжатие пластмассы EPY показывают, что её поведение, а также величины её основных моментов сопротивления сечения

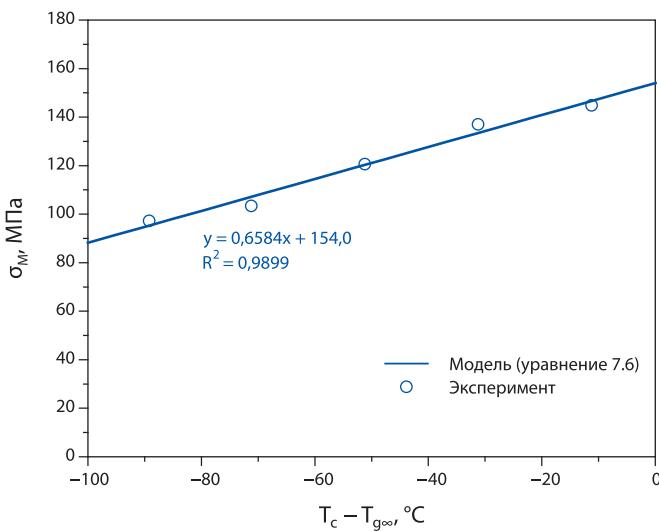


Рис. 7.10. Прочность на сжатие (σ_M) пластмассы EPY в функции ($T_c - T_{g\infty}$), определённая экспериментальным способом и вычисленная по формуле (7.6)

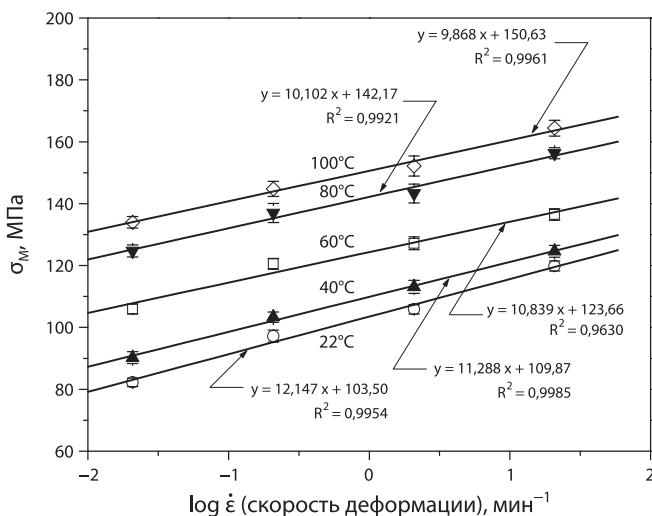


Рис. 7.11. Прочность на сжатие (σ_M) в функции логарифма скорости деформирования пластмассы EPY, дополнительно отверждённой при разных температурах

(σ_M , $R_{c0,2}$, $R_{c0,02}$, E) зависят существенным образом от состояния её отверждения и скорости деформации. Подобные результаты исследований представлены в работах [93, 120—122]. Эти факторы должны быть с надлежащим вниманием учтены при различных практических применениях этой пластмассы.

7.7. Исследование влияния скорости деформации пластмассы EPY на её прочностные характеристики при сжатии

Стандартное испытание на сжатие образцов пластмассы согласно норме ASTM D695 проводится при скорости такта поршня испытательной машины $v = 1,3 \pm 0,3$ мм/мин. В условиях динамических нагрузок фундаментных подкладок машин могут выступить разные скорости приложения силы. При этом существенным параметром является изменчивость нарастания относительной деформации, называемая скоростью деформации пластмассы:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} = \frac{v}{L_0}, \text{ мин}^{-1} \quad (7.7)$$

где: v — скорость нагрузки, L_0 — начальный размер образца.

Целью исследований было определение влияния скорости деформации образцов пластмассы EPY на её характеристики при сжатии и определение на их основании величин выбранных показателей, характеризующих основные механические свойства исследуемой пластмассы, используемой в качестве конструкционного материала, т. е.:

- напряжения сжатия σ_m при максимальной нагрузке, определяющего прочность на сжатие пластмассы (в норме PN-57/H-04320, обозначенную R_c);
- напряжения сжатия $\sigma_{0,2}$ при условной величине пластической деформации $\varepsilon = 0,2\%$, называемой в сопротивлении материалов условным пределом текучести, (обозначенным $R_{c0,2}$);
- напряжения сжатия $\sigma_{0,02}$ при условной величине пластической деформации $\varepsilon = 0,02\%$, называемой в сопротивлении материалов условным пределом эластичности (обозначенным $R_{c0,02}$);
- модуля продольной упругости Young'a (E).

Испытания были проведены на цилиндрических образцах $\varnothing 20 \times 25$ мм. После отливки образцов в стальных формах, они были отверждены при температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 24 часов. Верхние лобовые поверхности образцов были выровнены (тонкое точение) до требуемого размера. Так подготовленная серия образцов (по 5 шт.) была подвергнута одноосному сжатию вплоть до разрушения с отличающейся рядом величин скоростью деформации $\dot{\varepsilon}$ в пределах $0,0208—20,8 \text{ мин}^{-1}$ (что отвечает скоростям такта поршня испытательной машины $0,13—130$ мм/мин). Испытания на сжатие были проведены на испытательной сервогидравлической компьютерной машине Instron (модель 8501 Plus) с применением специального фирменного программирования (Series IX Automated Materials Testing System 9/09/00). Вид испытательного стенда показан на рис. 7.12. Результаты испытаний представлены на рис. 7.13—7.15.

На рисунке 7.13 показано поведение образцов исследуемой пластмассы в системе координат: «напряжение—относительная деформация» с разными

Исследование влияния скорости деформации пластмассы EPY на её прочностные характеристики при сжатии



Рис. 7.12. Испытательный стенд, предназначенный для определения механических характеристик материалов во время опытов сжатия с разной скоростью деформации

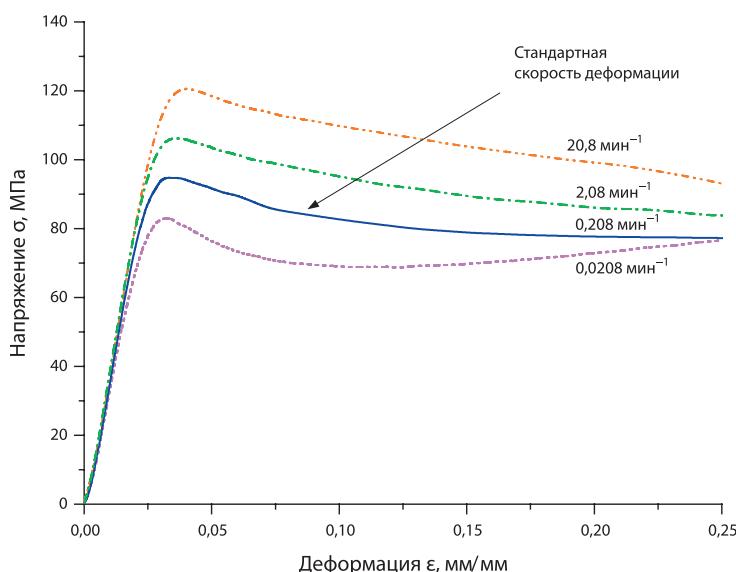


Рис. 7.13. Кривые напряжение—деформация пластмассы EPY, отверждённой при темп. $22 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 24 часов, определены при разных скоростях деформирования

скоростями деформации ($\dot{\varepsilon} = 0,0208, 0,208, 2,08, 20,8 \text{ мин}^{-1}$), отвечающими скоростям такта поршня испытательной машины 0,13—130 мм/мин. Общий вид кривых показывает, что вместе с увеличением скорости деформации увеличивается прочность на сжатие (σ_m). Способ определения величин избранных

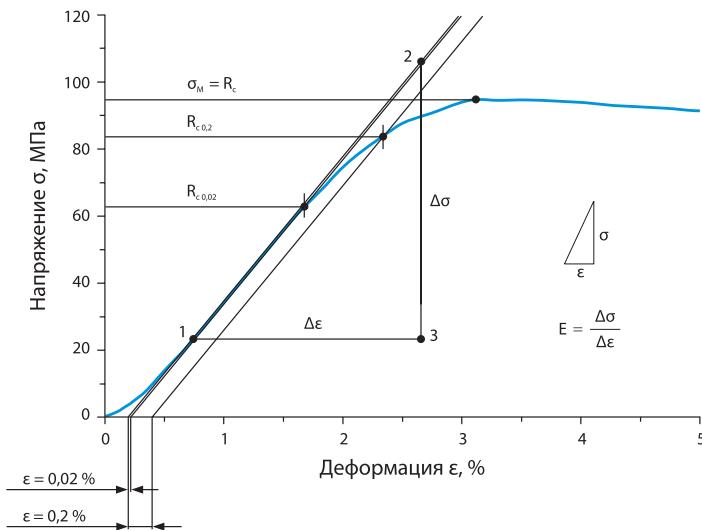


Рис. 7.14. Способ определения выбранных показателей прочности во время статического сжатия материала: прочность на сжатие (σ_M), условный предел текучести ($R_{c,0,2}$), условная граница упругости ($R_{c,0,02}$) и модуль Young'a (E)

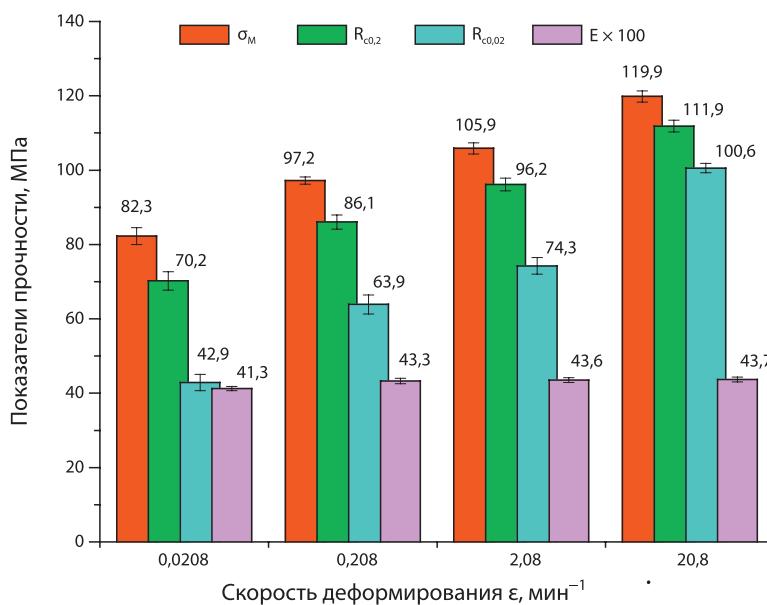


Рис. 7.15. Величины выбранных показателей прочности (обозначенных как на рис. 7.14), определённых при сжатии образцов пластмассы ЕРУ (отверждённой при темп. $22 \pm 1^\circ\text{C}$, в течение 24 часов), сжимаемых при разных скоростях деформирования

моментов сопротивления сечения: $\sigma_M(R_c)$, $\sigma_{0,2}(R_{c0,2})$ и $\sigma_{0,02}(R_{c0,02})$ и E показан на рис. 7.15, а полученные результаты замеров – на рис. 7.15.

Из проведенных испытаний следует (рис. 7.15), что вместе с увеличением скорости деформации чётко увеличиваются величины моментов сопротивления сечения: $\sigma_M(R_c)$, $\sigma_{0,2}(R_{c0,2})$ и $\sigma_{0,02}(R_{c0,02})$, зато величина модуля Young'a (E) показывает только небольшую зависимость от скорости деформации. Подробные описания и результаты экспериментальных исследований представлены в работах [121, 124, 125].

7.8. Исследования влияния повышенной температуры на характеристики пластмассы и на величины выбранных прочностных параметров при сжатии

Целью исследований было определение влияния повышенной температуры (30—160°C) на механические характеристики пластмассы EPY, полностью отверждённой при разных температурах (40—120°C в течение двух часов), а также на величины её основных моментов сопротивления сечения, определённых при испытании на сжатие.

Механические характеристики при сжатии пластмассы EPY при разных измерительных температурах и с разными скоростями деформации были определены при помощи испытательной машины Instron 8501 Plus, оборудованной нагревательной камерой. Исследования были проведены на цилиндрических образцах (Ø20×25 мм), полностью отверждённых в течение двух часов при разных температурах в пределах 40—120°C (с интервалом в 20°C), после предварительного их отверждения при температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 24 часов.

Перед началом испытания на сжатие при данной температуре (30—160°C, с интервалом в 10°C, с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$) образцы находились в нагревательной камере испытательной машины с целью их обогрева во всём объёме, а время подогрева (5—30 мин.) было определено для соответствующего вспомогательного образца с применением термопары.

Подготовленная таким образом серия образцов (по 5 шт.) была подвергнута одноосному сжатию (в камере) вплоть до их разрушения, с отличающимся рядом величин скорости деформации ($\dot{\epsilon}$), равняющимся $0,0208—20,8 \text{ мин}^{-1}$ (что соответствует скоростям такта поршня испытательной машины в пределах 0,13—130 мм/мин). Были определены диаграммы сжатия и величины моментов сопротивления сечения, относящиеся к начальному поперечному разрезу образцов.

Подобные результаты экспериментальных исследований пластмассы EPY представлены в работах [87, 93, 120, 123, 124, 125]. Избранные результаты проведенных испытаний на сжатие показаны на рис. 7.16—7.24.

Рисунок 7.16 представляет средние характеристики сжатия образцов пластмассы EPY, полностью отверждённой при температуре 80°C в течение двух часов,

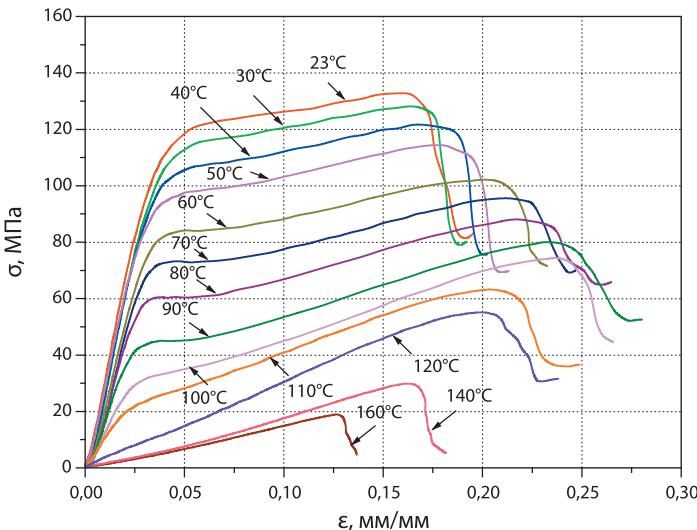


Рис. 7.16. Характеристики сжатия образцов пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённой при температуре 80°C в течение 2 часов, определённые для разных температур при стандартной скорости деформации ($0,208 \text{ мин}^{-1}$)

определенные при разных измерительных температурах (23—160°C), со стандартной скоростью деформации ($0,208 \text{ мин}^{-1}$). Общие формы кривых в системе координат: «напряжение — относительная деформация», которые получены при измерительных температурах до 100°C, сохраняют свою типичную форму. После начального быстрого роста (линейно — эластическая стадия) кривая сжатия «сгибается», создавая характеристическое «колено», центральный пункт которого отвечает пределу пластичности (σ_y) материала при данной температуре. Далее кривая проходит через район легко поднимающегося «plateau» (стадия «пластического» плавания с небольшим упрочнением), заканчивающегося мягкой верхушкой, определяющей максимальное сжимающее напряжение, называемое сопротивлением сжатию (σ_M), после чего наступает резкое падение кривой (стадия разрушения). Совсем другую форму имеют кривые сжатия (рис. 7.16), определённые при температурах 110—160°C. С самого начала испытания деформации имеют значительные величины и упруго-пластический характер. Они увеличиваются приблизительно линейно до достижения кратковременного наивысшего подъёма (пика), определяющего прочность на сжатие (σ_M), после которого наступает стадия разрушения. Полученные результаты показывают, что прочность исследуемой пластмассы на сжатие (σ_M) и предел пластичности (σ_y) отчётливо уменьшаются при повышении температуры замеров.

На рис. 7.17 показаны (в функции температуры) величины выбранных моментов сопротивления сечения (σ_M , $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,02}$, E) вместе с их стандартными отклонениями,

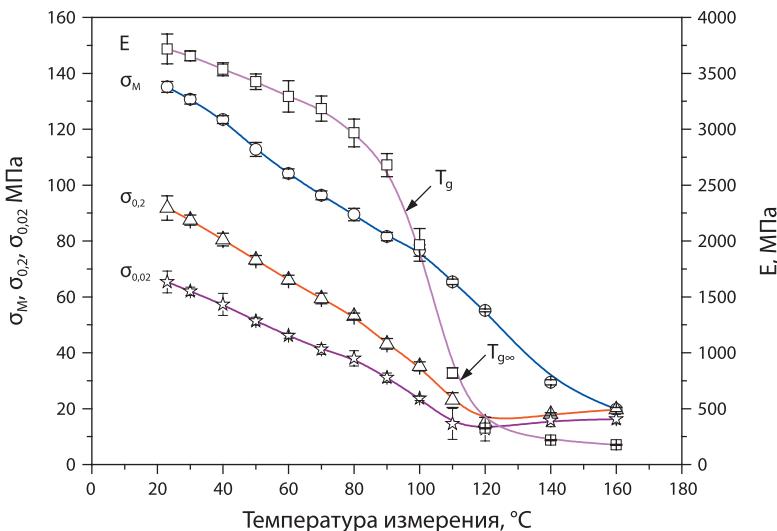


Рис. 7.17. Величины выбранных показателей прочности пластмассы EPY, дополнительно отверждённой при температуре 80°C в течение 2 часов, определённые в представленных на рис. 7.16 опытах сжатия при разных температурах; представленные величины T_g и $T_{g\infty}$ определены из DSC при 10°C/мин (смотри раздел 3, пункт 3.3.2 и раздел 7, пункт 7.5)

определенными из кривых сжатия образцов отверждённой пластмассы EPY, представленных на рис. 7.16. Как и предполагалось, модуль эластичности Young'a (E) уменьшается вместе с увеличением температуры измерения. На уровне температуры гелеобразования ($T_g = 95,6^\circ\text{C}$) полностью отверждённой пластмассы EPY ($80^\circ\text{C}/2$ часа) и температуры гелеобразования полностью структурированной пластмассы ($T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$) (см. раздел 3, пункт 3.3.2 и раздел 7, пункт 7.5) величины модуля E , обозначенные стрелками на рис. 7.17, являются соответственно в полтора и в три раза меньшими, чем при температуре 23°C.

Причиной значительного уменьшения величины модуля E при температурах, превращающих величину T_g , является то, что в результате нагрева уменьшается плотность структурирования в эффекте распада вторичных (двузамещённых) связей [118], которые являются своеобразным жёстким креплением сетки. Тогда становится возможным движение сегментов цепей и появление скольжения больших пространств макрочастиц, что вызывает ухудшение прочностных свойств пластмассы. Вместе с повышением температуры измерения чётко уменьшаются величины остальных моментов сопротивления на сжатие ($\sigma_M, \sigma_{0,2}, \sigma_{0,02}$).

На рис. 7.18 представлена определённая опытным путём при отдельных температурах измерения T прочность на сжатие (σ_M) пластмассы EPY, полностью отверждённой при температуре 80°C в течение двух часов (рис. 7.17), в функции ($T - T_g$). Результаты этих измерений можно в общих чертах представить

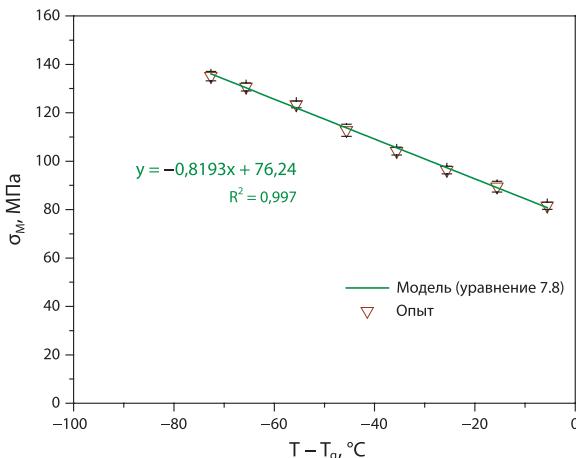


Рис. 7.18. Сопротивление сжатию (σ_m) пластмассы EPY, дополнительно отверждённой при температуре 80°C в течение 2 часов в функции ($T - T_g$), определено опытным путём при стандартной скорости деформирования и подсчитано по формуле (7.8)

в виде простой математической зависимости (при коэффициенте корреляции $R^2 = 0,997$) [120]:

$$\sigma_m = -0,8193 (T - T_g) + 76,24 \quad (7.8)$$

где: T_g – температура гелеобразования для полностью отверждённой пластмассы EPY (80°C/2 часа); $T_g = 95,6^\circ\text{C}$ (см. пункт 7.5).

Формы кривых, представленные на рис. 7.19 в системе координат: «напряжение— относительная деформация», показывающие поведение образцов полностью (80°C/2 часа) отверждённой пластмассы EPY во время испытания на сжатие при температуре измерения 80°C, в условиях разных скоростей деформации $\dot{\epsilon}$ в пределе 0,0208—20,8 мин⁻¹, указывают на большую чувствительность исследуемой пластмассы к изменению скорости деформации.

Результаты измерений выбранных моментов сопротивления сечения (σ_m , $R_{c0,2}$, $R_{c0,02}$, и E) исследуемой пластмассы по отношению к четырём разным скоростям деформации $\dot{\epsilon}$ показаны на рис. 7.20. Отчётливо видно, что с ростом $\dot{\epsilon}$ величины показателей: σ_m , σ_y , $R_{0,2}$ и $R_{0,02}$ значительно увеличиваются, а величина модуля Young'a (E) показывает только небольшую зависимость от скорости деформации.

На рис. 7.21 представлена прочность на сжатие (σ_m) при разных температурах измерения (23—100°C) и при разных скоростях деформации (0,0208—20,80 мин⁻¹) полностью отверждённой пластмассы EPY (80°C/2 часа). Из исследований следует (рис. 7.21), что σ_m растёт линейно вместе с логарифмом скорости деформации во всём исследуемом диапазоне. Следует обратить внимание на тот факт, что

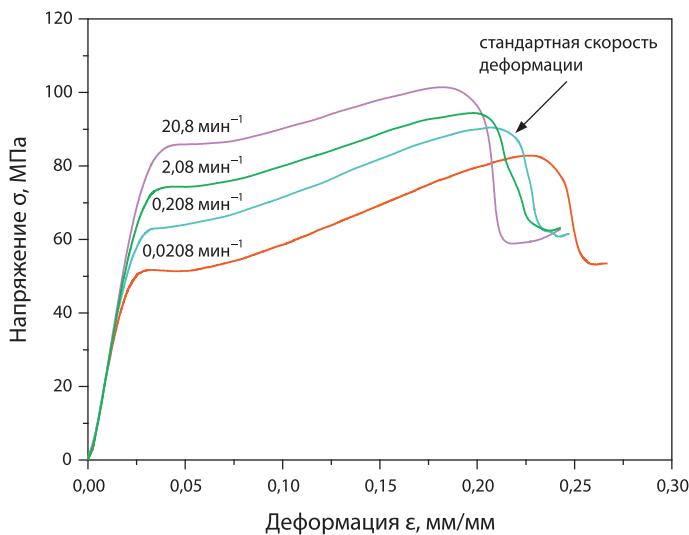


Рис. 7.19. Кривые напряжение—относительная деформация ($\sigma - \varepsilon$) пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённой при температуре 80°C в течение 2 часов, определённые в опытах сжатия при температуре 80°C при разных скоростях деформирования

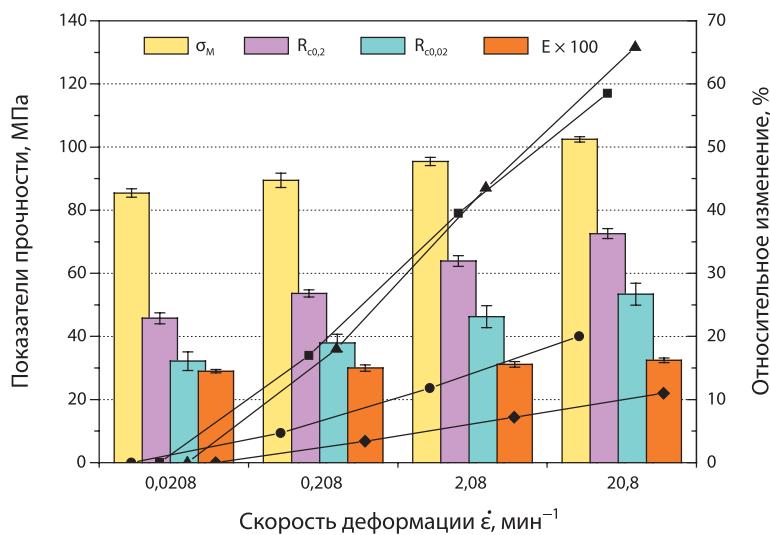


Рис. 7.20. Сводка величин и относительных изменений выбранных прочностных показателей пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённой при температуре 80°C на протяжении 2 часов, определённых в опытах сжатия при температуре измерения 80°C при разных скоростях деформирования

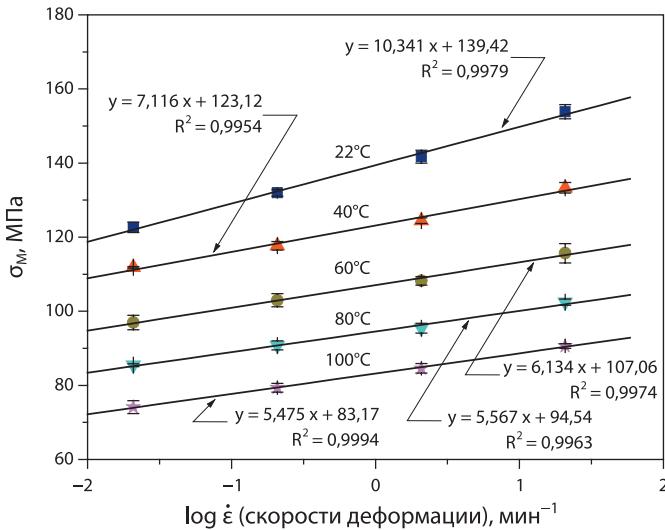


Рис. 7.21. Сопротивление сжатию (σ_m) пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённой при температуре 80°C на протяжении 2 часов, в функции логарифма скорости деформации, определенное при разных температурах измерения

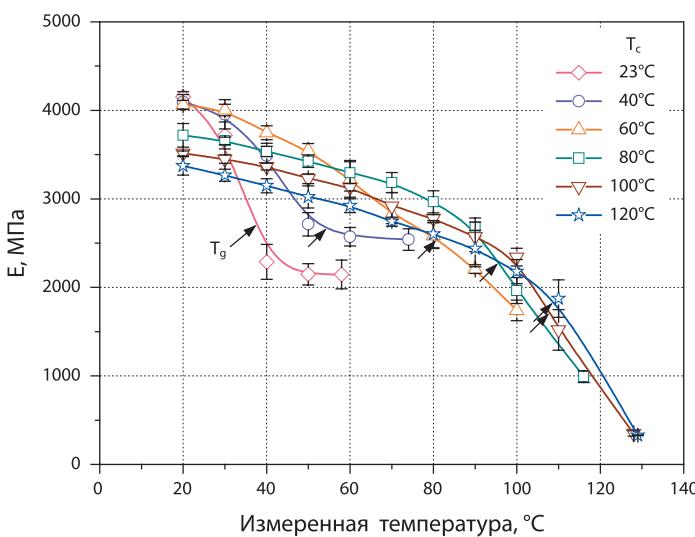


Рис. 7.22. Модуль (E) при сжатии дополнительно отверждённой (при разных температурах) пластмассы ЕРУ, определённый при разных температурах измерений (от 23°C до $T_g + 20^\circ\text{C}$); стрелки указывают температуры гелеобразования (T_g) пластмассы [93]

наклон линии $\sigma_M = f(\dot{\varepsilon})$ уменьшается при повышении температуры исследованной пластмассы, что показывает, что её чувствительность к изменению скорости деформации уменьшается.

На рис. 7.22 представлены зависимости модуля Young'a (E) от температуры измерения (от 23°C до $T_g + 20^\circ\text{C}$) для образцов пластмассы EPY, полностью отверждённой при разных температурах (40—120°C), обозначенных на основании кривых сжатия. Из исследований следует (рис. 7.22), что модуль E уменьшается при повышении температуры полного отверждения также, как и при увеличении температуры измерения. Необходимо обратить внимание на тот факт, что при температуре окружающей среды (23°C) пластмасса EPY, структурированная при очень низких температурах (до 60°C), имеет приблизительно такую же величину $E \approx 4100 \text{ МПа}$. Однако пластмасса, структурированная при невысоких температурах, проявляет большую чувствительность к уменьшению температуры измерения. Чёткое уменьшение величины модуля E наступает только при увеличенной плотности структурирования. На уровне температуры гелеобразования T_g (обозначенной стрелками на рис. 7.22) величина модуля E пластмассы является в полтора раза меньшей, чем при температуре 23°C. Значительное уменьшение величины модуля E при температурах, превышающих величину T_g , наступает, как это раньше было сказано, в результате распада вторичных (двузамещённых) связей в пластмассе [118], что делает возможным движение сегментов цепей и появление скольжения больших районов макрочастиц и вызывает ухудшение прочностных свойств пластмассы. Подробные описания и результаты этих исследований представлены в работе [93].

На рис. 7.23 представлены величины предела plasticитности (σ_y) при сжатии пластмассы EPY, отверждённой при разных температурах (в пределах 40—120°C), определённые в широком диапазоне температур измерения (от 23 до $T_g + 20^\circ\text{C}$). Учитывая чёткость рисунка, здесь не обозначены (максимально 3МПа) стандартные отклонения σ_y . Величина σ_y пластмассы увеличивается при повышении температуры полного отверждения в результате увеличения её плотности структурирования, а уменьшается вместе с повышением температуры измерения. Необходимо (рис. 7.23) заметить, что зависимости $\sigma_y = f(T)$ укладываются обычно линейно до температуры гелеобразования (T_g) для пластмассы, отверждённой при температурах $T_c \geq 60^\circ\text{C}$.

Представленные на рис. 7.24 в системе $\sigma_y = f(T - T_g)$, а также в системе $\sigma_y = f(T/T_g)$, величины функции $\sigma_y = f(T)$, обозначенные для пластмассы, полностью отверждённой при разных температурах (взятые из рис. 7.23), позволяют отчётливо показать влияние температуры гелеобразования (T_g) на сохранение пластичности исследуемой пластмассы.

Формы зависимости $\sigma_y = f(T - T_g)$ для разных T_c (рис. 7.24) укладываются в зависимости от плотности структурирования пластмассы таким образом, что для данной $(T - T_g)$ высший предел пластичности она имеет тогда, когда её плотность

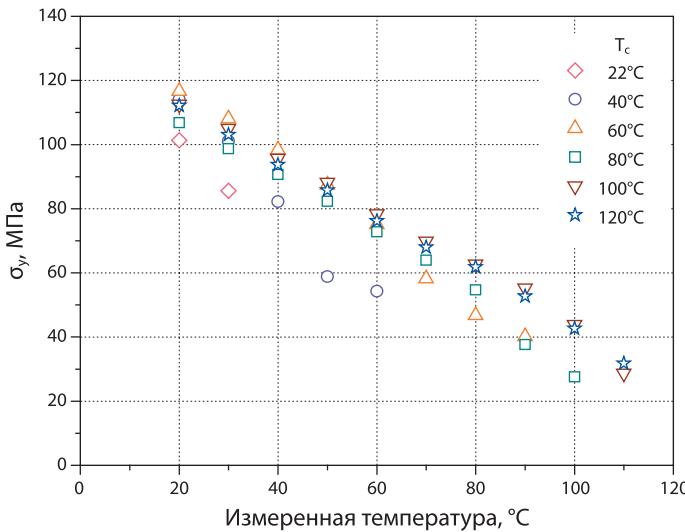


Рис. 7.23. Зависимость предела текучести (σ_y) при сжатии пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённой при разных температурах (40—120°C), определена при разных температурах измерения (от 23°C до $T_g + 20^\circ\text{C}$)

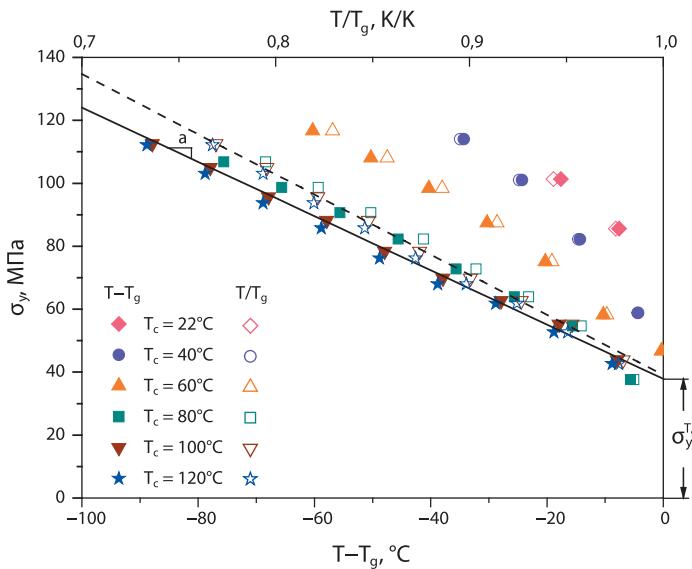


Рис. 7.24. Предел текучести (σ_y) при сжатии в функции температуры измерения получен путём перемещения или нормализования аргумента функции на величину T_g ($T - T_g$ или T/T_g) для пластмассы ЕРУ, дополнительно отверждённой при разных температурах (40—120°C); наклон касательных для $T < T_g$ определяет a , но предел текучести после экстраполяции по отношению к T_g , равен $\sigma_y^{T_g}$ (уравнение 7.10)

структурирования является меньшей. Кроме того, на рис. 7.24 обращает на себя внимание тенденция зависимости $\sigma_y = f(T - T_g)$ укладывания в одной прямой линии при высоких температурах полного отверждения пластмассы ($\geq 80^\circ\text{C}$), т. е. при высокой плотности структурирования ($0,98 < \alpha < 1$) [93]. Эта линейность, полученная путём перемещения аргумента функции (независимая переменная) $\sigma_y = f(T)$ на величину T_g , позволяет определить поведение пластичности пластмассы, особенно отверждённой при высоких температурах, при помощи простого алгебраического уравнения.

В случае невысоких температур структурирования пластмассы ($T_c \leq 60^\circ\text{C}$), когда величины σ_y не укладываются в простую линию (рис. 7.24), можно констатировать, что на величину предела пластичности иначе влияет изменение температуры исследований T , а ещё иначе — изменение T_g . Это обозначает, что химический сдвиг (изменение плотности структурирования) вызывает эффект, который является, бесспорно, разным по сравнению с простым перемещением температуры испытаний по отношению к T_g .

Зависимость предела пластичности (σ_y) химотвердевающей пластмассы от разницы температур ($T - T_g$), представленную на рис. 7.24, можно аппроксимировать эмпирическим уравнением Lesser'a [119]:

$$\sigma_y = a(T - T_g) + \sigma_y^{T_g} \quad \text{для } T < T_g \quad (7.9)$$

где: $\sigma_y^{T_g}$ — предел пластичности при T_g , a — коэффициент, описывающий линейное уменьшение σ_y , когда T уменьшается ниже T_g .

Определённые в опытных исследованиях величины предела пластичности (σ_y) для пластмассы EPY с большой плотностью структурирования ($\alpha > 0,98$) [93], как и температуры гелеобразования, определённые при помощи метода DSC, позволили записать уравнение в виде:

$$\sigma_y = -0,8617(T - T_g) + 37,88 \quad (7.10)$$

Полученное хорошее соответствие результатов опытных исследований с результатами расчётов (с коэффициентом корреляции R^2 , равным 0,987) (рис. 7.24) позволяет на практике использовать уравнение (7.10) для предсказания предела пластичности отверждённой ($80 < T_c < 120^\circ\text{C}$) пластмассы EPY в зависимости от температуры измерения. Подробные описания и результаты этих исследований представлены в работе [93].

На рис. 7.24 при помощи добавочной оси абсцисс представлены также рассмотренные величины σ_y в нормализованной (стандартной) системе по отношению к величине T_g . Расположение соответствующих данных в нормализованной системе $\sigma_y = f(T/T_g)$ (открытые символы) является очень похожим на их расположение в системе $\sigma_y = f(T - T_g)$ (полные символы). Это следует из простого пре-

образования: $(T - T_g)/T_g = (T/T_g) - 1$, которое незначительно перемещает данные, укладывая их в штриховую линию на рис. 7.24 с большим углом наклона. Такая нормализация данных делает возможным отнести пластичность эпоксидной системы к одному её внутреннему свойству, т. е. T_g , что облегчает анализ пластического поведения пластмассы.

Полученные при исследованиях механические характеристики пластмассы EPY показывают, что её поведение и величины её основных коэффициентов прочности (σ_M , $R_{c0,2}$, $R_{c0,02}$, σ_M , E) зависят существенным образом от температуры измерений. Вместе с её увеличением до температуры гелеобразования ($T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$) уменьшаются величины всех определённых коэффициентов прочности.

Уравнения в виде (7.8) и (7.10) хорошо описывают зависимость прочности на сжатие (σ_M) и предела пластичности EPY от температуры измерения и могут быть с большой пользой использованы в инженерской практике.

7.9. Исследования деформируемости пластмассы EPY под постоянной сжимающей нагрузкой при разных скоростях её нагревания

Идентификация признаков (симптомов) и определение влияния скорости нагревания пластмассы EPY на деформации, вызванные постоянной сжимающей нагрузкой и являющиеся результатом появляющегося в ней, так называемого явления размягчения, были целью настоящего исследования. Возможность появления размягчения пластмасс, применяемых для фундаментных подкладок, является их существенным недостатком, вызывающим опасность для монтажа объектов, поэтому нельзя допустить того, чтобы оно появилось на практике при монтаже машин и устройств.

Исследования были проведены на цилиндрических образцах размером $\varnothing 20 \times 25$ мм. После отливки этих образцов в стальных формах их отверждали при температуре $22 +1^\circ\text{C}$ в течение 24 часов, а затем некоторые из них дополнительно отверждали при температуре 80°C в течение 2 часов.

Для исследований способности пластмассы EPY к размягчению была использована испытательная машина Instron (модель 8501 Plus), оборудованная термической камерой (рис. 7.25), а также специальной программой Wavemaker. Сжимающая нагрузка исследуемых образцов была реализована по единой процедуре, охватывающей её линейное увеличение со скоростью 0,314 кН/с (т. е. в течение 5 с до определённой величины 1,57 кН) и затем удержание этой нагрузки (с точностью 0,5%) во время повышения температуры от 25 до 120°C . Принятая нагрузка вызвала в образце напряжение сжатия $\sigma = 5$ МПа. Оно соответствует максимальной допустимой величине напряжения, которую принимают в проектных расчётах монтажей судовых машин и устройств. Исследование было проведено при разных скоростях роста температуры, которые равнялись: 5, 10, 20, 40 и $60^\circ\text{C}/\text{ч}$.



Рис. 7.25. Стенд для определения характеристик деформации пластмассы при постоянно действующей нагрузке и при возрастающей температуре

Реализация отдельных опытов в определённых условиях и регистрация результатов измерений были проведены по специальной компьютерной программе Wavemaker. Измеренные величины силы F и деформаций Δh были записаны с соответствующей частотой в файлах ASCII. Эти файлы для их соответствующей обработки и графического представления хода (пробега) и результатов отдельных исследований переводились на калькуляционный лист Excel. Результаты исследований представлены в графической форме на рис 7.26 и 7.27. Рис. 7.26 представляет результаты исследований образцов, отверждённых при температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 24 часов, без их последующего отверждения. Отдельные кривые на этом рисунке показывают ход деформации в функции температуры для разных скоростей нагрева образцов (5 — $60^\circ\text{C}/\text{ч}$). Отверждённые таким образом образцы достигают большой прочности на сжатие ($\sigma_m = 97,2 \text{ МПа}$), хороших эластических свойств ($R_{c0,02} = 63,9 \text{ МПа}$) и большой величины модуля упругости ($E = 4331,2 \text{ МПа}$).

Длительное отверждение при этой температуре даёт практически мало-значительное улучшение этих свойств. С практической точки зрения это хорошие свойства материала для фундаментных подкладок машин при температуре эксплуатации до 45°C . К сожалению, при температурах выше 45°C эти свойства подвергаются большим изменениям. Пластмасса «размягчается», приобретая свойства упруго-пластичного-липкого материала и подвергается большим прочным деформациям, даже при малых нагрузках $\sigma = 5 \text{ МПа}$.

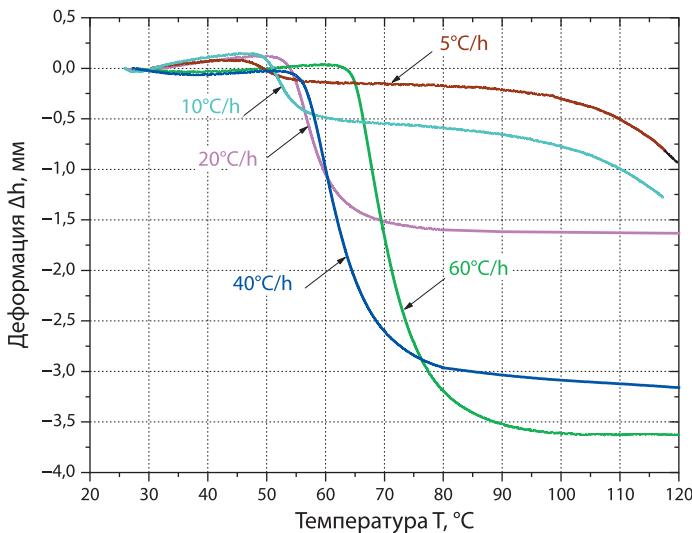


Рис. 7.26. Зависимость деформации (Δh) от температуры для разных скоростей нагревания пластмассы EPY во время её дополнительного отверждения (при $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ в течение 24 часов) при постоянной величине нагрузки сжатия ($\sigma = 5 \text{ МПа}$)

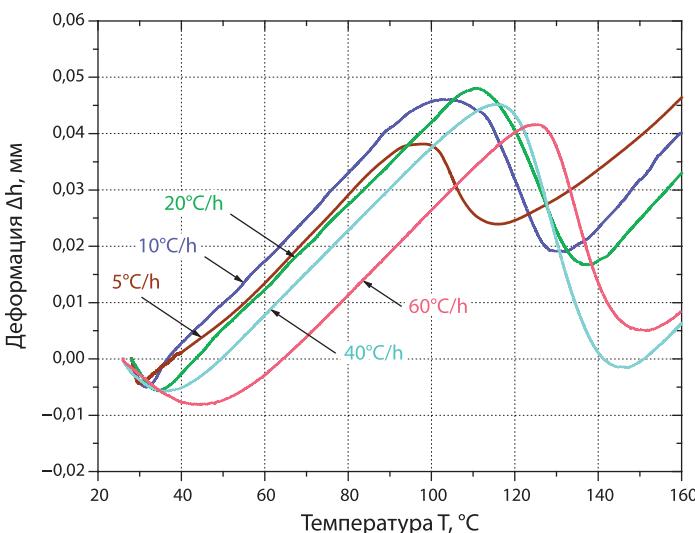


Рис. 7.27. Зависимость деформации (Δh) от температуры для разных скоростей нагревания пластмассы EPY во время её дополнительного отверждения (при 80°C в течение 2 часов) при постоянной величине нагрузки сжатия ($\sigma = 5 \text{ МПа}$)

Из проведенных исследований следует (рис. 7.26), что ход и диапазоны величин деформаций существенным образом зависят от скорости нагревания пластмассы. Во время нагревания образцов, находящихся под небольшой сжимающей нагрузкой ($\sigma = 5\text{ МПа}$), проходят два противоположных макропроцесса: вытяжка образца в результате тепловой расширяемости, а также его укорачивание в результате ползучести. Интенсивность этих двух процессов является разной при разных скоростях нагревания. При малых скоростях нагревания (5, 10 и $25^{\circ}\text{C}/\text{ч}$) сначала наступает увеличение высоты образцов. Это свидетельствует о том, что ползучесть является меньшей, чем прирост высоты, вызванный нагреванием образцов.

При больших скоростях нагревания (например $40—60^{\circ}\text{C}/\text{ч}$) устанавливается сначала некоторое состояние равновесия деформаций, вызванных увеличением температуры и ползучестью. Это происходит до некоторой критической температуры, при которой начинается более или менее резко продвигающийся процесс ползучести. Во время этого процесса образец подвергается большим деформациям. Критическая температура и интенсивность ползучести чётко зависят от скорости нагревания образцов. Появляющаяся при этом деформация имеет упруго-пластично-липкий характер и является нежелательным результатом, обычно называемым «размягчением» пластмассы.

При малой скорости нагревания ($5^{\circ}\text{C}/\text{ч}$) критическая температура (размягчения) равна примерно 45°C . Интенсивность и масштаб процесса ползучести являются при этом относительно небольшими. Исходя из этого, чтобы фундаментные подкладки не подвергались чрезмерной деформации во время эксплуатации установленного объекта, они должны достичь максимальной температуры работы (80°C) при возможной, очень малой скорости их нагревания до этой температуры. Классификационные общества, ведущие надзор за постройкой морских судов, ставят такое условие для фундаментных подкладок из пластмассы [41, 42]. По мере роста скорости нагревания в незначительной степени повышается критическая температура, при которой наступает размягчение, и значительно увеличивается также интенсивность и диапазон процесса ползучести. При скорости нагревания $60^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ критическая температура равна приблизительно 63°C (рис. 7.26).

С целью исключения опасности появления размягчения фундаментных подкладок во время эксплуатации установленного объекта процесс отливки и отверждения подкладок подвергается определённому контролю. Согласно требованиям классификационных обществ [41, 42, 126] во время отверждения фундаментных подкладок, литых при температуре окружающей среды, их экзотерма естественным образом — благодаря экзотермическим свойствам реакции структурирования эпоксидной системы — должна достичь предельной величины около 80°C . На практике при монтаже машин, когда не удается выполнить это условие естественным способом, применяется последующее отверждение

подкладок путём их нагрева теплом, поставленным из внешних источников, напр. дутьём тёплого воздуха.

С целью проверки влияния нагрева пластмассы на появление размягчения были проведены исследования образцов, подвергнутых последующему отверждению при температуре 80°C в течение двух часов. Эти исследования были проведены в таких же условиях нагрузки и нагрева, как и в прошлый раз. Результаты этих исследований представлены на рис. 7.27. Они показывают поведение отверждённых образцов под небольшой постоянной сжимающей нагрузкой ($\sigma = 5$ МПа), при разных скоростях нагрева. В этом случае характеристики деформаций в функции температуры имеют совершенно другую форму, чем для неотверждённых полностью образцов (рис. 7.26). Сперва, после начала процесса нагревания (от температуры 23°C), наблюдается некоторое небольшое укорочение образцов, чётко зависящее от скорости нагревания. Потом начинается отчётливый, приблизительно линейный, рост высоты образцов вплоть до определённой температуры (в пределах от 95 до 125°C), зависящий от скорости нагревания. Позднее наступает некоторый чёткий спад высоты образцов, после чего наблюдается повторный их рост.

Уменьшение высоты образца в первой стадии процесса испытания (рис. 7.27) можно объяснить ползучестью и некоторым замедлением процесса нагревания образца во всём его объёме. Это замедление увеличивается вместе с увеличением скорости нагревания, осуществляющегося в нагревательной камере, в которой находится исследуемый образец. Эффект температурного удлинения, появляющийся с некоторой задержкой, позднее преобладает в ходе процесса испытания. Приблизительно можно считать, что коэффициент термического расширения в пределах температуры 20—90°C для дополнительно отверждённого образца имеет постоянную величину (см. пункт 7.10). Отсюда следует, что полученные формы деформации (рис. 7.27) приблизительно являются линейными и параллельными в данном диапазоне температур.

На основании проведенных исследований можно определить, что в пластмассе, дополнительно отверждённой при температуре 80°C в течение двух часов, наступает зависимое от скорости нагревания уменьшение и перемещение эффекта размягчения в направлении высокой температуры в пределе 90—150°C (рис. 7.27).

Такое последующее отверждение исключает возможность появления этого опасного эффекта в условиях эксплуатации фундаментных подкладок судовых двигателей, когда температура подкладок бывает в пределах 20—80°C. Из исследований следует (рис. 7.27), что предельной величиной температуры эксплуатации фундаментных подкладок, литых из пластмассы ЕРУ, является температура 90°C. Следовательно, практически появляется некоторый запас безопасности.

Вышеупомянутое размягчение и вытекающие отсюда ограничения относятся также к другим эпоксидным пластмассам, применяемым для фундаментных подкладок машин.

7.10. Исследования линейной термической расширяемости пластмассы EPY

Для предсказания и анализа поведения пластмассы EPY в разных условиях её применения, кроме многих других термомеханических свойств, необходимо знать её термическую расширяемость. В связи с этим были проведены соответствующие исследования относительного приращения длины $\Delta L/L_0$ для образцов, выполненных из этой пластмассы, отверждённой при температуре 23°C в течение 24 часов и позднее дополнительно отверждённой при температуре 80°C в течение двух часов. Испытательный стенд, показанный на рис. 7.28 и описанный в работах [127, 128], был подготовлен по фирменному проекту. При этом были приняты во внимание рекомендации стандарта ASTM D 696 и согласно его данным была построена измерительная система, а также была принята процедура измерения. Во время исследований образцы подогревались от 23 до 135°C со скоростью 1,5°C/мин. Результаты исследований представлены на рис. 7.29 и 7.30.

На рис. 7.29 показано относительное приращение длины $\Delta L/L_0$ образцов пластмассы EPY во время их нагревания. В случае не полностью отверждённой пластмассы, когда температура достигает приблизительно 42°C, наклон кривой $\Delta L/L_0$ подвергается принципиальному изменению, представляя проявление гелеобразного перехода, а точка изменения поворота наклона кривой $\Delta L/L_0$ может послужить определению величины температуры гелеобразования (T_g) материала в его состоянии отверждения. В пределах 42—52°C, когда наступает поворот наклона кривой $\Delta L/L_0$, пластмасса подвергается химической усадке. При дальнейшем нагревании вместе с увеличением температуры пластмасса

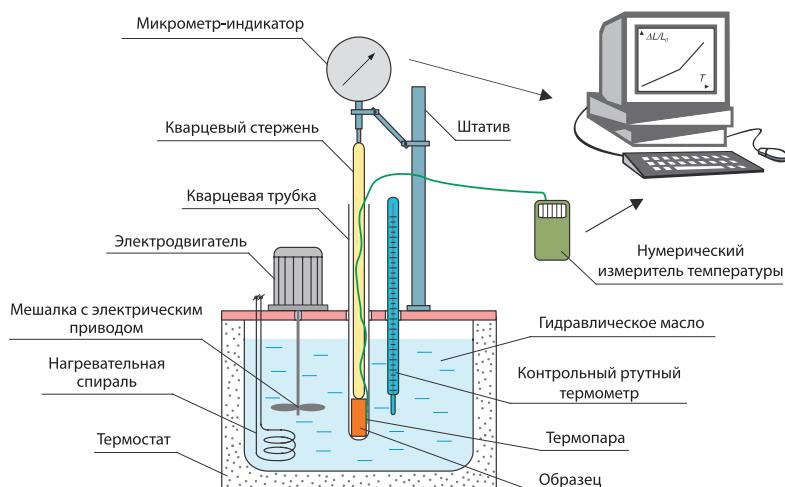


Рис. 7.28. Схема стенд для измерения линейной тепловой расширяемости пластмассы

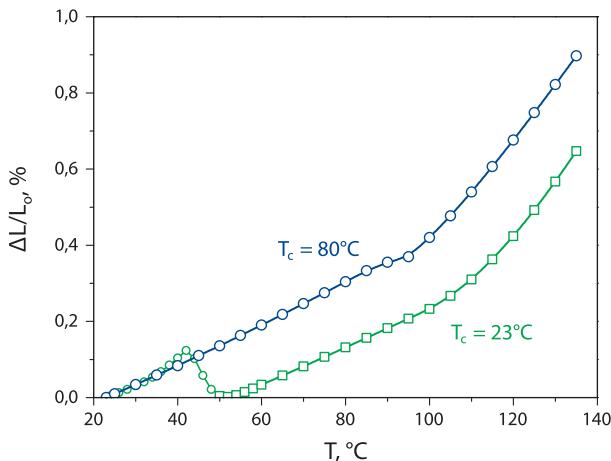


Рис. 7.29. Относительное изменение длины ($\Delta L/L_0$) в функции температуры образцов пластмассы EPY, отверждённой (при $23^\circ C$ на протяжении 24 часов) и дополнительно отверждённой (при $80^\circ C$ на протяжении 2 часов)

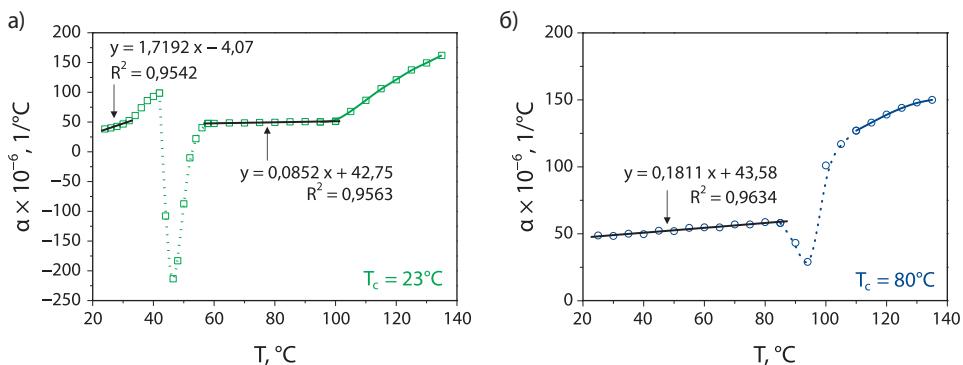


Рис. 7.30. Зависимость коэффициента линейной термической расширяемости (а) от температуры для пластмассы EPY: а) отверждённой (при $23^\circ C$ в течение 24 часов), б) дополнительно отверждённой (при $80^\circ C$ в течение 2 часов)

подвергается последующему структурированию, а ход кривой $\Delta L/L_0$ уподобляется ходу кривой, определённой для полностью отверждённой пластмассы. Однако в форме кривой $\Delta L/L_0$ полностью отверждённой пластмассы (при $80^\circ C$ в течение 2 часов) можно указать (при температуре около $95^\circ C$) точку увеличения роста её наклона, что также может служить определению величины T_g материала в данном полностью отверждённом состоянии.

Определённые таким образом величины T_g пластмассы в исследуемом состоянии отверждения соответственно равны 42 и $96,5^\circ C$ и показывают хорошее

соответствие с величинами, полученными методом DMTA [127]. Тщательное постоянное наблюдение за величинами $\Delta L/L_0$ в интересующем нас диапазоне $T < T_g$ указывает на их нелинейную зависимость от температуры (рис. 7.29), а тем самым указывает на некоторую изменчивость коэффициента линейной термической расширяемости (α).

На рис. 7.30 показаны величины коэффициента линейной термической расширяемости α пластмассы EPY в функции температуры, определённые по формуле (7.11):

$$\alpha_{T_2}^{T_1} = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T} \quad (7.11)$$

где:

ΔL — изменение длины образца, вызванное изменением его температуры на ΔT мм;

L_0 — начальная длина образца при комнатной температуре (23°C), мм;

ΔT — прирост температуры от T_1 до T_2 , после которого наступало измерение изменения длины образца, °C.

При температурах ниже начала гелеобразного перехода, как для неполностью отверждённой пластмассы, так и для полностью отверждённой, наступает небольшой прирост величины коэффициента α .

Для неполностью отверждённой пластмассы коэффициент α растёт от 38,3 до $52,3 \times 10^{-6}$ 1/°C в диапазоне температур 23—32°C (рис. 7.30а), а его средняя величина равна $44,1 \times 10^{-6}$ 1/°C. В этом диапазоне величину α можно аппроксимировать при помощи уравнения:

$$\alpha = 1,7192 \times 10^{-6} - 4,07 \times 10^{-6} T \quad (1/^\circ C) \quad (7.12)$$

в котором T подана в градусах Цельсия. Коэффициент корреляции (R^2) равен 0,954.

Но в то же время для полностью отверждённой пластмассы величина α в диапазоне 23—85°C растёт от 48,8 до $58,1 \times 10^{-6}$ 1/°C (рис. 7.30б) и можно её аппроксимировать уравнением:

$$\alpha = 0,11811 \times 10^{-6} + 43,58 \times 10^{-6} T \quad (1/^\circ C) \quad (7.13)$$

где коэффициент корреляции (R^2) равен 0,963.

В диапазоне 20—80°C, отвечающем пределу температур работы фундаментных подкладок судовых машин и устройств, изготовленных из пластмассы EPY, средняя величина коэффициента α равна $53,2 \times 10^{-6}$ 1/°C. Эта величина отвечает требуемым предписаниям общества Lloyd's Register of Shipping [42] величинам коэффициента линейной термической расширяемости эпоксидной пластмассы для диапазона температур работы фундаментных подкладок судовых устройств (50×10^{-6} 1/°C).

Начало гелеобразного перехода появляется отклонением от аппроксимированного линейного роста коэффициента α , наблюдавшегося для непол-

ностью и полностью отверждённой пластмассы при температурах 32 и 85°C (рис. 7.30а и б). Когда достигнута температура T_g , тогда увеличивается молекулярная подвижность полимерных цепей, а гелеобразное «постоянное тело» становится лепкожидким телом, признаком этого является резкое изменение коэффициента α , как показано на рис. 7.30а и б. Неполностью отверждённой пластмассы во время измерения отверждается полностью. Температура T_{gM} достигается вблизи величины 100°C (рис. 7.29 и 7.30а). В диапазоне температур 58—100°C наступает дальнейший, незначительный рост величины α от 47,6 до $51,3 \times 10^{-6} 1/\text{°C}$ (средняя величина $49,4 \times 10^{-6} 1/\text{°C}$). От температуры в пределе 95—100°C коэффициент α , как неполностью, так и полностью отверждённой пластмассы, резко возрастает, достигая при конечной температуре измерения (135°C) величин, в пределе 162 и $150 \times 10^{-6} 1/\text{°C}$ (рис. 7.30а и б).

В диапазоне температур гелеобразного перехода, при котором появляется размягчение пластмассы, т. е. 26—58°C и 82—105°C, соответственно для неполностью отверждённой и полностью отверждённой пластмассы (рис. 7.30а и б) коэффициент линейной термической расширяемости согласно стандарту ASTM D 696 не определяется. Несмотря на это, на рис. 7.30 показано (пунктирной линией) какой большой является контракция, происходящая в диапазоне температур гелеобразного перехода.

Разница величин между коэффициентом α пластмассы EPY и металлом (в пять раз в случае стали с $\alpha = 11 \times 10^{-6} 1/\text{°C}$ [42]) имеет большое практическое значение, т. к. создаёт условия для образования в соединениях с металлом внутренних (термических) напряжений. При применении пластмассы для фундаментных подкладок при увеличении температуры эти напряжения имеют положительное влияние на крепление устанавливаемого объекта, незначительно увеличивая напряжение крепёжных болтов.

7.11. Исследования процесса ползучести и температуры термического прогиба пластмассы EPY

Пластмасса EPY отличается не только хорошими прочностными свойствами при сжатии, но также большой крипоустойчивостью (ползучестью) при повышенных температурах.

Сопротивление ползучести пластмассы является основным фактором, ограничивающим допускаемое удельное давление и температуру работы подкладок. Они были определены на основании результатов длительных испытаний на ползучесть пластмассы при разных величинах нагрузки и температуры.

Испытания на ползучесть были проведены согласно стандарту ASTM-D621 в крип-установках, специально для этой цели запроектированных и изготовленных в Щецинском политехническом институте (рис. 7.31).

Использованные при испытаниях образцы имели следующие размеры: 12,7 × 12,7 × 12,7 мм. Они были отлиты в специальных небольших формах и отвержд-

а)

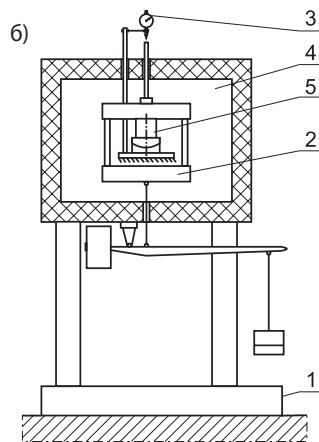
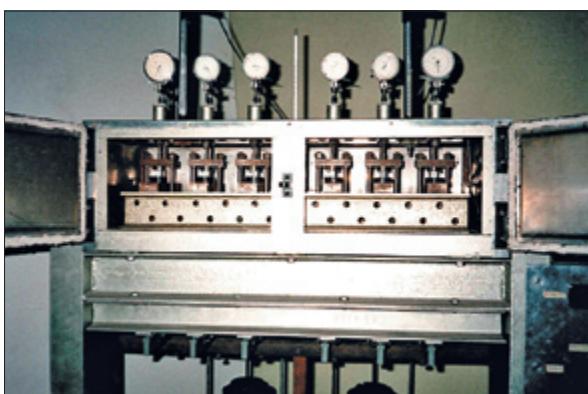


Рис. 7.31. Крип-установка для испытаний пластмасс, предназначенных на фундаментные подкладки машин: а) общий вид; б) схема действия: 1 — основание, 2 — состав разгрузки образца, 3 — система с часовым индикатором ($0,001$ мм) для измерения деформации (изменения высоты ΔH) образца, 4 — камера обогрева, 5 — испытываемый образец

дены разными способами: при комнатной температуре (23°C) в течение 24 часов, без дополнительного подогрева или с дополнительным подогревом в течение 4 часов при температуре от 50 до 90°C . Дополнительно были проведены испытания на ползучесть образцов ($12,7 \times 12,7 \times 12,7$ мм), вырезанных из подкладки размером $300 \times 300 \times 40$ мм, отлитой между двумя стальными плитами толщиной 14 мм.

Все испытания на ползучесть в диапазоне температур 50— 90°C были проведены при сжимающем напряжении 5 МПа. Образцы были помещены в камере крип-установки при температуре окружающей среды (около 23°C) и подвергались нагрузке, вызывающей сжимающее напряжение 5 МПа. Датчики были сведены к нулевому положению и началось повышение температуры со скоростью $8^{\circ}\text{C}/\text{час}$, вплоть до достижения установленной температуры испытания. Во время подогрева и на протяжении испытания, после достижения установленной температуры записывались показания датчиков. На основании средних величин трёх образцов были построены графики ползучести. Продолжительность испытаний была 500 часов. Примерные диаграммы ползучести представлены на рис. 7.32—7.34. Подобные результаты всех испытаний содержатся в отчёте об испытаниях ползучести [130].

Из диаграмм (рис. 7.32—7.34) видно, что на протяжении всего первого периода, во время нагрева образцов в крип-установке наступает рост их высоты, вызванный термической расширяемостью пластмассы. Он выше, чем выступающая в то же время ползучесть. Процесс ползучести характерен для всех пластмасс и отчётливо появляется в течение первых нескольких десятков часов действия нагрузки. В случае испытываемой пластмассы по истечении 200 часов этот процесс быстро замедляется, а по истечении 500 часов почти прекращается. Интенсив-

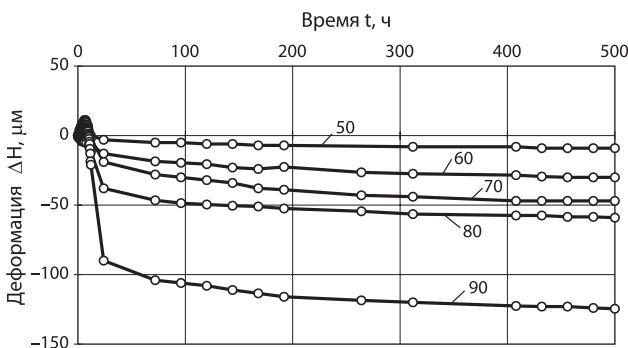


Рис. 7.32. Диаграммы ползучести пластмассы ЕРУ при разных температурах для образцов, отлитых и отверждённых на протяжении 24 часов при температуре 23°C + 4 часа при температуре 80°C

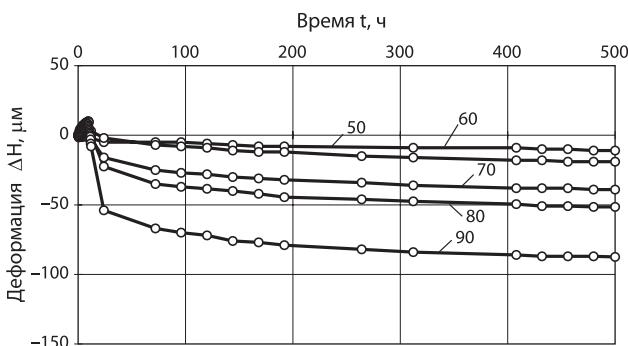


Рис. 7.33. Диаграмма ползучести пластмассы ЕРУ при разных температурах для образцов, отлитых и отверждённых на протяжении 24 часов при температуре 23°C + 4 часа при температуре 90°C

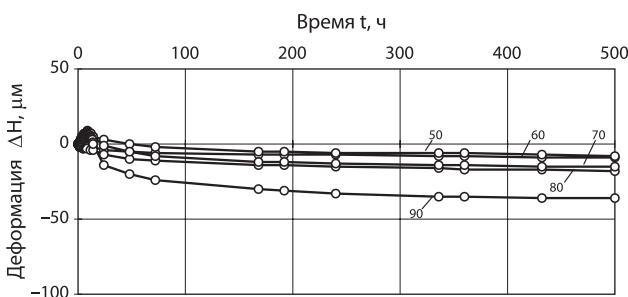


Рис. 7.34. Диаграмма ползучести пластмассы ЕРУ при разных температурах для образцов, вырезанных из подкладки 300 × 300 × 40 мм³, отлитой между стальными плитами, при температуре окружающей среды 23°C и отверждённой в течение 30 часов

нность процесса ползучести пластмассы EPY главным образом зависит от температуры обогрева образцов и от температуры испытания. Небольшая ползучесть образцов, вырезанных из подкладки (рис. 7.34), вызвана высокой температурой экзотермы пластмассы (около 90°C), которая появилась во время её отверждения.

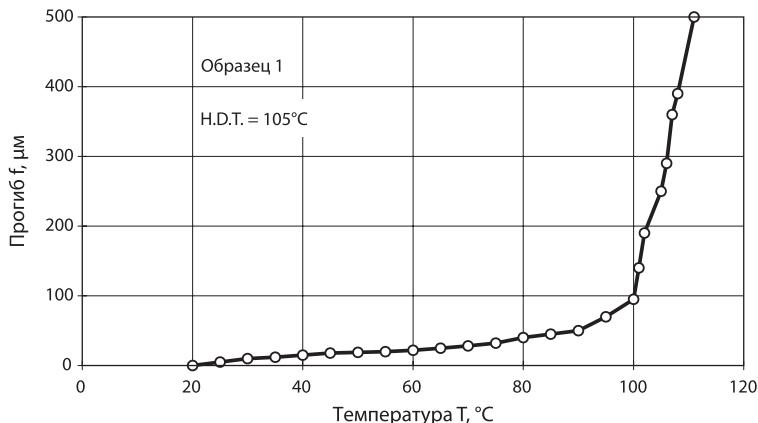


Рис. 7.35. Диаграмма термического прогиба образца из пластмассы EPY

Определение температуры термического прогиба пластмассы EPY под нагрузкой проводилось согласно указаниям стандарта ASTM-D-648-82. Образцы были отлиты на готово в стальных формах. Их размеры были следующие: длина $l = 12,7$ мм, высота $h = 12,7$ мм, ширина $b = 5,5$ мм. Они были отверждены в течение 24 часов при температуре 20°C, а затем в течение 4 часов при температуре 80°C. Образцы опирались симметрично на две подпоры и изгибалась поперечной силой, приложенной в середине длины и вызывающей изгибающее напряжение $\sigma_g = 1,8$ МПа. Испытание на изгиб было проведено в камере с воздушным подогревом. Температура измерялась термометрами, находящимися вблизи образца. Температуры изгиба (согласно ASTM-D-648-82) для трёх испытываемых образцов были: 105°C, 102°C и 105°C [130]. Примерная диаграмма, представляющая процесс прогиба образца в функции температуры, показана на рис. 7.35.

7.12. Исследование влияния охлаждения пластмассы EPY в жидким азоте на сопротивление сжатию и ударную вязкость

Монтаж запрессованных втулок иногда требует их охлаждения для уменьшения диаметра и возможности сборки без применения осевой силы, в результате получается расширенное соединение с натягом [131]. При монтаже втулки баллера рулевой оси, обычно выполненной из специальной пластмассы («Thordon»), применяется её охлаждение в жидким азоте при температуре около –195°C.

Охлаждённая таким образом втулка подшипника, вложенная в стальную втулку, закреплённую в корпусе с применением пластмассы EPY, вызывает значительное охлаждение стальной втулки и охлаждающей её пластмассы EPY. В связи с этим возник вопрос: может ли кратковременное значительное снижение температуры пластмассы EPY вызвать снижение её прочности на сжатие и ударную вязкость [132].

Испытание на сжатие было проведено при комнатной температуре согласно стандартам: ASTM-D-695-69 и PN-83/C-8903 1 на испытательной машине фирмы Instron Model 8501 Plus, используя программу серии IX «Automated Materials Testing System 7.03.00». Образцы для этих испытаний диаметром $d = 20$ мм и высотой $h = 25$ мм были отлиты в стальных формах, затем были отверждены в течение 24 часов при комнатной температуре (23°C), были подвергнуты нагреву в течение 2 часов при температуре 80°C , затем сохранялись на протяжении 6 дней при комнатной температуре. После этого 6 штук из них охлаждали в жидким азотом (при температуре около -195°C) в течение 10 минут. После извлечения этих образцов из жидкого азота (рис. 7.36) они были оставлены на 4 часа при комнатной температуре. Затем провели испытание на сжатие на 5 неохлаждённых образцах и на 5 охлаждённых образцах. Результаты этих испытаний, полученные при помощи испытательной машины, представлены в таблицах 7.4 и 7.5.

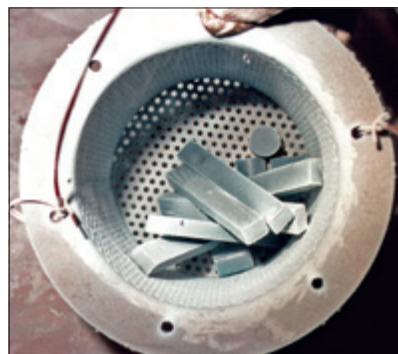


Рис. 7.36. Образцы из пластмассы EPY после выемки из жидкого азота

Испытание ударной вязкости было проведено согласно стандарту PN-81/C-89023 при комнатной температуре при помощи маятникового копёра фирмы Kogel-Leipzig (производства ГДР) энергоёмкостью $0,4 \text{ кгм} \approx 3,924 \text{ Нм}$. Для испытаний были взяты образцы с прямоугольным сечением $10 \times 15 \text{ мм}$ и длиной $l = 120 \text{ мм}$, без надреза (без резкого изменения сечения образца). Отверждение и последующее охлаждение нескольких образцов в жидким азотом проводилось таким же образом, как и образцов, предназначенных для сжатия. Результаты испытания представлены в таблице 7.6.

Сравнивая результаты испытаний, представленных в таблицах 7.4 и 7.5, а также в таблице 7.6, полученные для неохлаждённых и охлаждённых в жидким азоте

Таблица 7.4. Результаты испытания на сжатие неохлаждённых образцов из ластмассы ЕРУ, полученные на испытательной машине

No.	Load at Max. Load кН	Stress at Max. Load МПа	Strain at Max. Load мм/мин	Displacement at Max. Load мм	Modulus Aut Young МПа	Stress at offset Yield 1 МПа	Energy to Yield Point Дж
1	48.452	154.230	0.211	5.269	4491.805	92.522	8.949
2	49.010	156.007	0.209	5.221	4352.488	95.109	9.543
3	49.135	156.405	0.206	5.146	4549.125	94.041	8.937
4	48.768	155.238	0.211	5.271	4561.89	91.706	8.566
5	49.210	156.644	0.212	5.294	4480.378	92.058	8.763
Mean	48.915	155.705	0.210	5.240	4487.137	93.087	8.952
S.D.	0.309	0.982	0.002	0.059	83.109	1.439	0.366
C.V.	0.631	0.631	1.125	1.125	1.852	1.546	4.085

Таблица 7.5. Результаты испытания на сжатие образцов, изготовленных из пластмассы ЕРУ, охлаждённых в жидким азоте, полученные на испытательной машине

No.	Load at Max. Load кН	Stress at Max. Load МПа	Strain at Max. Load мм/мин	Displcement at Max. Load мм	Modulus Aut Young МПа	Stress at offset Yield 1 МПа	Energy to Yield Point Дж
1	49.806	158.541	0.218	5.442	4237.602	98.114	10.537
2	49.468	157.466	0.203	5.065	4447.826	94.976	9.325
3	49.623	157.957	0.213	5.315	4468.742	93.942	9.288
4	50.210	159.828	0.211	5.282	4617.564	93.836	8.827
5	48.393	154.044	0.181	4.517	4560.415	93.517	8.896
Mean	49.500	157.567	0.205	5.124	4466.430	94.877	9.375
S.D.	0.678	2.158	0.015	0.366	145.249	1.890	0.687
C.V.	1.370	1.370	7.133	7.133	3.252	1.993	7.331

Таблица 7.6. Результаты испытаний ударной вязкости образцов из пластмассы ЕРУ, неохлаждённых и охлаждённых в жидком азоте

Характеристика образцов	№ образца	Работа перелома, Нм	Ударная вязкость, кДж/м ²	
			отдельных образцов	в среднем
Неохлаждённые образцы	1	1,128	7,69	8,49
	2	1,422	9,85	
	3	1,079	7,32	
	4	1,471	9,89	
	5	1,226	8,05	
	6	1,226	8,14	
Образцы, охлаждённые в жидком азоте	1	1,117	7,79	8,26
	2	1,079	7,14	
	3	1,570	10,52	
	4	1,422	9,27	
	5	1,079	7,15	
	6	1,128	7,68	

образцов, можно отметить, что здесь нет никакой существенной количественной разницы. Рассматривая диаграммы испытаний на сжатие и излом образцов, образовавшихся при испытаниях ударной вязкости, не была обнаружена также разница качества. Из этого следует прямой вывод, что кратковременное (около 10 мин.) охлаждение пластмассы EPY в жидким азоте (при температуре около -195°C) практически не имеет никакого влияния на параметры и характеристики сжатия, а также на ударную вязкость этой пластмассы при выполнении этих испытаний при комнатной температуре.

7.13. Исследования влияния постоянной горячей влажности на диэлектрические свойства пластмассы EPY

Эти исследования были проведены на Кафедре электротехники Щецинского политехнического института [133] (Польша). Их целью было определение влияния длительного воздействия постоянной горячей влажности ($\Phi = 96\%$, $T = 40^{\circ}\text{C}$) на:

- диэлектрические потери;
- диэлектрическую проницаемость;
- сквозное удельное сопротивление;
- диэлектрическую прочность;
- поверхностное удельное сопротивление.

Таблица 7.7. Результаты испытаний влияния постоянно влажной высокой температуры (ПВВТ) на диэлектрические свойства пластмассы EPY

ПВВТ Постоянная влажность температуры (час)	Степень убыт- ка диэлектр. свойств $\tg \delta$ PN-86/E-04403	Диэлектричес- кая проницае- мость ϵ PN-86/E-04403	Сквозное удельное со- противление ρ_v Осм PN-86/E-04405	Диэлектричес- кое сопротив- ление кВ/мм PN-86/E-04404	Удельное со- противление поверхности Ом PN-86/E-04405
0	0,041	2,8	$5,2 \cdot 10^{14}$	15,7	$8,0 \cdot 10^{12}$
45			$1,9 \cdot 10^{14}$		
51		3,84			
70	0,083				
75		3,70	$1,3 \cdot 10^{14}$		
100		4,20			
150		4,20			
164	0,082	4,40	$2,7 \cdot 10^{13}$		
191			$6,0 \cdot 10^{12}$		
240	0,079	4,10			
309	0,074		$9,1 \cdot 10^{12}$		
341	0,069	3,70	$7,5 \cdot 10^{12}$		
376			$6,2 \cdot 10^{12}$		
427	0,064	3,72	$3,9 \cdot 10^{12}$		
470			$4,5 \cdot 10^{12}$	14,3	

Опытные исследования были проведены согласно польским стандартам (таблица 7.7). Для испытаний были использованы стальные образцы диаметром 100 мм, сделанные из стальной полосы толщиной 3 мм. В каждой серии было 5 образцов. Средние величины результатов измерений представлены в таблице 7.7.

7.14. Испытания усталостной прочности пластмассы EPY при сжатии

На фундаментные подкладки судовых машин и устройств, кроме постоянных нагрузок, вызванных массой устройств и затяжкой крепёжных болтов, действуют также переменные по времени нагрузки. При таких обстоятельствах было решено провести также испытания усталостной прочности при сжатии пластмассы. Такие исследования были проведены согласно указаниям стандарта DIN 50 100. Для испытаний были отлиты образцы из пластмассы EPY размерами $12,7 \times 12,7 \times 25,4$ мм, отверждение которых длилось 24 часа при температуре 80°C .

Испытания были проведены на сервогидравлической испытательной машине фирмы Instron (модель 8501 Plus). Была принята постоянная величина предельных напряжений при сжатии $\sigma_g = -5 \text{ Н/мм}^2$. Нижнюю величину напряжений при сжатии изменяли в диапазоне от -92 до -60 Н/мм^2 . Исследуемые образцы пластмассы подвергались нагрузке по схеме, представленной на рис 7.37, а полученные результаты представлены в таблице 7.8.

Испытания показали очень большую усталостную прочность при сжатии пластмассы EPY. Образцы из этой пластмассы, имевшие очень неудобную форму (большое удлинение) по сравнению с фундаментными подкладками, подвер-

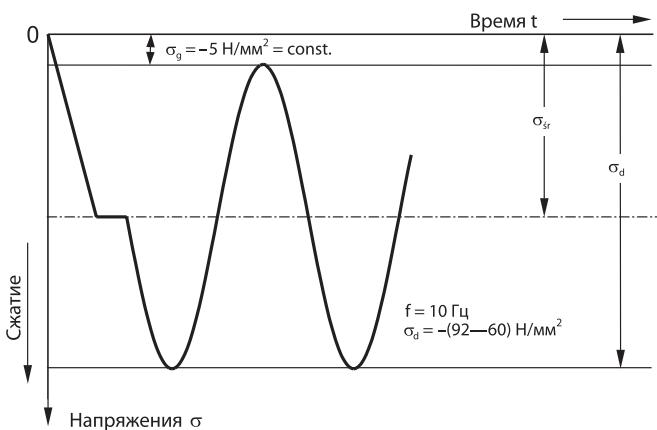


Рис. 7.37. Схема нагрузки образцов в испытаниях на усталость

Таблица 7.8. Результаты испытаний усталостной прочности на сжатие пластмассы EPY
(для верхней величины напряжения $\sigma_g = -5 \text{ Н/мм}^2 = \text{const.}$)

№ образца	Нижняя величина напряжения сжатия σ_d Н/мм^2	Количество циклов нагрузок		
		n	n_{sr}	
1	-92	725	824	
2	-92	611		
3	-92	1135		
4	-80	1676	1805	
5	-80	1989		
6	-80	1749		
7	-78	3360		
8	-65	$> 100 \cdot 10^3$		
9	-65	$> 350 \cdot 10^3$		
10	-60	$> 10 \cdot 10^6$		

гнутые переменным напряжениям сжатия при нижней величине напряжения $\sigma_d = -65 \text{ Н/мм}^2$, безопасно перенесли 100×10^3 и 350×10^3 циклов нагрузок, а при нижней величине $\sigma_d = -60 \text{ Н/мм}^2$ — 10^7 циклов нагрузок не подверглись разрушению. Эти образцы затем были подвергнуты статическому испытанию на сжатие. Диаграммы испытания на сжатие и величины основных показателей этого испытания, относящиеся к образцам, подвергнутым раньше вышеупомянутым циклическим нагрузкам, не отличались ни по качественным, ни по количественным характеристикам от результатов аналогичного испытания на сжатие образцов тех же размеров, но не подвергнутых раньше усталостным нагрузкам.

Принимая во внимание тот факт, что допускаемые напряжения на сжатие для пластмасс на подкладки равны 5 Н/мм^2 , следует отметить, что усталостная прочность пластмассы EPY отвечает условиям безопасности с очень большим запасом. Перенесение результатов исследований с малых образцов пластмассы невыгодной формы на фундаментные подкладки машин многократно увеличивает запас безопасности, как для статической прочности, так и для усталостной.

7.15. Исследования динамических свойств пластмассы EPY

7.15.1. Общие замечания

Всегда было важным стремление к тому, чтобы механические вибрации и шумы на судах с механическими приводами были как можно наименьшими. Одновременно с развитием техники производителям судовых машин и устройств, а также верфям, предъявлялись всё более жёсткие требования. В настоящее время борьба с чрезмерными вибрациями стала одной из основных проблем при постройке и эксплуатации судов. На судне имеется много источников вибраций разной частоты.

Неуравновешенные силы и моменты, возникающие в главном двигателе, являются главным источником вибраций низкой частоты (до 60 Гц). Кроме того, они вызывают также вибрации высоких частот. На судне имеется много других устройств, вызывающих вибрации. Особенно назойливыми для команды и пассажиров являются вибрации высших частот порядка 1000 Гц. Часть этих вибраций передаётся окружающей среде и проявляется в виде обременительного и вредного для здоровья шума. Остальная часть энергии вибрации, в случае жёстких соединений, передаётся на фундамент, подпирающий данную машину, или на другие, соединённые с ней объекты, и переносится в виде так называемых материальных звуков на все отдалённые элементы конструкции. В результате этого могут выступать нежелательные явления, как например шумы и вибрации элементов конструкции (напр. сегментов стен или изоляции), ощущаемые командой и пассажирами, а также вторичные вибрации (резонансы) других устройств.

Противодействие этим явлениям обычно основывается на применении резиновых подкладок или виброизолаторов специальной конструкции. Применение этих средств не всегда возможно из-за необходимости точной установки объектов, а также ввиду финансовых затрат и технических трудностей, связанных с применением виброизолаторов.

Применение фундаментных подкладок, литых из пластмасс, кроме многих преимуществ, относящихся к способам монтажа, приносит также положительные результаты в области гашения вибраций. Стык пластмассы со сталью является очень сильным барьером для проникновения материальной вибрации, а затем и звука на соседние элементы конструкции.

Целью проведенных исследований динамических свойств пластмассы EPY было определение:

- логарифмического декремента затухания колебаний и динамического модуля сдвига;
- динамического модуля продольной упругости и коэффициента потерь;
- полного акустического сопротивления (импеданца).

7.15.2. Определение логарифмического декремента затухания колебаний и динамического модуля сдвига

Эти испытания проводились [39] при помощи крутильного (торсионного) маятника согласно указаниям PN-83/C-89042 и EN ISO 672 1-2. Для сравнения были испытаны одинаковые образцы (полосы размерами: $L = 60$ мм, $b = 10$ мм и $h = 1$ мм), изготовленные из пластмассы EPY и из полосовой стали.

Опытным путём был определён логарифмический декремент механического затухания, а также динамический модуль сдвига испытываемых материалов. На рис. 7.38 представлены примерные амплитудно—временные характеристики этих материалов, определённые при температуре 20°C, а на рис. 7.39 — диаграммы, представляющие зависимость логарифмического декремента затухания

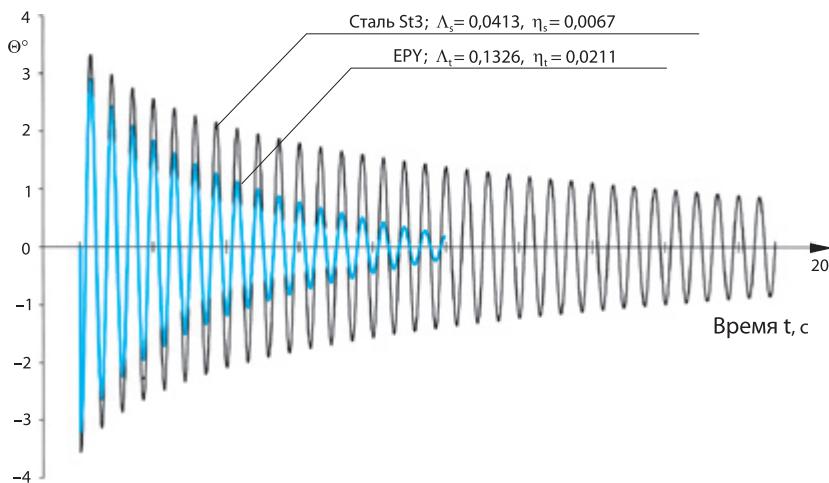
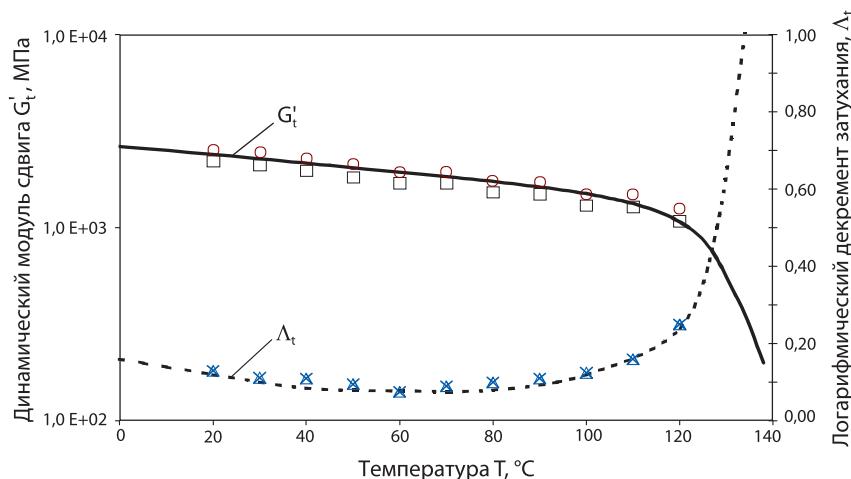


Рис. 7.38. Амплитудно-часовые характеристики для пластмассы EPY и стали St3, полученные при температуре 20°C при частоте $f = 1,77$ Гц



Результаты испытаний динамического модуля сдвига G'_t :

- — испытания польской пластмассы EPY согласно PN-83/C-89042
- — испытания польской пластмассы EPY согласно EN ISO 672 1-2
- — испытания немецкой пластмассы Erocast36 (согл. рапорту H. A. Springer'a)

Результаты испытаний логарифмического декремента затухания Λ_t :

- △ — испытания согласно PN-83/C-89042
- × — испытания согласно EN ISO 672 1-2
- - - — испытания пластмассы Erocast 36 (согл. рапорту H. A. Springer'a)

Рис. 7.39. Зависимость логарифмического декремента затухания Λ_t и динамического модуля G'_t от температуры пластмасс EPY и Erocast 36

и модуля сдвига от температуры для испытываемой пластмассы EPY и пластмассы Epcast 36 (немецкого производства).

Испытания показали (рис. 7.38), что в тех же самых условиях скорость затухания свободных колебаний для пластмассы EPY намного больше, чем для стали. Отношение логарифмического декремента затухания пластмассы EPY к декременту стали $\Lambda_t : \Lambda_s = 0,1326 : 0,0413 = 3,21$. Это означает, что пластмасса EPY, используемая для подкладок, обладает более чем трёхкратно высшим коэффициентом затухания колебаний по сравнению со сталью—материалом, который по традиции применяется для фундаментных подкладок под главные судовые двигатели.

Динамическая жёсткость на сдвиг пластмассы EPY намного меньше, чем стали. Отношение этих жёсткостей (при 20°C) составляет $G_t' : G_s' = 2511 : 80000 = 0,0314$. Это является значительным преимуществом пластмассы по сравнению со сталью. Большая упругая податливость подкладок из пластмассы, с одновременным большим коэффициентом трения на поверхностях ихстыка с основанием машины и фундамента, допускает значительные термические и механические деформации двигателя, не вызывая скольжения на подкладках. Поверхности подкладок не стираются, благодаря чему уменьшается тенденция появления зазоров на фундаментных болтах по сравнению с применением стальных подкладок.

7.15.3. Определение коэффициента потерь и динамического модуля упругости при сжатии

Для получения более полной информации о динамических свойствах пластмассы EPY, пригодных для применения этого материала для фундаментных подкладок машин и устройств, пластмассу подвергли исследованию на сжатие (рис. 7.40). Целью этого испытания было определение коэффициента потерь η , а также динамического модуля упругости E_d при сжатии.

Коэффициент потерь η является основной мерой, количественно определяющей демпфирующие свойства материала. Он определяется из следующей зависимости:

$$\eta = \frac{W}{2\pi U} = \frac{\Psi}{2\pi} \quad (7.14)$$

где:

- W — энергия, рассеянная (диссирированная) в одном периоде колебаний, отнесённая к единице объёма;
- U — потенциальная энергия упругой деформации, соответствующая максимальной динамической деформации, отнесённая к единице объёма;
- Ψ — коэффициент рассеяния энергии колебаний (относительное рассеяние энергии колебаний); $\Psi = W/U$.

Для испытаний были использованы цилиндрические образцы размером Ø20×55 мм, отлитые из пластмассы в стальных формах, отверждённые в течение

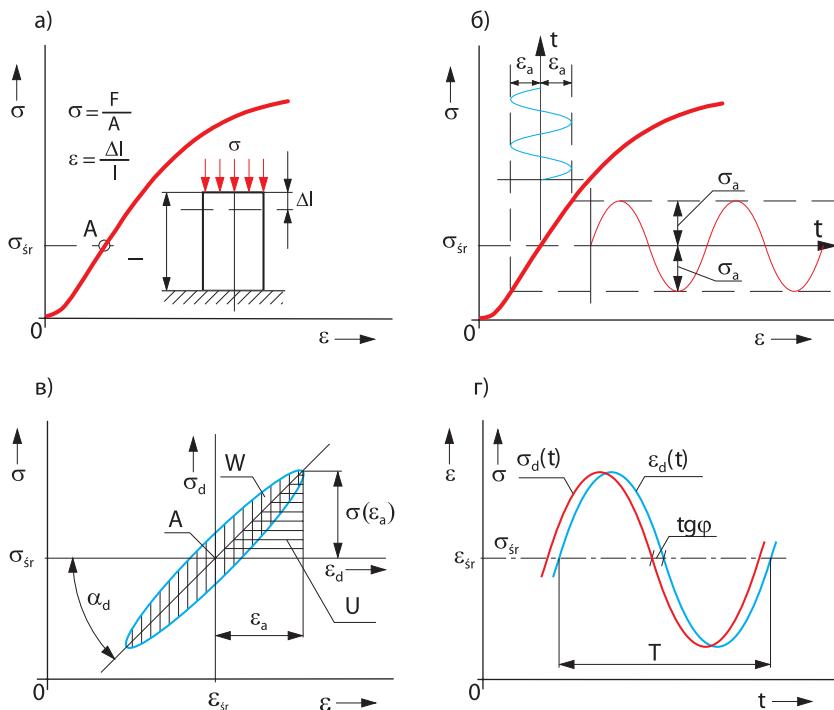


Рис. 7.40. Схема динамического испытания на сжатие образца из пластмассы ЕРУ

24 часов при температуре 80°C. Испытания были проведены на сервогидравлической испытательной машине Instron (модель 8501 Plus).

Энергия W была определена методом динамической петли гистерезиса. Принимая во внимание характер работы фундаментных подкладок, опытные исследования были проведены под сжимающими нагрузками по схеме на рис. 7.40. Энергия W , рассеянная в одном периоде колебаний (отнесённая к единице объёма), является пропорциональной площади поверхности, находящейся внутри динамической петли гистерезиса, определённой в координатах $\sigma - \varepsilon$ (рис. 7.40). Величина этой энергии была вычислена методом численного интегрирования из зависимости:

$$W = \oint \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (7.15)$$

Энергия упругой деформации была определена по следующей формуле:

$$U = 0,5 \varepsilon_a \sigma(\varepsilon_a) \quad (7.16)$$

где: ε_a — амплитуда деформации, вызванной динамической нагрузкой (рис. 7.40).

Для испытания на сжатие динамическую жёсткость материала в рассматриваемой точке статической характеристики (рис. 7.40а) определяет динамический модуль продольной упругости E_d , установленный согласно зависимости (рис. 7.40в):

$$E_d = \operatorname{tg} \alpha_\alpha = \frac{\sigma(\varepsilon_a)}{\varepsilon_a} \quad (7.17)$$

Опытные исследования проводились в широком диапазоне варианности параметров ε_{sr} , ε_a и частоты $f = 1—20$ Гц. Примерная, установленная опытным путём петля гистерезиса показана на рис. 7.41, а некоторые результаты испытаний — на рис. 7.42—7.45. Подробные описания и результаты испытаний представлены в работах [37—40].

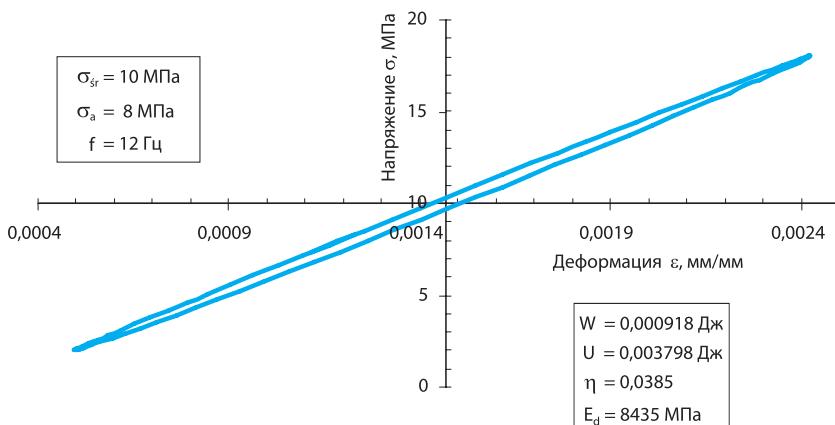
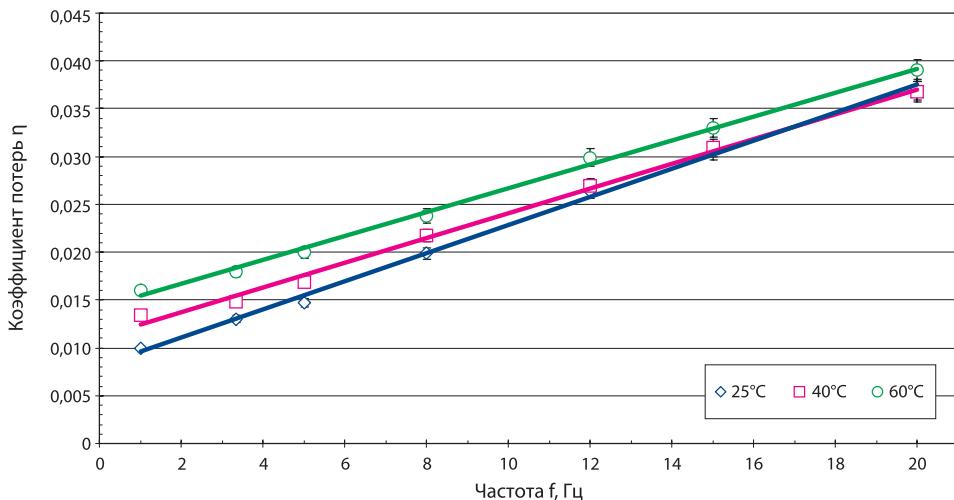


Рис. 7.41. Динамическая петля гистерезиса, определённая опытным путём для заданных величин $\sigma_{sr} = 10$ МПа, $\sigma_a = 8$ МПа, $f = 12$ Гц

Анализируя полученные результаты исследований (рис. 7.42—7.45), можно сделать вывод, что величины коэффициента потерь η и динамического модуля упругости E_d зависят от параметров σ_{sr} , σ_a , f и T . Самое большое влияние на коэффициент потерь оказывает частота f динамической нагрузки, а на динамический коэффициент упругости E_d — температура T . В принятом диапазоне варианты этих параметров для пластмассы EPY получены следующие величины: $\eta = 0,012—0,047$, $E_d = 5000—8500$ МПа. Для стали эти величины равны [134]: $\eta = 0,0016—0,0028$, $E_d = 2,1 \times 10^5$ МПа.

Величины коэффициента потерь, полученные для пластмассы EPY, сопоставимы с величинами этого коэффициента для виброизоляционных материалов, созданных на основе натурального каучука ($\eta = 0,02—0,16$ [134]). Из этого следует, что пластмасса EPY может быть с пользой использована для гашения вибраций

а)



б)

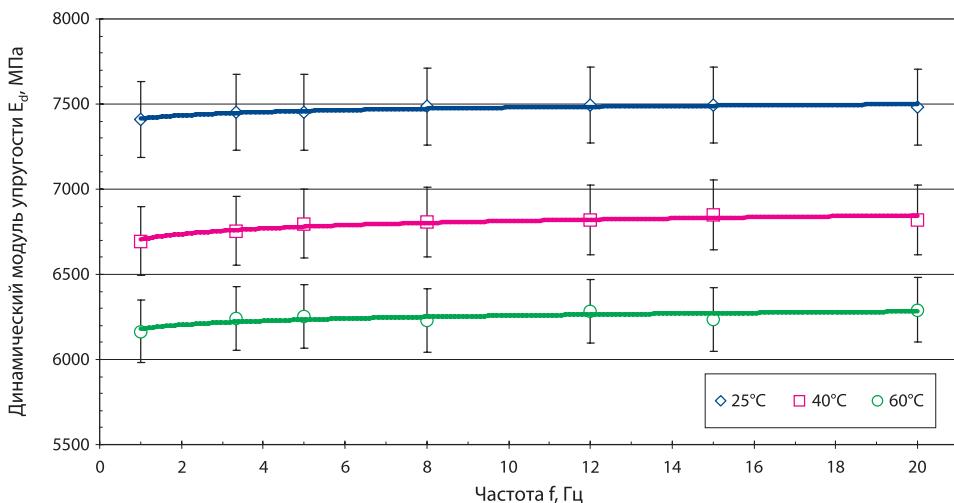


Рис. 7.42. Примерные результаты испытаний в зависимости от коэффициента потерь η и динамического модуля упругости E_d от частоты и температуры при напряжениях:

$$\sigma_{\text{ср}} = 18 \text{ МПа}, \sigma_a = 4 \text{ МПа}$$

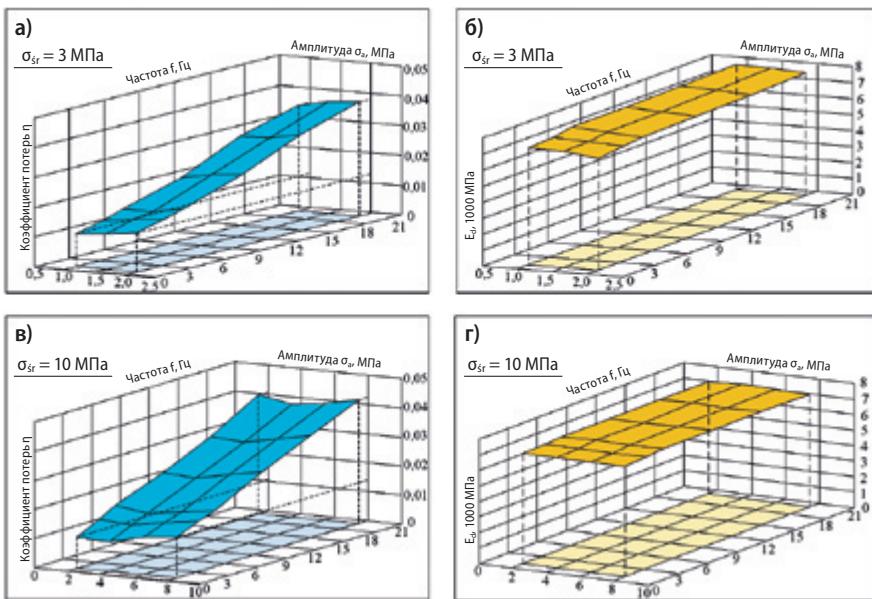


Рис. 7.43. Примерные результаты испытаний коэффициента потерь η и динамического модуля упругости E_d при температуре 23°C при средних напряжениях 3 и 10 МПа

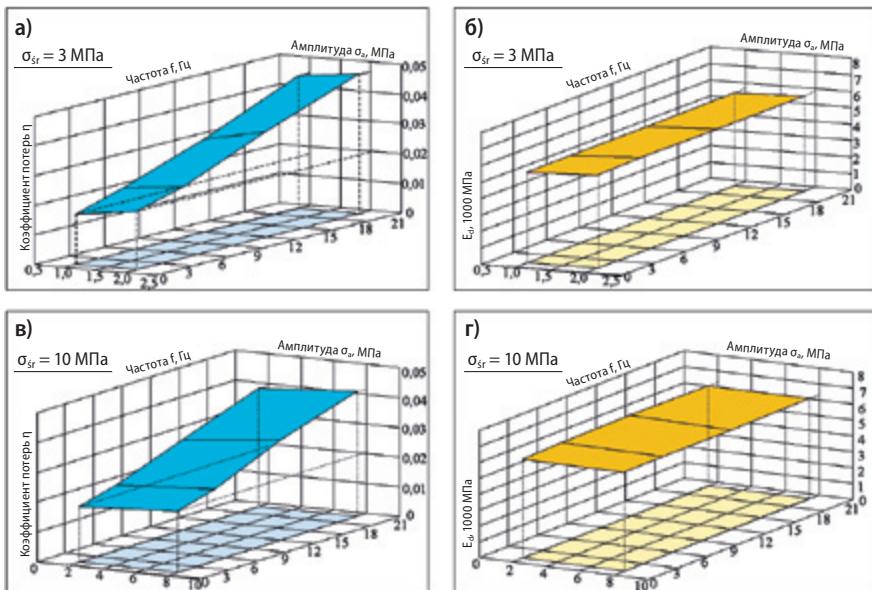


Рис. 7.44. Примерные результаты испытаний коэффициента потерь η и динамического модуля упругости E_d при температуре 60°C при средних напряжениях 3 и 10 МПа

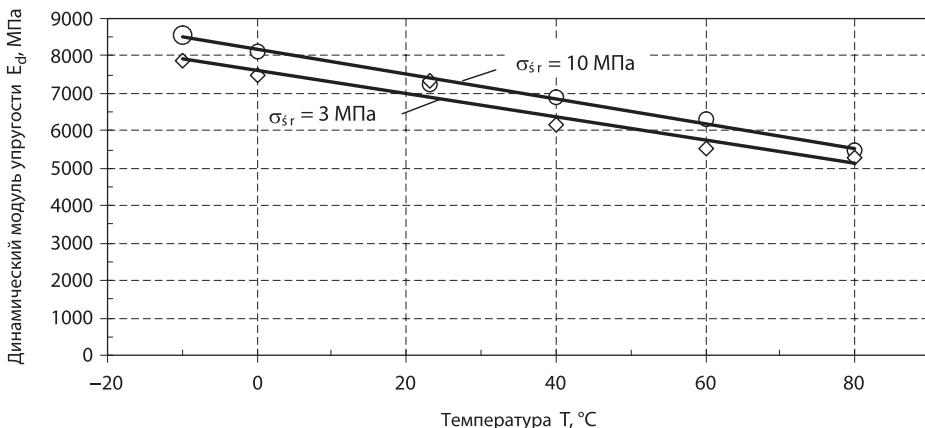


Рис. 7.45. Зависимость динамического модуля упругости от температуры для пластмассы ЕРУ

Таблица 7.9. Величины динамического модуля упругости E_d и коэффициента потерь η

Материал	$E_d, \text{Н}/\text{мм}^2$	η
ЕРУ	$(0,05—0,085) \cdot 10^5$	0,012—0,047
Сталь	$2,1 \cdot 10^5$	0,0016—0,0026*
Серый чугун	$(0,09—1,1) \cdot 10^5$	0,036*
Резина (20—80° Shore'a)	2—24	0,02—0,16*

*Согласно литературе [134]

в механических системах. Для надлежащего использования этих свойств ведутся дальнейшие исследования.

В таблице 7.9 представлены величины динамического модуля упругости E_d и коэффициента потерь для нескольких выбранных материалов.

7.15.4. Определение полного акустического сопротивления (импеданца)

Основным инструментом для анализа проблемы изоляции материальных звуков является полное акустическое сопротивление. Оно определяет меру сопротивления, которое оказывает среда расходящимся в ней материальным звукам. Из физики известно [135, 136], что звуковые волны расходятся в разных материалах с разной скоростью, если звуковая волна, расходящаяся в каком-то материале, ударяет в материал с другим акустическим сопротивлением, то переход энергии становится очень неэффективным.

Для плоской и шарообразной волн, находящихся на значительном расстоянии от источника звука, удельное акустическое сопротивление R твёрдого тела, жидкости или газа можно рассчитать по формуле [135]:

$$R = \rho v \quad (7.18)$$

где:

- ρ — плотность среды, кг/м³;
- v — скорость распространения акустической волны в среде, м/с.

Скорость распространения звука в рассматриваемом материале зависит от его упругости и плотности. Для продольной волны, расходящейся в твёрдом теле, удельное акустическое сопротивление может быть вычислено по формуле [136]:

$$R = \sqrt{E \rho} \quad (7.19)$$

где:

- E — коэффициент продольной упругости.

Материальные звуки, расходящиеся в материале, при соприкосновении с поверхностью пластмассы в большой степени отражаются и только небольшая их часть проникает в пластмассу. Часть проникшей акустической энергии превращается в тепло и рассеивается, а остальная часть проникает в другую сторону подкладки, где снова наталкивается на барьер, от которого в значительной степени отражается.

Принимая для стали и пластмассы EPY данные: $E_1 = 2 \times 10^{11}$ кг/мс², $\rho_1 = 7800$ кг/м³, $E_2 = 4915 \times 10^6$ кг/мс², $\rho_2 = 1590$ кг/м³, получаем по формуле (7.19) следующие величины удельного акустического сопротивления для рассматриваемых материалов:

- для стали $R_1 = 39,50 \times 10^6$ кг/м²с,
- для пластмассы EPY $R_2 = 2,85 \times 10^6$ кг/м²с.

Энергию звука, проникающего из тела 1 в тело 2 через поверхность их контакта, можно определить по следующей формуле [135]:

$$P_{1,2} = \frac{4R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \quad (7.20)$$

Если принять во внимание то, что энергия звука, которую излучает машина через подкладку из пластмассы EPY к стальной конструкции фундамента, должна преодолеть две такие же самые поверхности контакта, то энергию звука, проникающую из машины к фундаменту, можно определить по формуле [135]:

$$P_{1,3} = \left[\frac{4R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \right]^2 \quad (7.21)$$

Подставляя в формулу вышеуказанные данные, можно получить:

$$P_{1,3} = \left[\frac{4 \cdot 39,5 \cdot 10^6 \cdot 2,80 \cdot 10^6}{(39,5 \cdot 10^6 + 2,80 \cdot 10^6)^2} \right]^2 = 0,061 \quad (7.22)$$

Эта проблема наглядным способом представлена на рис. 7.46.

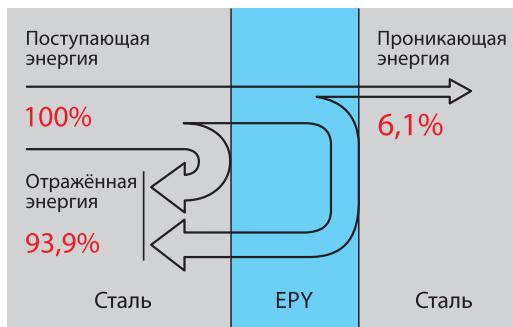


Рис. 7.46. Упрощённая схема, образующая попадание, проникание и отражение энергии звуковых волн через прокладку из EPY (без учета потерь)

Из вышеупомянутых расчётов следует, что только около 6% энергии звука переходит от машины через подкладку из пластмассы EPY к фундаменту. В действительности эта ситуация является самой положительной из всех, которые могут появиться. На самом деле проблема изоляции звуковых волн через прокладку является более сложной. Она зависит не только от полного акустического сопротивления, которое учитывается в формуле (7.21), но и от параметров системы и частоты звуковой волны [136]. В действительности энергия звука может быть меньшей, чем полученная из проведенных расчётов.

На распространение шумов на судне большое влияние имеют также многие другие факторы. Машины и устройства, установленные на подкладках из пластмассы, крепятся к фундаменту при помощи стальных болтов, через которые без потерь проникает некоторая часть энергии звука. Величина этой энергии зависит от диаметра и длины болтов, а также от конструкции и жёсткости системы, крепящей машину к фундаменту.

Применение пластмассы EPY для фундаментных подкладок и прокладок в разных конструкционных соединениях может, несомненно, дать значительные результаты в области снижения уровня вибрации и шума. Однако это не простая и бесспорная проблема. Оптимальное использование виброизоляционных свойств пластмассы требует дальнейших, более сложных исследований и разработки определённых конструкционных решений.

7.16. Сравнительные исследования статических и динамических свойств трёх разных пластмасс, используемых для фундаментных подкладок машин и устройств

В настоящее время три специальные пластмассы, предназначенные для фундаментных подкладок машин и устройств, имеют широкое практическое применение. Кроме американской пластмассы Chockfast Orange (производимой фирмой ITW Philadelphia Resins) и немецкой Epcast 36 (производимой фирмой H.A. Springer marine+industrie service GmbH, которая в 2013 году поменяла название на ITW Polimers Europe GmbH) сертификаты признания классификационных обществ, осуществляющих надзор за постройкой и ремонтами судов, а также производителей судовых машин и устройств получила польская пластмасса EPY, изготавливаемая фирмой Marine Service Jaroszewicz в Щецине.

Основной целью исследовательских работ, результаты которых представлены в настоящем разделе, было опытное определение в идентичных условиях основных статических и динамических свойств трёх вышеназванных пластмасс (Chockfast Orange, Epcast 36 и EPY), проведение сравнительного анализа и оценки польской пластмассы на фоне лучших известных в мире этого рода продуктов.

Целью статистических исследований было определить характеристики сжатия и установить на их основе следующие параметры:

- прочность на сжатие R_c ;
- условный предел plasticности $R_{0,2}$;
- условный предел упругости $R_{0,02}$;
- коэффициент продольной упругости (модуль Young-a) E .

Исследования были проведены при комнатной температуре на цилиндрических образцах диаметром $d = 20$ мм и высотой $h = 25$ мм. Образцы всех трёх исследуемых пластмасс были отлиты, отверждены и хранились в одинаковых условиях. Подготовка композиции для литья образцов проводилась согласно указаниям их производителей. После отливки образцов в металлических формах они подвергались отверждению в течение 24 часов при температуре 23°C, а затем (после их выемки из формы) — последующему отверждению в течение 2 часов при температуре 80°C.

Испытание на сжатие было проведено на сервогидравлической испытательной машине фирмы Instron (модель 8501 Plus) по специальной компьютерной программе статического испытания на сжатие. Это обеспечило однородный способ испытаний всех образцов и определение величин принятых показаний. Результаты испытаний на сжатие представлены на рис. 7.47.

Все три пластмассы, подвергнутые статическому испытанию на сжатие (рис. 7.47), с точки зрения качества ведут себя идентично, а появляющиеся количественные различия являются малыми и не имеют практического значе-

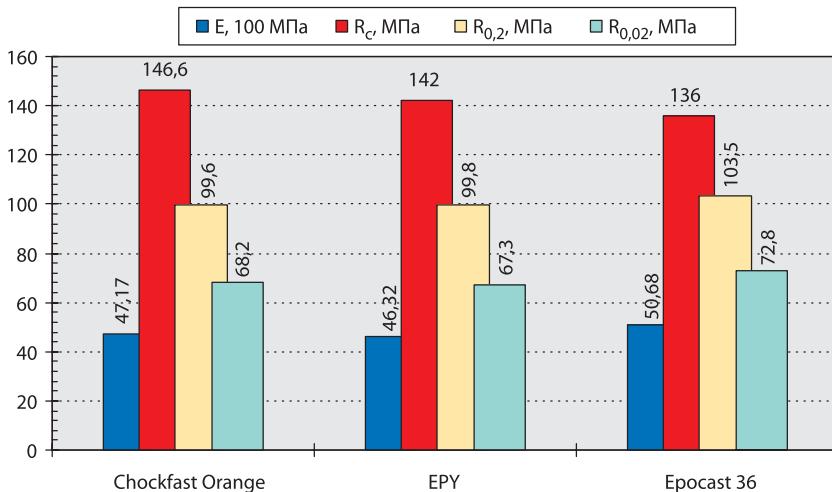


Рис. 7.47. Сопоставление результатов опыта статического сжатия трёх испытываемых пластмасс

ния при применении этих материалов для фундаментных подкладок судовых машин и устройств.

Целью динамических испытаний было определение динамического модуля упругости E_d и коэффициента потерь η для трёх вышеназванных пластмасс.

Основным характером динамических испытаний является то, что как входные величины (напр. силы), так и выходные (напр. деформации) должны рассматриваться как функции времени. Динамические испытания были проведены на упрощённых, осесимметрических моделях подкладок (внешним диаметром $D = 60 \text{ мм}$, внутренним диаметром $d = 25 \text{ мм}$, и высотой $H = 20 \text{ мм}$). Для лучшего приближения условий эксперимента к условиям изготовления и работы реальной фундаментной подкладки машины, её отливали и отверждали между двумя стальными круглыми плитками, моделирующими вырезки фундаментной плиты и основы устанавливаемой машины. Модели подкладок, предназначенные для испытаний, были отлиты на готово в специальных формах. Соприкасающиеся с пластмассой поверхности стальных плиток были покрыты тонким слоем антиадгезионного средства для того, чтобы пластмасса не приклеилась к ним. Модели подкладок после их отливки подвергались отверждению в течение 24 часов при температуре 23°C и последующему отверждению в течение 4 часов при температуре 80°C .

Выполненные таким образом модели подкладок, вместе со стальными кружками, подвергались сжимающим нагрузкам на испытательной машине (Instron, модель 8501 Plus) с применением специальной оснастки (рис. 7.48). Для замера деформации (изменения высоты ΔH) исследуемых подкладок был при-

Сравнительные исследования статических и динамических свойств трёх разных пластмасс

а)



б)

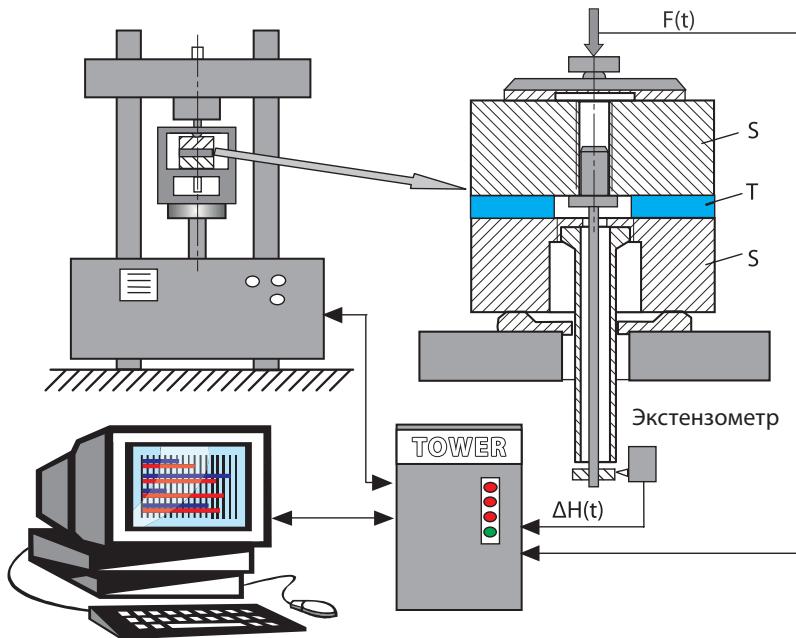


Рис. 7.48. Опытный стенд с машиной Instron: а) общий вид; б) схема

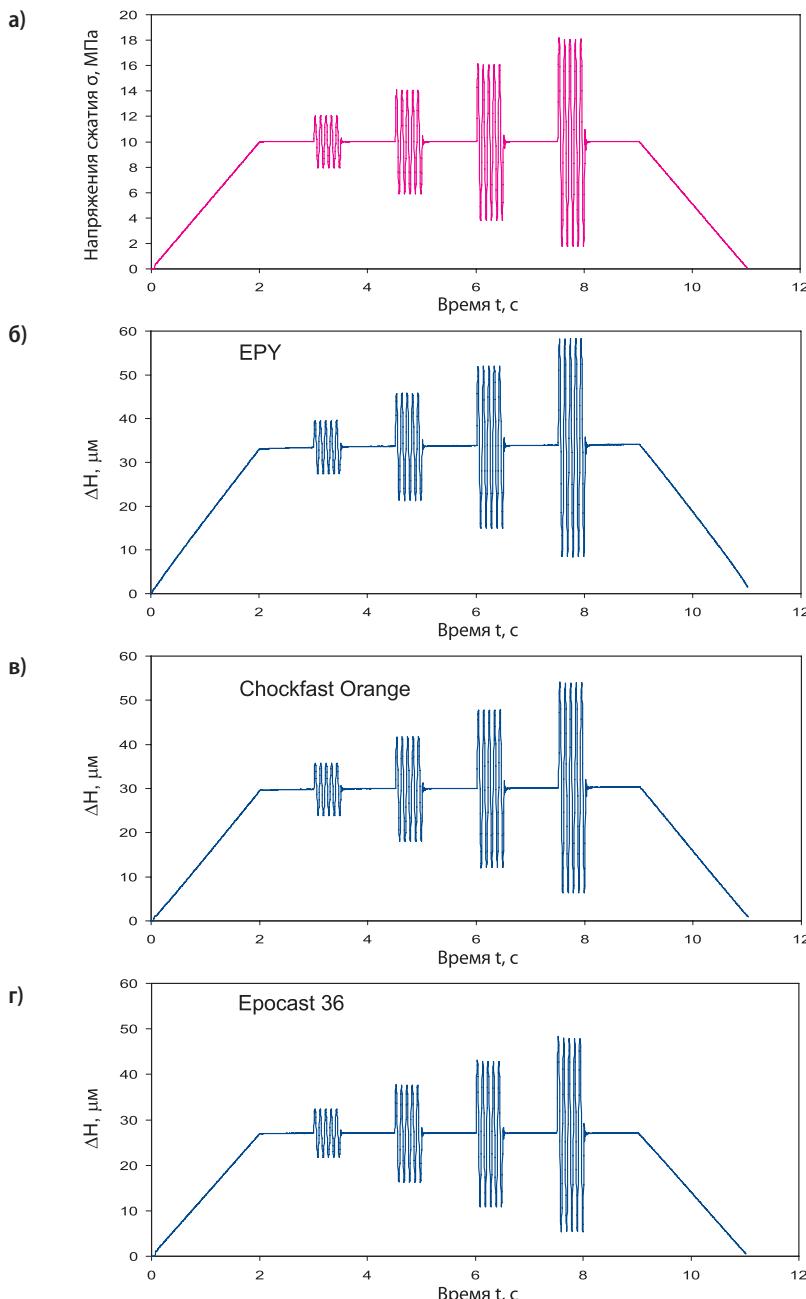


Рис. 7.49. Изменения напряжений сжатия (σ) и созданные ими деформации (изменения высоты ΔH) моделей фундаментных подкладок, изготовленных из трёх разных пластмасс ($\sigma_{sr} = 10 \text{ МПа}, \sigma_a = 2, 4, 6, 8 \text{ МПа}, f = 10 \text{ Гц}, T = 80^\circ\text{C}$), в функции времени

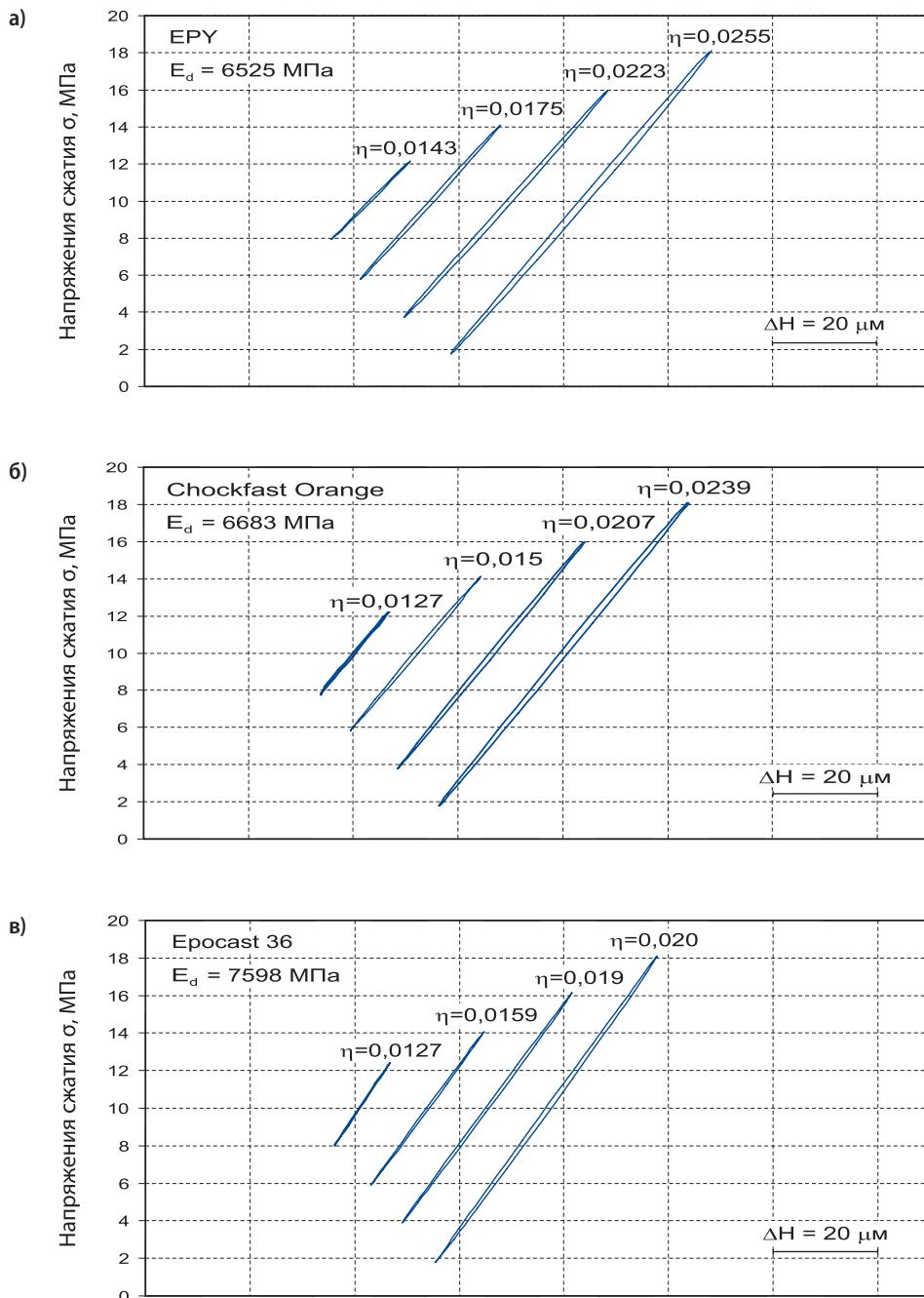


Рис. 7.50. Динамические петли гистерезиса для моделей фундаментных подкладок, изготовленных из трёх разных пластмасс (пробег деформаций как на рис. 7.49)

менён специальный экстензометр фирмы Instron. Исследования проводились при комнатной температуре 23°C, а также при температуре 80°C. Для реализации динамических испытаний была использована специальная компьютерная программа Wavemaker, которая обеспечила одинаковые условия для всех трёх исследуемых пластмасс.

Во время испытаний следующие параметры подвергались изменениям:

- средние напряжения ($\sigma_{sr} = 5$ и 10 МПа);
- амплитуда динамических напряжений ($\sigma_a = 2, 4, 6$ и 8 МПа);
- частота ($f = 1, 5, 10, 15$ и 20 Гц);
- температура $T = 23$ и 80°C.

Подробные описания и результаты испытаний содержатся в работе [137]. Примерные результаты в графической форме представлены на рис. 7.49 и 7.50. Рисунок 7.49 показывает ход сжимающего напряжения в функции времени, запрограммированного и реализованного испытательной машиной, а рис. 7.49 б, в, г соответственно — деформации на стыках (изменение высоты ΔH) моделей подкладок из трёх исследуемых пластмасс. Рис. 7.50 показывает динамические петли гистерезиса для исследуемых моделей подкладок, изготовленных из трёх разных пластмасс.

Диаграммы деформаций исследуемых фундаментных подкладок проявляют (рис. 7.49 и 7.50) качественно идентичные динамические свойства исследуемых пластмасс. Появляющиеся небольшие качественные разницы не имеют практического значения. Следовательно, можно констатировать, что в области статических и динамических свойств три исследуемые пластмассы принадлежат к тому же классу.

8

Исследования и моделирование конструкционных соединений с применением пластмассы EPY

8.1. Исследования плоских стыковых непосредственных соединений и с тонким слоем пластмассы EPY

8.1.1. Соединения встык с нагрузкой нормальной силой

Поверхности элементов машин после механической обработки не являются идеально гладкими. Появившиеся на них отклонения от идеального состояния (шероховатость, волнистость и погрешность формы) являются причиной того, что действительный контакт двух таких поверхностей не может выступить на всей номинальной поверхности их стыка, а только на её небольшой части (рис. 8.1а). Действительная поверхность стыка составляет обычно небольшой процент номинальной поверхности этого же стыка и зависит от величины, действующей на неё нормальной нагрузки [138, 139]. Результатом этого является то, что действительное распределение и величины контактных напряжений часто довольно сильно отличаются от тех, которые принимаются в расчётах для соединения встык идеально гладких поверхностей. Они существенным образом зависят от способа и точности обработки поверхности, а также от физических свойств верхних слоёв этой поверхности. Прерывистый характер контакта поверхностей после их машинной обработки имеет также значительное влияние на механические характеристики (рис. 8.1б) соединённых на стык элементов машин, а тем самым на статические и динамические свойства (жёсткость и гашение колебаний) целых сложных механических систем.

Применение тонкого слоя пластмассы при соединениях встык элементов машин и устройств требовало проведения соответствующих исследований таких соединений со слоем пластмассы и без этого слоя. На рис. 8.2 представлены характеристики, полученные экспериментальным путём, определяющие зависимость нормальных стыковых деформаций от действия средних нагрузок для любого соединения встык двух стальных цилиндров, подвергнутых осевому сжатию на испытательной машине. Лобовая поверхность цилиндра 1 была фрезерована ($R_a = 5,5 \text{ } \mu\text{м}$), а цилиндра 2 — обточена ($R_a = 5,5 \text{ } \mu\text{м}$). Испытываемые образцы были прижаты друг к другу средней нагрузкой, растущей от 0 до 100 МПа. Затем элементы были разгружены и снова нагружены.

Кривые «а» на рис. 8.2 показывают зависимость стыковых деформаций от средних нормальных нагрузок для соединения встык образцов 1 и 2 без слоя

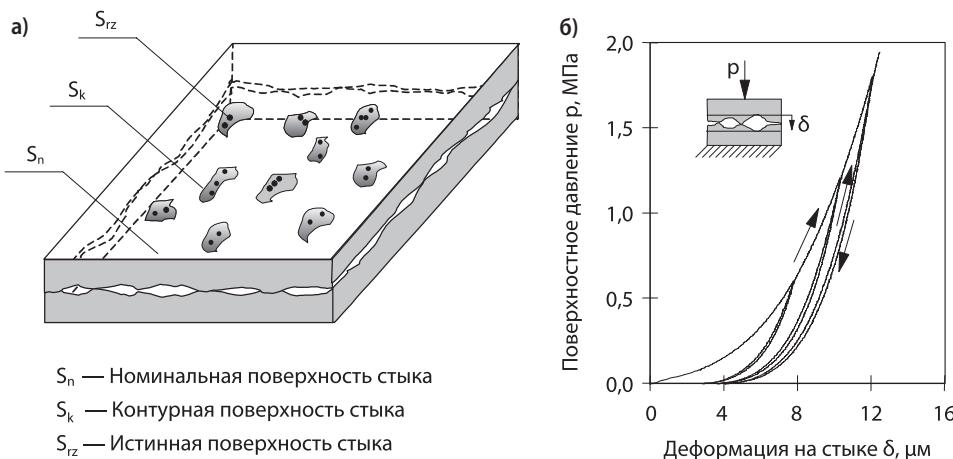


Рис. 8.1. Контактное соединение двух механически обработанных поверхностей и его характеристика: а) схема стыка б) зависимость нормальных стыковых деформаций от поверхности давления (определенного экспериментальным путем для контактного соединения двух стальных поверхностей с параметром шероховатости $R_a = 5 \mu\text{м}$)

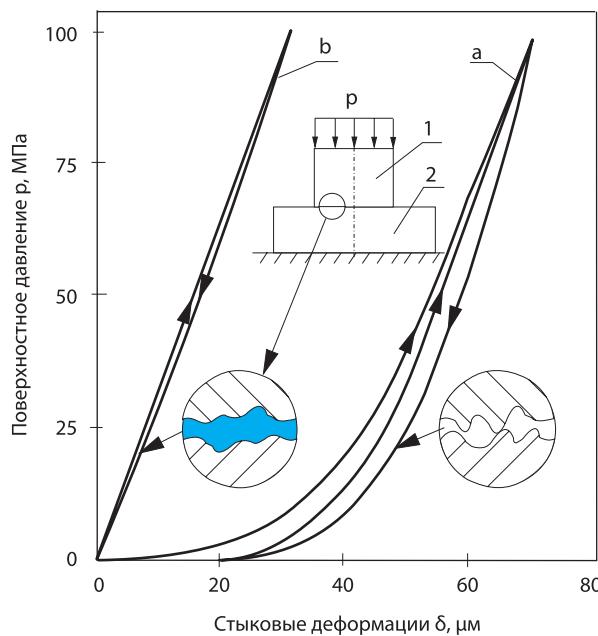


Рис. 8.2. Зависимость стыковых нормальных деформаций от среднего поверхности давления для лобового соединения двух стальных цилиндров без слоя пластмассы (кривые а) и с тонким слоем пластмассы (кривые б)

пластмассы, а кривые «б» — для соединения тех же элементов с тонким (около 0,5 мм) слоем отверждённой пластмассы EPY. Пластмасса во время монтажа была в жидком состоянии и при небольшой нагрузке соединяемых элементов точно заполнила всю неровную щель между металлическими поверхностями. Для возможности демонтажа элементов, соединяемые металлические поверхности были покрыты тонким слоем антиадгезионного средства.

Из проведенных испытаний следует (рис. 8.2), что тонкий слой пластмассы значительно изменяет свойства соединения встык обработанных машинным путём поверхностей. Деформации, выступающие при соединении элементов без слоя пластмассы, характеризуются нелинейным ходом (кривые «а»). Во время первой нагрузки появляются значительные пластические деформации (на соприкасающихся вершинах неровностей поверхности). При вторичных нагрузках, которые не превышают первичных величин, деформации имеют упругий и нелинейный характер.

Деформации контактного соединения элементов со слоем пластмассы в функции заданной нагрузки (рис. 8.2, кривые «б») имеют упругий и приблизительно линейный характер, а также значительно меньшую величину. Определённые для исследуемых соединений характеристики сжатия отличаются также способностью гашения вибраций (разные величины поверхностей, содержащихся внутри петли гистерезиса). В соединении на стыке без слоя пластмассы выступает большая неравномерность реальных контактных напряжений. В местах реального стыка соединяемых поверхностей напряжения превышают предел plasticности. В результате этого появляется так называемое оседание поверхности, которое вызывает травление болтов. При циклических нагрузках это может привести к выбивке поверхности и возникновению аварийной ситуации.

Наличие слоя пластмассы обеспечивает точное прилегание друг к другу соединяемых элементов и постоянное, более равномерное распределение контактных напряжений, величина которых меньше предела plasticности. Это обеспечивает очень хорошее взаимодействие соединяемых элементов не только при статических, но и при продолжительных динамических нагрузках.

В случае тонких слоёв пластмассы, отлитых между двумя металлическими поверхностями, отношение площади «A» поперечного сечения поверхности к высоте (толщине) «H» слоя пластмассы является очень большим. Экспериментальные исследования были проведены для стальных образцов диаметром $\varnothing 20 \times 25$ мм, состоящих из двух частей, разделенных тонким (около 0,5 мм) слоем пластмассы EPY (рис. 8.3а). Эти образцы были подвергнуты осевому сжатию на испытательной машине вплоть до появления в них значительных пластических деформаций (рис. 8.3б). Во время этого испытания тонкий слой пластмассы EPY вместе с металлом подвергся пластическим деформациям, увеличивая свой диаметр и уменьшая толщину. При этом пластмасса сохранила свою плотность и благодаря антиадгезионному средству легко отделилась от стальных поверхностей.

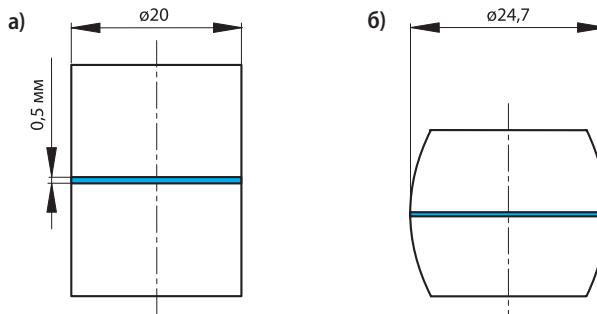


Рис. 8.3. Схема стального образца со слоем пластмассы до и после испытания под давлением

Максимальная величина сжимающего напряжения во время этого испытания $\sigma_{\max} = 1000$ МПа. Несмотря на очень большие величины сжимающих напряжений, многократно превышающих прочность на сжатие R_c стандартных образцов из пластмассы ($\varnothing 20 \times 25$ мм), тонкие слои этого материала, сжатые между двумя металлическими поверхностями, не подвергались разрушению. Очень большую прочность при сжатии этих слоёв можно объяснить ограниченной свободой деформаций в поперечных направлениях, а также сложным состоянием напряжения в пластмассе. Эффективный коэффициент трения на поверхностях стыка металла с пластмассой (литой и отверждённой между этими поверхностями) обычно больше 1. Это исключает скольжение на поверхности стыка.

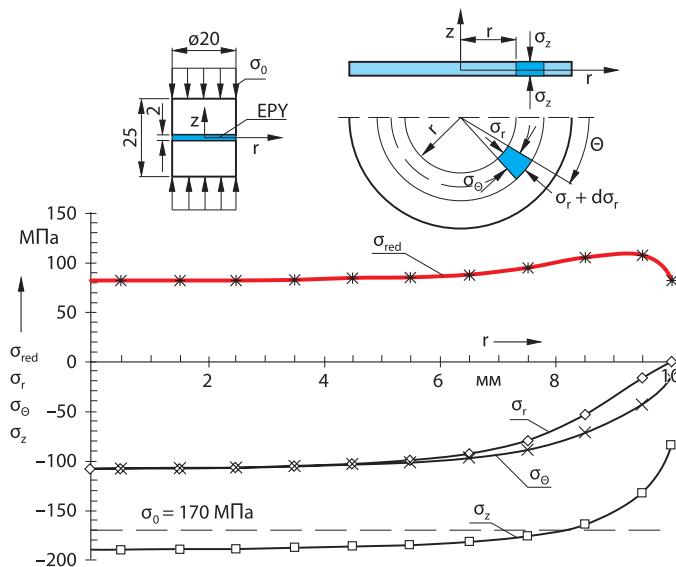


Рис. 8.4. Распределение напряжений в средней полосе слоя пластмассы

На рис. 8.4 представлены распределения и величины напряжений в среднем сечении слоя пластмассы толщиной 2 мм, определённые из расчётов, выполненных при помощи MES, для образца $\varnothing 20 \times 25$ мм, сжимаемого равномерно распределёнными напряжениями $\sigma_c = 170$ МПа. Для пластмассы приняты следующие данные: $E_t = 5000$ МПа, $v = 0,37$. Из расчётов следует (рис. 8.4), что слой пластмассы подвергнут трёхосному сжатию, что является очень положительным результатом. Приведенные напряжения в пластмассе были определены по гипотезе М.Т. Huber'a [140] и имеют значительно меньшие величины, чем составляющие напряжения. Этим объясняется очень большая прочность на сжатие тонких слоёв пластмассы.

После проведения испытаний на сжатие тонких слоёв пластмассы возник вопрос: сохраняет ли пластмасса свои первоначальные прочностные свойства после таких больших сжимающих напряжений (значительно превосходящих сопротивление R_c пластмассы, определённое на стандартных образцах)? Чтобы ответить на этот вопрос, было проведено испытание образцов на сжатие [141]. Результаты представлены на рис. 8.5. Кривая «а» показывает процесс сжатия

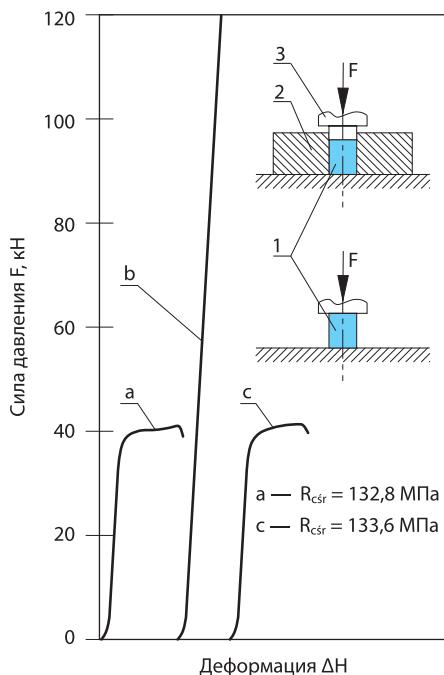


Рис. 8.5. Результаты опыта сжатия образцов ($\varnothing 20 \times 25$) пластмассы EPY: а — для образца, свободно сжимаемого; б — для образца, находящегося в отверстии стальной плиты (2); в — для образца, перегружаемого и вынутого из отверстия в стальной плите и подвергнутого свободному давлению [141]

образца из пластмассы EPY при нормальном сжатии, а кривая «б» — сжатие такого же образца, установленного без зазора в отверстие стальной плиты, ограничивающей свободу поперечных деформаций образца. В этих условиях не удалось разрушить образец. После выемки этого образца из отверстия в плите и нормального одноосного испытания на сжатие, он проявил первоначальные прочностные свойства, что показывает кривая «с» на рис. 8.5.

На основании проведенных экспериментальных исследований и теоретического анализа можно установить, что тонкий слой пластмассы, находящийся между металлическими поверхностями, может безопасно переносить очень большие сжимающие нагрузки.

Результаты исследований, проводимых на протяжении 40-летней деятельности, показывают, что это относится не только к статическим нагрузкам, но и к динамическим, выступающим при эксплуатации разных технических устройств.

Результаты этих исследований были использованы при монтаже крупногабаритных подшипников судовых палубных кранов, землечерпалок, экскаваторов бурого угля, отвалообразователей и т. п.

8.1.2. Контактные соединения, нагруженные нормальной постоянно действующей силой и переменной касательной силой

Контактные соединения элементов машин подвергаются не только нормальным нагрузкам, но и касательным к соединённым поверхностям (рис. 8.6а). Также в этих случаях наличие тонкого слоя пластмассы EPY имеет существенное влияние на их статические и динамические характеристики, а в результате на качество работы, надёжность и прочность контактных соединений, применяемых в машиностроении.

На рис. 8.6 показана схема модельного болтового соединения и результаты его испытаний [142] при постоянной нормальной нагрузке и при медленно увеличивающейся нагрузке, касательной к соединяемым поверхностям. В этом соединении внешняя касательная нагрузка переносится силами трения, которые зависят от коэффициента трения и поверхностного давления. Эксперименты касались непосредственногостыка соединяемых элементов (S—S), а такжестыка с тонким слоем пластмассы EPY, отверждённой между соединяемыми поверхностями (S—T—S; рис. 8.6а). Поверхности элементов были покрыты тонким слоем антиадгезионного средства для предотвращения склеивания. Подробное описание и результаты этих исследований содержатся в работах [142, 143].

Статические характеристики исследуемых соединений, показывающие зависимость касательных перемещений от средних величин касательных напряжений, представлены на рис. 8.6б. Также, как и при нормальных нагрузках, так и в этом случае, видны существенные качественные и количественные различия.

Статическая характеристика болтового соединения без пластмассы (рис. 8.6б, кривая 1), в диапазоне применённых нагрузок, является нелинейной и указывает

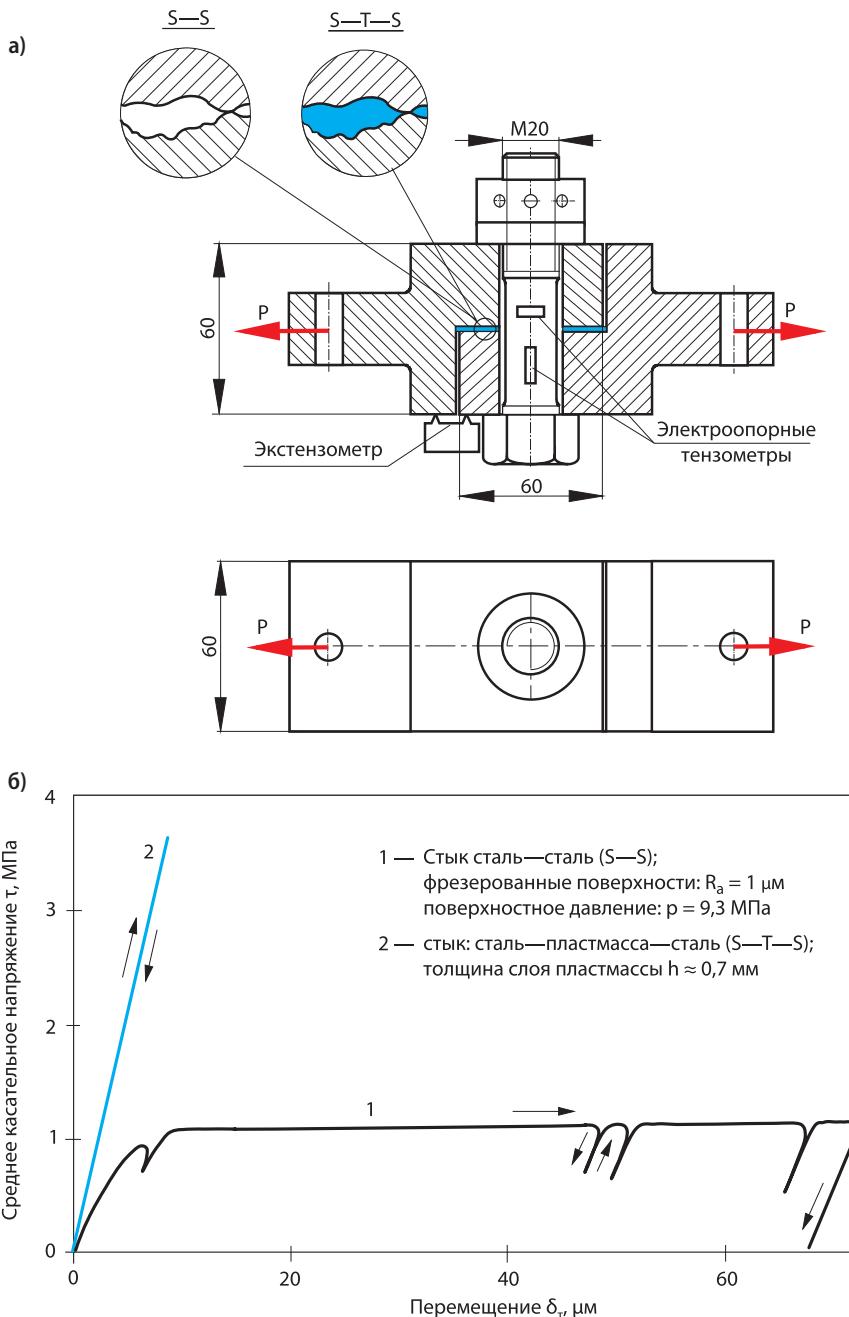


Рис. 8.6. Схема модельного болтового соединения (а) и его статические характеристики при постоянной нормальной нагрузке и медленно нарастающей нагрузке, касательной к соединяемым поверхностям (б)

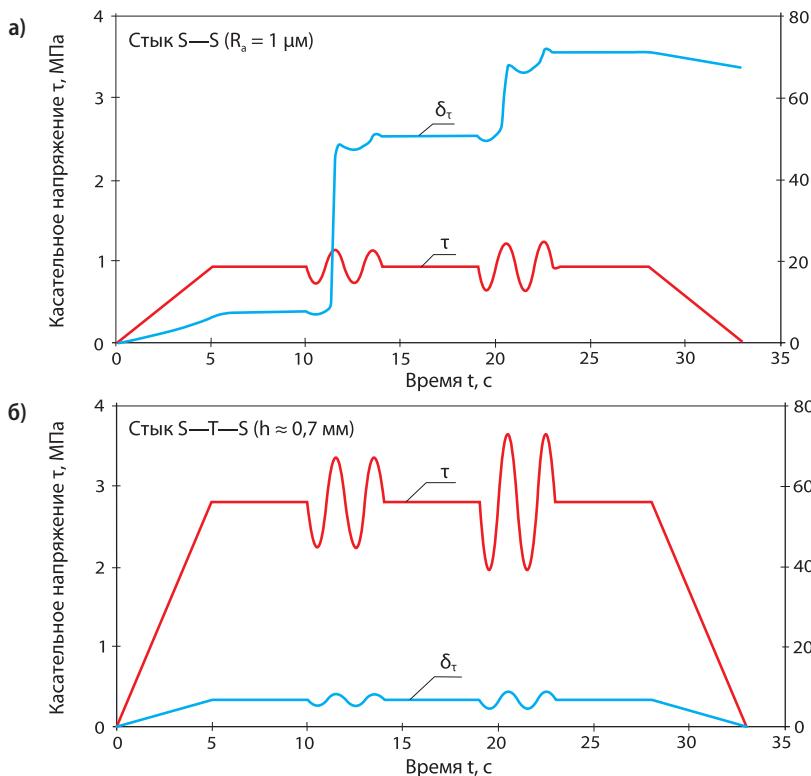


Рис. 8.7. Динамические характеристики модельного болтового соединения: а) непосредственный стык; б) стык с тонким слоем пластмассы

на упруго-пластический характер касательных перемещений δ_t . Здесь чётко выступают скольжения, имеющие необратимый характер. Кроме них видны также упругие перемещения, имеющие очень малые величины. Однако статическая характеристика контактного соединения с тонким (около 0,7 мм) слоем пластмассы имеет линейно-упругий характер (рис. 8.6б, прямая 2) даже при более чем в три раза большей касательной нагрузке. При этой нагрузке не появилось относительное скольжение соединённых поверхностей, что в эффекте гарантирует лучшую работу такого соединения.

На рис. 8.7 показаны характеристики контактных перемещений для модельного болтового соединения при статических и динамических касательных напряжениях. При непосредственном (S—S) соединении уже при небольшом среднем напряжении ($t = 1 \text{ МПа}$, рис. 8.7а) динамические напряжения синусоидального характера и относительно небольшой амплитуде вызывают значительные скольжения соприкасающихся поверхностей. В то же время в соединении с тонким слоем пластмассы (S—T—S) даже средние напряжения и трёхкратно большие

амплитуды динамических напряжений вызвали появление только небольших касательных перемещений упругого характера, которые полностью исчезли после снятия касательной нагрузки (рис. 8.7б). Отсутствие малых скольжений является очень благоприятным для работы соединения, в котором не выступает явление фреттинга и абразивный износ. В результате обеспечивается хорошая работа и большая прочность болтового соединения. Это является результатом гораздо большей величины эффективного коэффициента трения на стыке пластины с металлом, чем на стыке металла с металлом.

8.2. Испытания моделей фундаментных призонных болтов в пластмассе

Призонные болты применяются при монтаже судовых машин и устройств с целью переноса значительных сил, действующих в касательном направлении к поверхности подпоры устанавливаемого объекта. В особенности это касается главных двигателей. Сверление и точная развёртка отверстий для пригонки фундаментных болтов является очень трудным и дорогостоящим процессом, особенно в случае применения фундаментных подкладок, литых из пластины. Чтобы избежать этих трудностей, появилась концепция пригонки фундаментных болтов в пластмассе, применяемой для подкладок. Для этой цели отверстия в фундаментной плите и основании машин необходимо выполнять так, чтобы они были на около 2 мм больше диаметра болта. Затем во время монтажа, после установки двигателя и закладки болтов с надлежащим зазором, заливают жидкой пластмассой формы подкладок и щели между болтом и отверстием в плите фундамента и в основании двигателя.

Применение этой концепции на практике требовало проведения в первую очередь соответствующих лабораторных исследований. Сначала эти испытания были проведены на модели фундаментного соединения, показанного на рис. 8.8. Диаметр отверстий соединяемых элементов 1, 2 и 3 был на 2 мм больше диаметра болта 5. Во избежание склеивания болта с пластмассой, он был покрыт антиадгезионным средством (Siliform AR1). После установки этой модели болтового соединения в такой позиции, чтобы ось болта находилась в вертикальном положении, а гайка была сверху и после закладки надлежащей формы, были отлиты в ней две подкладки размером 100 × 100 × 40 мм, а также втулки между болтом и плитами. Заполнение щели между болтом и стенками отверстий в плитах наступило исключительно под действием гидростатического давления столба жидкой пластины.

После отверждения пластины была получена «двойная» модель болтового соединения. Половина этой модели имитирует работу действительного фундаментного соединения во время действия касательных сил. Эта модель была подвергнута испытанию на сжатие на испытательной машине. При силе

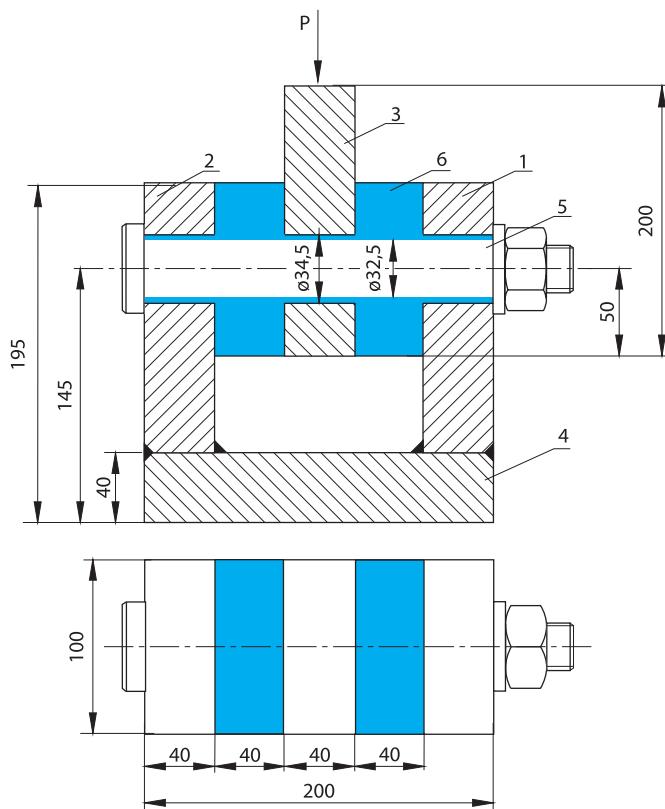


Рис. 8.8. Модель фундаментного соединения с призонным болтом в пластмассе

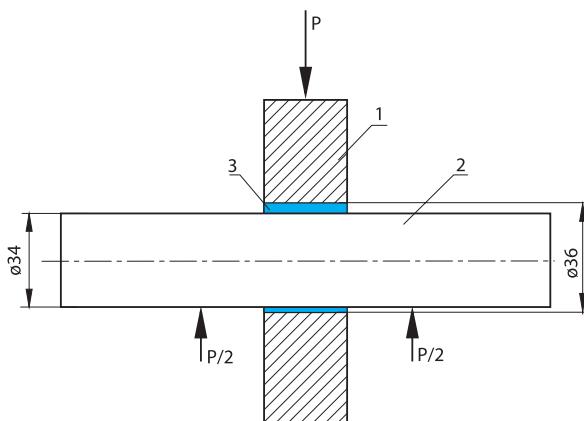


Рис. 8.9. Схема нагрузки стержня болта, осаженного в пластмассе: 1 — стальной диск, 2 — стержень, 3 — слой пластмассы

$P = 190$ кН появились трещины на боковых поверхностях подкладок. Испытание было прервано при силе $P = 211,2$ кН. Сила, необходимая для выдавливания болта, была равна 48 кН. Максимальная величина рассчитанной поверхностной нагрузки на слой пластмассы в отверстиях плит равнялась 159,4 МПа. После выемки болта было отмечено, что слой пластмассы при средней толщине 1 мм хорошо заполняет пространство между болтами и отверстиями в плитах и не проявляет никаких признаков разрушения. Прочный прогиб болта в месте действия силы P равнялся 1 мм.

Проведенное испытание показало, что:

- используемая пластмасса хорошо заполнила щели (около 1 мм) между болтом и стенками отверстий в плитах;
- соединение с призонным болтом в пластмассе может переносить большие поперечные нагрузки, действующие на ось болта;
- существует возможность демонтажа соединения, даже после небольшой пластической деформации болта.

Очередное испытание было проведено для проверки поведения стержня, осаживаемого в пластмассе. Испытание проходило по схеме, представленной на рис. 8.9. Стержень был осажен в отверстие стального диска эксцентрично так, чтобы максимальная толщина стенки пластмассы равнялась 1,5 мм, а минимальная — 0,5 мм.

Щель между стержнем и отверстием в стальном диске была залита пластмассой в вертикальной позиции. Поверхность стержня была покрыта тонким слоем антиадгезионного средства. Испытание проводилось на двух моделях. В одном случае испытанию подвергался самый тонкий слой пластмассы (0,5 мм), а в другом — самый толстый (1,5 мм). В случае тонкого слоя испытание было проведено при силе 260 кН, а в случае толстого — при силе 200 кН. Испытания заканчивали после появления чётко замеченной прочной деформации (изгиба) стержня.

После испытания диск был порезан для определения состояния тонкого слоя пластмассы. Было отмечено, что пластмасса хорошо заполнила всю щель, обеспечивая необходимую тугую посадку стержня. Образовавшиеся во время испытания расчётные сжимающие напряжения (250 и 192 МПа) не вызвали повреждений тонкого слоя пластмассы (за исключением его краёв). Литая из пластмассы втулка также не потеряла своей адгезии к стенке в отверстии диска.

Дальнейшие испытания касались прочности на сжатие тонкой стенки втулки, отлитой и отверждённой в щели между стержнем и полукруглым углублением, выполненном в стальной подпоре. Эти испытания были проведены по схеме, представленной на рис. 8.10. Основной целью этих испытаний было исследование поведения тонкой втулки, отлитой из пластмассы, в условиях очень больших сжимающих напряжений.

Для испытаний были выполнены три образца, отличающиеся толщиной втулки,литой из пластмассы. Соприкасающиеся с пластмассой поверхности в подпорах

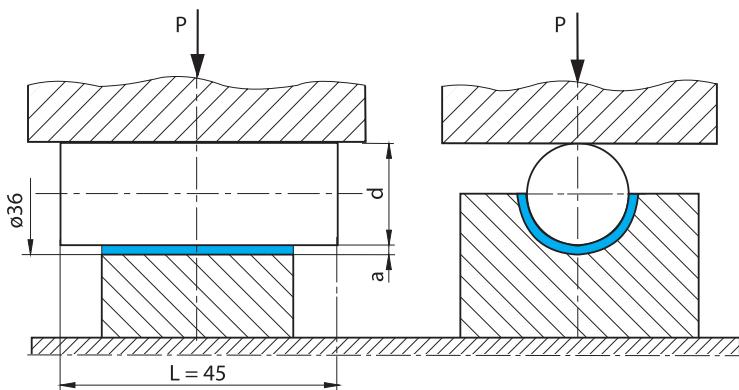


Рис. 8.10. Схема сжатия тонкой втулки, отлитой из фундаментной пластмассы

и на стержнях были покрыты антиадгезионным средством (Siliform AR1). После литья и отверждения пластмассы в течение 10 дней при температуре 18°C было проведено испытание на сжатие всех трёх моделей. Сжатие было проведено на испытательной машине ZD-100. Образцы нагружались радиально распределённой силой по образующей стержня, нарастающей от 0 до 1000 кН. Напряжение сжатия в тонком слое пластмассы в зависимости от диаметра стержня равнялось от 635 до 694 МПа.

Во всех исследованных образцах тонкий слой пластмассы не разрушился и не был повреждён. Не было замечено также вытекание пластмассы при экстременной нагрузке 1000 кН. Зато образовались значительные прочные наклёпы стержней в местах их линейного контакта с прижимной плитой испытательной машины. Исследования показали очень большую прочность тонкого слоя пластмассы,литой и отверждённой между металлическими поверхностями в условиях сжатия. Не были отмечены разницы в поведении тонких слоёв толщиной 2,1 и 0,1 мм.

Были проведены также моделирование и численный расчёт исследуемой системы при помощи MES. Для этой цели была принята вспомогательная модель, представленная на рис. 8.11. Не принимая во внимание краевые эффекты, выступающие по краям рассматриваемой системы, из модели был вырезан «пластырь» толщиной $g = 10$ мм (рис. 8.11б) и было принято плоское состояние деформации. Была также принята полная адгезия пластмассы к металлу, что подтверждается большой величиной эффективного коэффициента трения (около 1) и появлением больших сжимающих напряжений при контакте.

Для расчётов были принятые следующие данные: $E_s = 2,1 \times 10^5$ МПа; $v_s = 0,3$; $E_t = 5,0 \times 10^3$ МПа; $v_t = 0,38$; $l = 45$ мм; $h = 30$ мм; $d = 32$ мм; $b = 2$ мм; $P = 2,08 \times 10^2$ Н. Величина силы P была подобрана так, чтобы средняя расчётная величина поверхностных нагрузок на диаметральном сечении $d \times g$ была равна $P_0 = 100$ МПа.

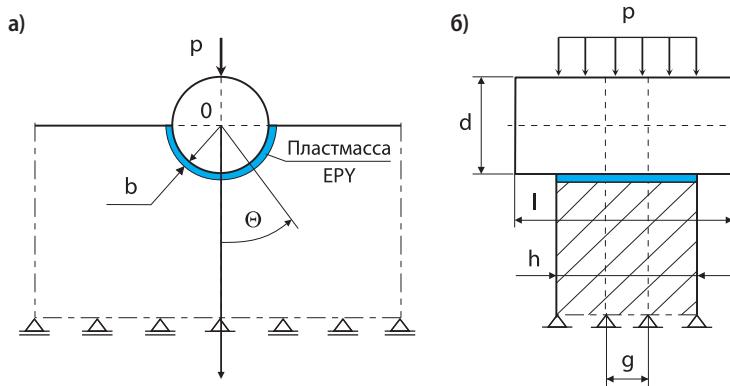


Рис. 8.11. Вспомогательная модель для определения напряжений в тонком слое пластмассы

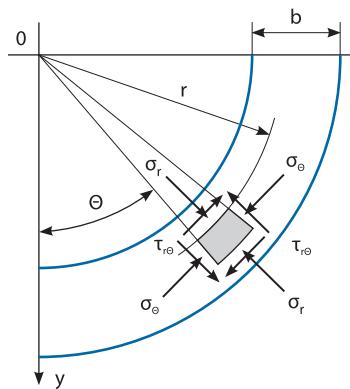


Рис. 8.12. Обозначение напряжений в полярной системе координат

Численные расчёты были выполнены при помощи системы MES ANSYS. Была принята полярная система координат, как на рис. 8.12. Результаты расчётов представлены на рис. 8.13 и 8.14.

На рис. 8.13 показаны распределения отдельных напряжений, выступающих в центре толщины слоя пластмассы (для $r = 17$ мм). Рисунок 8.14 представляет сводный график, содержащий распределения и величины напряжений в центре толщины слоя пластмассы, которые были вызваны действием силы P (как на рис. 8.11) величиной, вызывающей расчётные нагрузки на диаметральное сечение $p_0 = P/d \times g = 100$ МПа. Следует обратить внимание на факт, что распределение восстановленных напряжений является приблизительно равномерным в целом слое пластмассы, а их величина гораздо меньше, чем принятых расчётных напряжений p_0 и максимальных составных величин нормальных напряжений ($\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$). Это гарантирует хорошее переносжение внешних нагрузок. Положи-

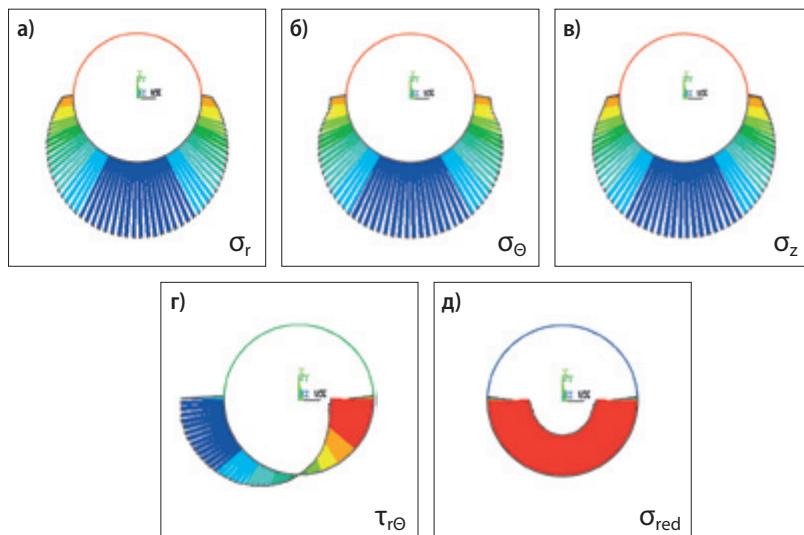


Рис. 8.13. Распределение напряжений: нормальных (σ_r , σ_θ , σ_z), касательных ($\tau_{r\theta}$) и приведенных (σ_{red}) в середине толщины слоя пластмассы

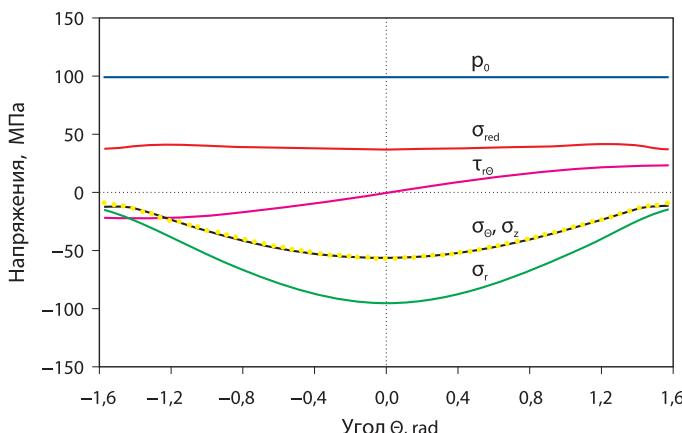


Рис. 8.14. Сводная диаграмма, показывающая распределение составляющих и приведенных напряжений, выступающих в середине толщины слоя пластмассы (в угловых координатах Θ)

тельные результаты лабораторных испытаний, теоретического анализа и работ по внедрению полностью подтвердили практическую возможность применения подкладочной пластмассы для посадки в ней пригнанных фундаментных болтов, крепящих главные судовые двигатели на фундаментах. Это решение было

новаторским, получило патент [49] и признание классификационного общества, ведущего надзор за постройкой морских судов.

8.3. Исследования пластмассы ЕРУ в аспекте её оптимального использования для монтажа судовых устройств

8.3.1. Вступительные замечания

Допускаемые напряжения сжатия для пластмасс, используемых для фундаментных подкладок главных двигателей судов, равны 5 МПа. Такая низкая величина допускаемого напряжения была установлена классификационными обществами, принимая во внимание некоторую податливость пластмассы к ползучести при повышенной температуре. Так как сопротивление сжатию стандартных образцов пластмассы равно 140—150 МПа, коэффициент запаса прочности при сжатии получается равным 28—30. В действительности сопротивление пластмассы в подкладке, из-за большого отношения опорной поверхности к высоте, является значительно большим, чем сопротивление стандартного образца, что является причиной того, что коэффициент запаса прочности при сжатии превышает 30. По той же причине ползучесть подкладок из пластмассы также значительно меньше, чем ползучесть, определённая для стандартных образцов из этого материала.

Якорные (брашпили) и швартовные лебёдки, а также многие другие вспомогательные устройства, установленные на палубе или внутри судна, не требуют такого точного монтажа, как главный двигатель, и по этой причине нет необходимости применять столь преувеличенный коэффициент запаса прочности. Это делает возможным уменьшение размеров подкладок и более рациональное использование прочностных свойств пластмассы.

Применение фундаментных подкладок, литых из пластмассы ЕРУ, под якорные и швартовные лебёдки вместо раньше применяемых стальных подкладок без конструкционных изменений этих устройств требовало проведения специальных испытаний с учётом величин поверхностных нагрузок, превышающих 5 МПа.

Целью этих исследований было получение ответов на конкретные вопросы: могут ли эти подкладки при монтаже якорных и швартовных лебёдок безопасно переносить монтажные нагрузки 15 МПа, эксплуатационные нагрузки 30 МПа и аварийные — 60 МПа в течение $t = 30$ мин.? Для получения ответов на эти вопросы был проведен теоретический анализ и экспериментальные испытания моделей подкладок.

8.3.2. Теоретический анализ

Для образца $\varnothing 20 \times 25$ мм, подвергнутого свободному сжатию, не учитывая трения, можно принять одноосное напряжённое состояние. В подкладке из-за ограниченных возможностей деформаций в поперечных направлениях (за исключением свободных краев) действует сложное напряжённое состояние.

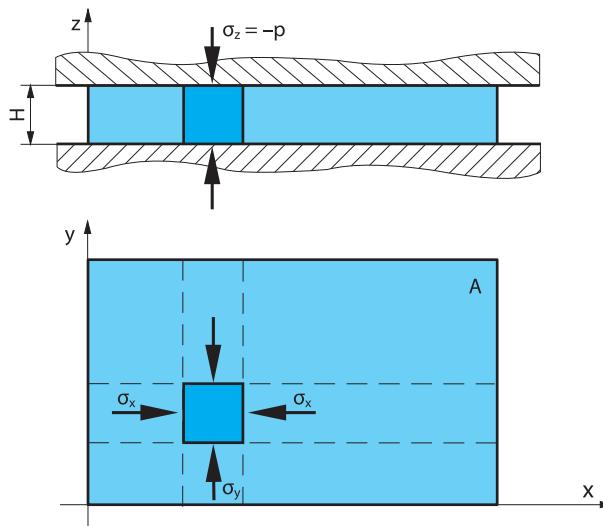


Рис. 8.15. Состояние напряжений в подкладке

Пластмасса в подкладке подвергается трёхосному сжатию, что создаёт благоприятные условия работы и обеспечивает очень большую статическую и усталостную прочность. Исходя из предпосылки, что условно выделенный из подкладки прямоугольный параллелепипед не имеет возможности деформации в поперечных направлениях X и Y (рис. 8.15), по обобщённому закону Hooke'a [140] получается зависимость:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{v\sigma_z}{1-v} = -\frac{vp}{1-v} \quad (8.1)$$

где:

p — поверхностная нагрузка;
 v — коэффициент Poisson'a.

Принимая (на основании собственных исследований) для пластмассы EPY $v = 0,376$, получается:

$$\sigma_x = \sigma_y = -\frac{0,376 p}{1 - 0,376} = -0,6026 p \quad (8.2)$$

Восстановленные напряжения в подкладке рассчитываются по гипотезе M.T. Huber'a [140] по формуле:

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x} \quad (8.3)$$

После подстановки соответствующих напряжений, выраженных в нагрузках p , получается:

$$\sigma_{\text{red}} = 0,397 p \quad (8.4)$$

Представленные расчёты имеют приблизительный характер. Определённое таким образом приведенное напряжение должно быть меньше, чем условный предел plasticитности пластмассы, определённый при одноосевом сжатии. Для пластмассы EPY $R_{0,2} = 90—100$ МПа. Из этого следует, что расчётные поверхностные нагрузки в подкладке должны выполнять условие $p < R_{0,2} / 0,397 \approx 2,5 R_{0,2}$. Это приводит к росту в 2,5 раза коэффициента запаса, определённого для стандартного образца пластмассы, подвергнутого простому статическому испытанию на сжатие.

8.3.3. Модельные испытания фундаментной подкладки якорной лебёдки

Целью этих испытаний была проверка поведения модели фундаментной подкладки из пластмассы EPY размером $100 \times 100 \times 15$ мм (рис. 8.16) под нагрузкой $F = 900$ кН, вызывающей поверхностное давление $p = 90$ МПа и действующей в течение 60 минут.

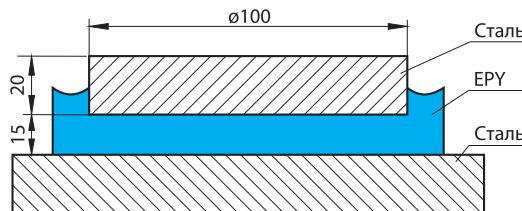


Рис. 8.16. Модельная подкладка якорной лебёдки для испытаний при поверхностных нагрузках 90 МПа

Подкладка из пластмассы EPY была отлита на готово между двумя стальными плитами и отверждена в течение 3 суток при комнатной температуре (около 24°C). Изготовленная таким образом модель соединения (расположение двух плит с отлитой между ними подкладкой) подвергалась сжатию силой $P = 900$ кН на испытательной машине. Подкладку оставили под пробной нагрузкой ($P = 900$ кН) на 60 минут, после чего нагрузка была снята и подкладку внимательно осмотрели. Не были замечены никакие повреждения подкладки, а также никакие изменения во всей испытательной установке. Следовательно, можно сделать вывод, что поверхностные нагрузки величиной $P = 90$ МПа (в полтора раза больше, чем принятые аварийные нагрузки), действующие в течение 60 минут, не являются опасными для подкладок из пластмассы, отлитой и отверждённой между двумя металлическими плитами.

8.3.4. Итоги испытаний

На основании проведенного теоретически-рассчётного анализа и выполненных испытаний модели можно установить, что при монтаже якорных и швартовных лебёдок, а также других вспомогательных устройств, можно применять для фундаментных подкладок из пластмассы EPY следующие величины нагрузок: монтажных — 15 МПа, эксплуатационных — 30 МПа и аварийных — 60 МПа.

Эти нагрузки могут действовать в течение 30 минут, являются вполне безопасными и могут применяться без всяких отрицательных последствий.

8.4. Исследования влияния окрасочных покрытий на усадку судовых машин и устройств, устанавливаемых на подкладках, литых из пластмассы

8.4.1. Вступление

Современный способ постройки судов основывается на сборке на стапеле ранее изготовленных его элементов в форме секции или блоков. С целью защиты от коррозии этих элементов их поверхности покрывают несколькими слоями специальных красок общей толщиной до 300 микрон.

Традиционный способ монтажа судовых машин и устройств на фундаментах с использованием металлических выравнивающих подкладок предусматривал удаление этих покрытий и пригонку подкладок к очищенным и выравненным металлическим поверхностям. Это была трудоёмкая работа, имеющая существенное влияние на время выполнения монтажа машин и увеличивающая финансовые затраты.

В настоящее время, когда стали применяться подкладки из пластмасс, литые непосредственно под машинами, появился вопрос: какое влияние эти покрытия могут иметь на качество их монтажа? Чтобы получить ответ на этот вопрос, нужно было провести соответствующие исследования. Они были выполнены по заказу Щецинской судоверфи (Польша), чтобы определить: нужно ли перед монтажом главного двигателя и других судовых устройств удалять окрасочные покрытия с опорных поверхностей фундаментов перед их монтажом на подкладках из пластмассы.

8.4.2. Использованные для исследований образцы и испытательный стенд

Исследования были проведены на вырезанных из листовой стали круглых образцах диаметром 90 мм и высотой 40 мм, с одной стороны покрашенных антакоррозионными красками, в соответствии с планом покраски судна B170/III, строящегося на Щецинской судоверфи. Было сделано семь образцов без покрытия краской и с односторонним многослойным покрытием краской толщиной 11—289 микрон. Более точную информацию об этом можно найти в работах [36].

Для каждого образца был изготовлен стальной контробразец диаметром 90 мм и высотой 46 мм. В середине исследуемых образцов были просверлены, переточены и нарезаны отверстия для крепления в них оснастки, необходимой для измерения контактных деформаций (рис. 8.17). Поверхностистыка образцов имели форму кольца с номинальной поверхностью $A = 55 \text{ см}^2$.

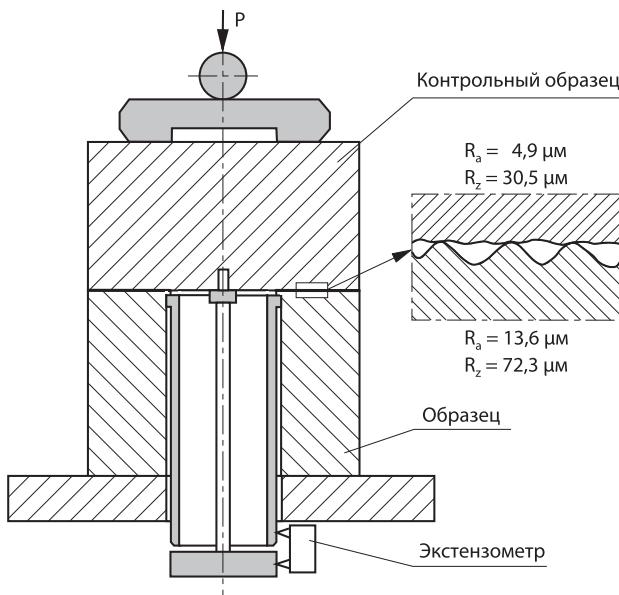


Рис. 8.17. Схема способа измерения стыковых деформаций и параметры шероховатости испытываемых образцов

Для реализации исследований была использована испытательная машина Instron (модель 8501 Plus) с применением специальной оснастки, а процессы исследований управлялись по программе Wavemaker. Измеренные величины силы и контактных деформаций δ (показания экстензометра) были записаны в функции времени с соответствующей частотой в файлах ASCII. Эти файлы для необходимой обработки и графического представления хода и результатов исследований были перенесены в калькуляционный лист Excel.

8.4.3. Программа, реализация и примерные результаты испытаний

Испытания были проведены двумя этапами: сначала испытанию на сжатие подверглись все образцы с контробразцами без слоя пластмассы (рис. 8.18а, в), затем те же комплекты образцов с литым между ними и отверждённым (в течение 48 часов при температуре 23°C) слоем пластмассы EPY толщиной около 1 мм (рис. 8.18б, в). Для предохранения исследуемых образцов от склеивания

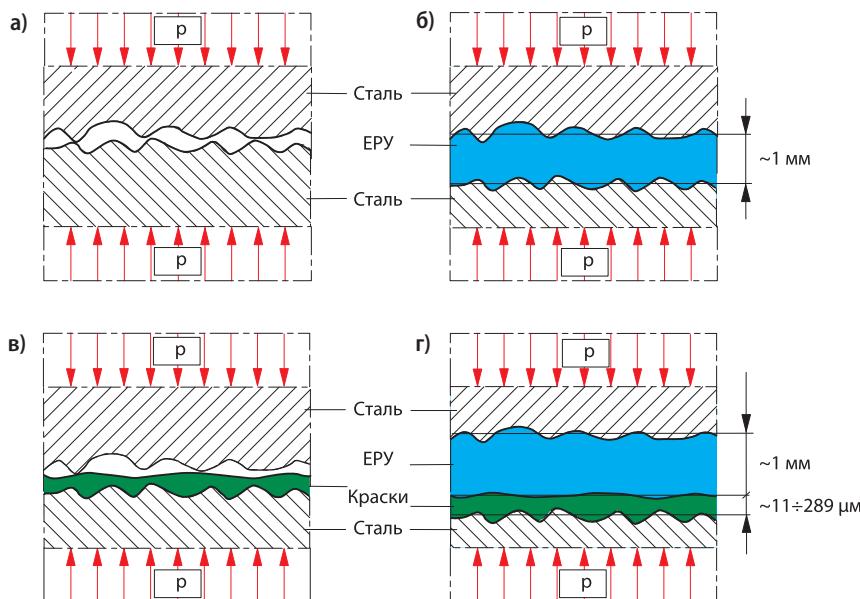


Рис. 8.18. Схема испытания стыкового соединения: а), б) образцы без покрытий краской; в) и г) стыки образцов, покрытые краской

поверхности, соприкасающейся с пластмассой, они были покрыты тонким слоем антиадгезионного средства (Spray FT36).

Все комплекты образцов (без пластмассы и со слоем пластмассы) подверглись линейной нагрузке при постепенно увеличивающейся сжимающей силе F. Примерные графики, иллюстрирующие ход и результаты испытаний, представлены на рис. 8.19—8.22.

Рисунок 8.19 представляет результаты поверхностных нагрузок p и вызванных ими контактных деформаций δ_a и δ_b для контактных образцов без окраски, причём δ_a относится к контактному соединению без пластмассы (рис. 8.18а), а δ_b — к контактному соединению со слоем пластмассы EPY (рис. 8.18б). Из хода кривой δ_a (рис. 8.19) следует, что зависимость контактных деформаций от поверхностных нагрузок для комплекта образцов без пластмассы (стык: металл—металл) является сильно нелинейной. Полные контактные деформации в этом случае являются значительными ($\delta_{a\max} = 34 \mu\text{m}$) и имеют упруго-пластический характер. Нижние точки кривой δ_a , отвечающие нулевым нагрузкам, определяют контактные пластические деформации, вызванные предыдущими максимальными нагрузками.

График δ_b (рис. 8.19) обозначает временные изменения контактных деформаций комплекта образцов со слоем пластмассы EPY (стык: металл—пластмасса—металл). Максимальные контактные деформации здесь имеют гораздо меньшие величины ($\delta_{b\max} = 4 \mu\text{m}$), упругий характер и линейный ход зависимости.

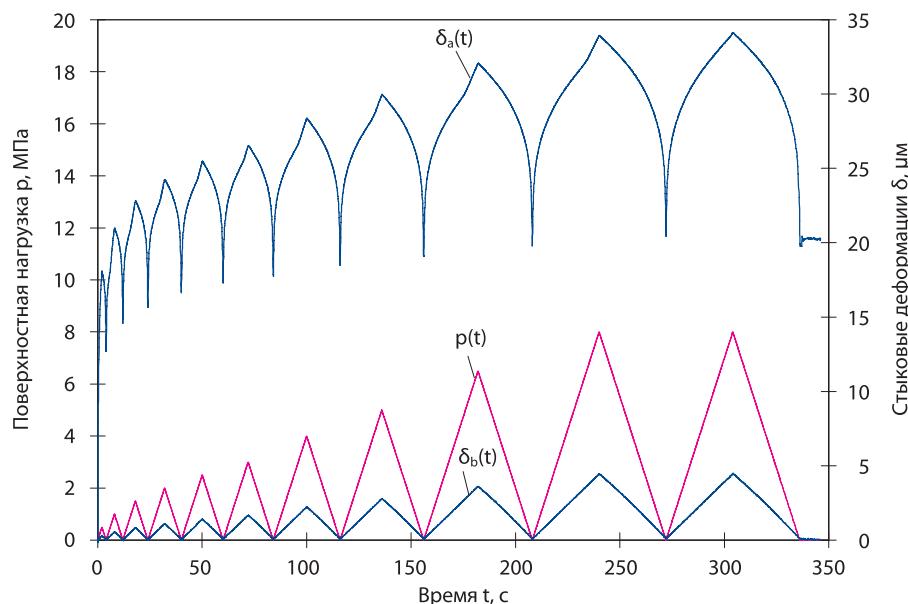


Рис. 8.19. Поверхностные нагрузки и отвечающие им деформации в функции времени для набора образцов, не покрытых красками: δ_a — без пластмассы, δ_b — со слоем пластмассы ЕРУ

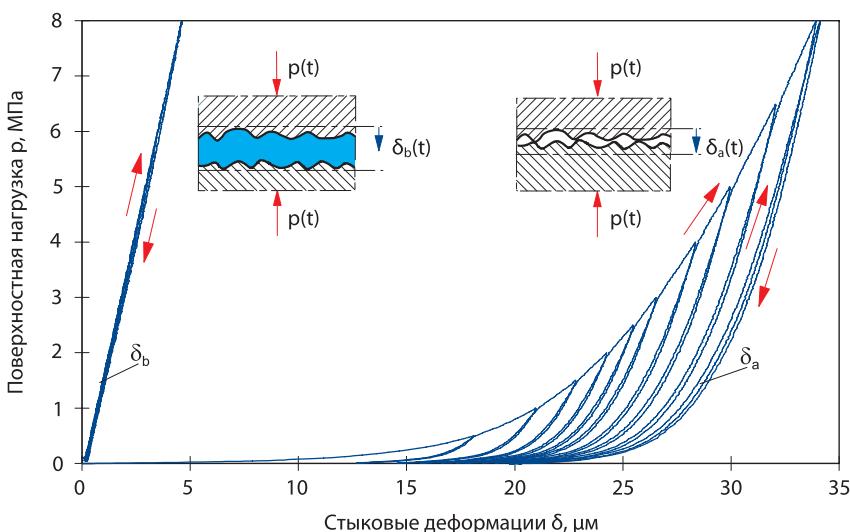


Рис. 8.20. Зависимость стыковых деформаций от поверхностных нагрузок для набора образцов, не покрытых краской: δ_a — без пластмассы, δ_b — со слоем пластмассы ЕРУ, при нагрузках как на рис. 8.19

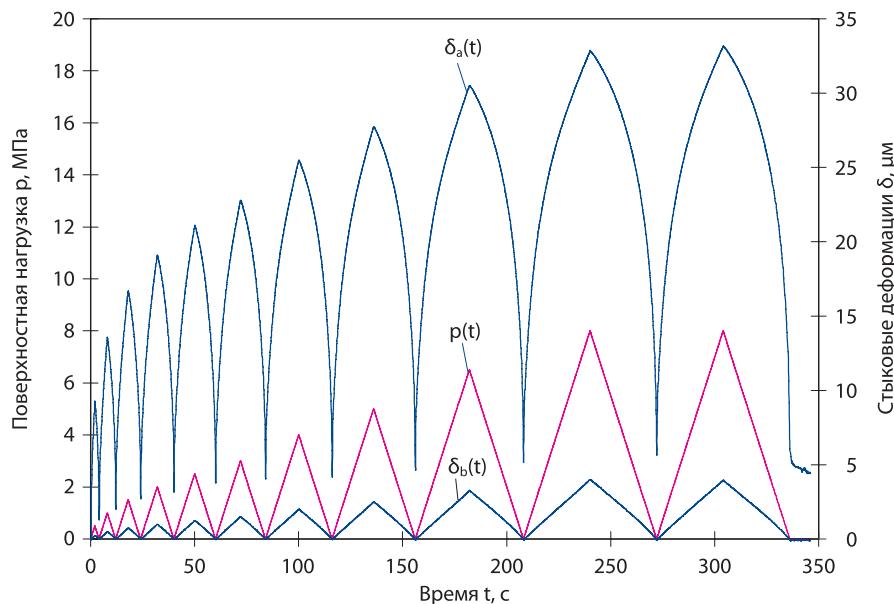


Рис. 8.21. Поверхностные нагрузки и отвечающие им деформации в функции времени для набора образцов, покрытых четырьмя слоями краски: δ_a — без пластмассы, δ_b — со слоем пластмассы EPY

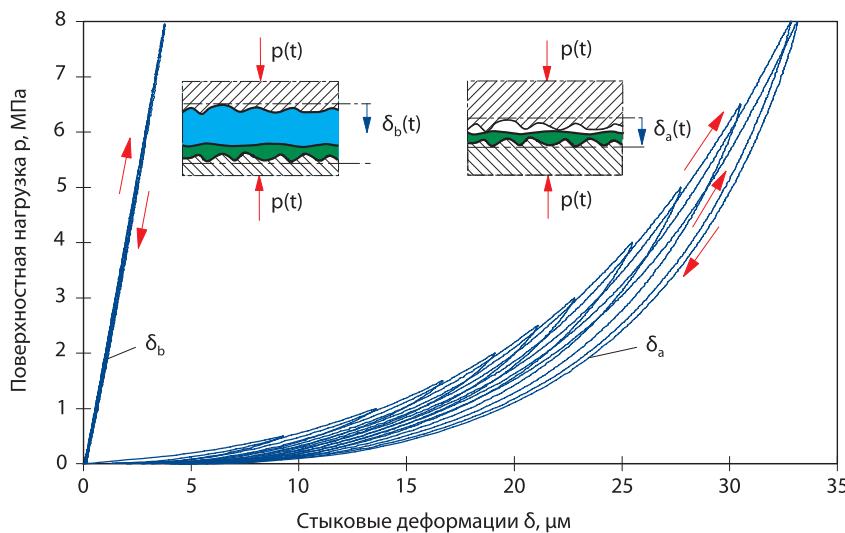


Рис. 8.22. Зависимость стыковых деформаций от поверхностных нагрузок для набора образцов, покрытых четырьмя слоями красок: δ_a — без пластмассы, δ_b — со слоем пластмассы EPY, при нагрузках как на рис. 8.21

Результаты на рис. 8.19 в переработанной форме, показывающей зависимость нормальных контактных деформаций от поверхностных нагрузок, представлены на рис. 8.20. Здесь видна большая качественная и количественная разница контактных деформаций для комплекта образцов без пластмассы (графики δ_a) и со слоем пластмассы (графики δ_b). Из-за своей шероховатости, волнистости и погрешностей формы, металлические поверхности без слоя пластмассы EPY соприкасаются в нескольких «точках» (рис. 8.18а).

Действительные поверхностные нагрузки здесь очень большие и вызывают значительные пластические деформации верхушек неровностей. В результате этого здесь кроме упругого сближения выступает значительное устойчивое сближение (оседание) соприкасающихся поверхностей. Наличие в соединении пластмассы EPY (рис. 8.18б), хорошо заполняющей все микро и макроуглубления, обеспечивает очень хорошее прилегание соединяемых поверхностей и равномерное распределение нагрузки на всей номинальной поверхности стыка. В итоге получаются очень малые величины контактных деформаций линейно-упругого характера (рис. 8.20, кривые δ_b).

Рисунки 8.21 и 8.22 представляют ход и результаты аналогичных исследований комплекта образцов с четырьмя слоями окрасочного покрытия (общей толщиной 289 μm). Кривая δ_a показывает ход деформации стыка: «металл—окрасочное покрытие—металл» (рис. 8.18в). Так же, как и в случае комплекта образцов, согласно рисунку 8.18а, деформации δ_a имеют здесь большие величины, нелинейные зависимости и упруго-пластический характер. Зато совершенно иными являются пропорции упругих и пластических деформаций, а кроме того, здесь выступают некоторые реологические эффекты окрасочных покрытий (изменения деформаций во времени [36, 143]).

Графики δ_d на рис. 8.21 и 8.22, показывающие ход деформаций для стыка: «металл—окрасочное покрытие—пластмасса EPY—металл» (рис. 8.18г), имеют линейный характер. Величины этих деформаций очень малы по сравнению с деформациями такого же комплекта образцов без пластмассы EPY, а их характер является линейно-упругим.

С точки зрения качества, аналогичные результаты получены при испытании остальных комплектов образцов с окрасочными покрытиями [36]. Проведенные испытания показали очень благоприятное влияние пластмассы EPY на податливость контактных соединений, как без окрасочных покрытий, так и с ними. В случае использования пластмассы EPY наличие окрасочных покрытий толщиной 11—289 микрон не вызывало даже в наименьшей степени отрицательного влияния на характеристики податливости стыка и на оседание соединяемых поверхностей. Контактные соединения без пластмассы EPY тех же самых комплектов образцов с окрасочными покрытиями проявили гораздо большую (в 7—10 раз) податливость, а также склонность к ползучести и виброползучести [143], что в результате ведёт к их оседанию.

8.4.4. Итоги испытаний

На основании проведенных испытаний можно сформулировать следующие выводы, являющиеся ответом на поставленные во вступлении вопросы.

Наличие консервационно-окрасочных покрытий на монтажных поверхностях фундаментов в случае применения во время монтажа судовых машин и устройств фундаментных подкладок, литых на готово из пластмассы EPY, не имеет практически никакого влияния на механические характеристики контактных соединений фундамента, подкладки и основания машины. Не было определено никакое имеющее практическое значение влияние вида краски, количества и толщины слоев (в пределах от 11 до 289 микрон) на характеристики исследуемых контактных соединений. В случае использования пластмассы EPY для комплектов образцов с окрасочными покрытиями и без них характеристики являются почти идентичными.

Из этого следует, что нет никаких существенных причин для удаления консервационно-окрасочных покрытий с поверхности фундаментов перед монтажом на них машин и устройств, а как раз наоборот — наличие окрасочного покрытия может быть положительным для защиты этих поверхностей от коррозии.

Механические характеристики контактных соединений металлической поверхности с другой (чистой) металлической поверхностью, покрытой консервационно-окрасочными покрытиями, в случае отсутствия между этими поверхностями слоя пластмассы EPY, отличаются значительным образом. В контактных соединениях с окрасочными покрытиями выступают значительные контактные деформации и отчетливо заметный эффект ползучести. Необходимо иметь в виду то, что в случае применения во время монтажа машин традиционных металлических подкладок удаление окрасочных покрытий с монтажных поверхностей фундамента является обоснованным.

8.5. Анализ конструкции и модельное испытание монтажа дейдвудной трубы с использованием пластмассы

8.5.1. Общие замечания

Исследовательские работы, касающиеся монтажа дейдвудных труб гребных валов с использованием для этой цели специальных химотвердевающих пластмасс, начались уже в 1976 году в Щецинском политехническом институте. Результатом этих работ был новый способ монтажа этих элементов судов, который был внедрён в практику на польских верфях.

Монтаж первой дейдвудной трубы гребного вала был выполнен в 1979 году на верфи Устка (Польша) на судне B-410/12. С этого времени до конца 2013 года на разных судах было смонтировано всего 1637 дейдвудных труб и втулок гребных валов, а также втулок баллеров рулевых машин.

Проведенные до 1994 года исследовательские работы и внедрения относились к дейдвудным трубам гребных валов сравнительно малых диаметров, максимально до 510 мм. Приобретённый опыт и положительные результаты эксплуатации дейдвудных труб, установленных с использованием пластмассы, создали хорошую основу для применения этого же метода для монтажа дейдвудных труб большой длины и диаметра. Однако практическая реализация этого задания требовала проведения дополнительного анализа конструкции дейдвудных труб и проверки многих элементов способа их монтажа.

С этой целью была подготовлена программа модельных испытаний, максимально приближённых к реальным условиям работ, выполняемых на судне. Такие испытания были проведены в 1994 году фирмой Marine Service Jaroszewicz в сотрудничестве со Щецинским политехническим институтом и верфями в Щецине и в Гданьске. Подробное описание и результаты этих испытаний представлены в работе [144]. В сокращённом виде они представлены ниже.

8.5.2. Цель исследовательской работы

Целью работ были:

- проведение анализа термоизоляционных свойств слоя пластмассы в монтажной системе (сравнение с традиционным решением и формулировка возможных требований, касающихся охлаждения);
- проведение анализа термических деформаций рассматриваемой системы;
- доработка деталей способа монтажа больших дейдвудных труб с использованием пластмассы EPY и проверка их на модели.

8.5.3. Анализ термоизоляционных свойств системы со слоем пластмассы

Для проведения анализа термоизоляционных свойств системы втулки со слоем пластмассы EPY сначала потребовалось экспериментальное определение коэффициента теплопроводности этой пластмассы. Такие исследования были проведены на кафедре теплотехники Щецинского политехнического института [145]. Определённая при температуре 20°C величина коэффициента теплопроводности пластмассы была равна 48 Вт/мК.

Для сравнительного анализа теплопроводности в системе: дейдвудная труба корпуса судна—дейдвудная труба гребного вала со слоем пластмассы EPY была принята модель в виде трёх соосных втулок (рис. 8.23). Для этой модели были приняты граничные условия четвёртого рода, что означает идеальный стык соприкасающихся тел и одинаковые температуры обоих тел на поверхности стыка. В сравнительных анализах теплопроводности было принято линейное удельное термическое сопротивление стенки цилиндра в радиальном направлении, которое было вычислено из следующей зависимости:

$$r_{i\lambda w} = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \quad (8.5)$$

где:

d_i — диаметры на рис. 8.23 ($i = 1, 2, 3, 4$);

λ_i — соответствующий коэффициент теплопроводности.

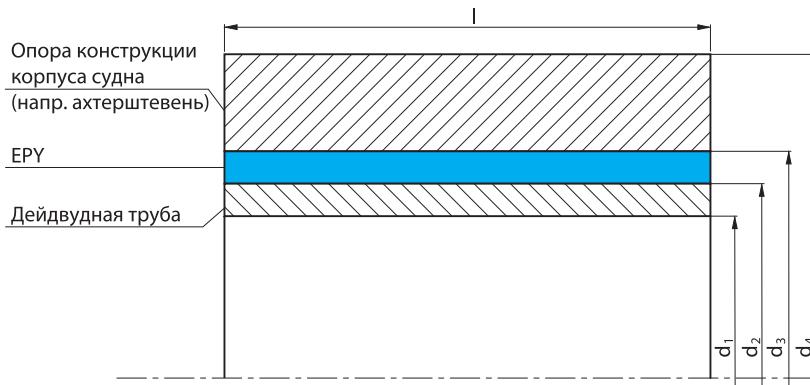


Рис. 8.23. Модель состава: конструкция корпуса судна — дейдвудная труба со слоем пластмассы EPY

Расчёты были проведены для трёх случаев:

1. Дейдвудная труба гребного вала установлена в пластмассе (как на рис. 8.23). Приняты следующие данные: $d_1 = 880$ мм, $d_2 = 960$ мм, $d_3 = 1000$ мм, $d_4 = 1550$ мм, $\lambda_1 = 0,48$ Вт/мК — для пластмассы EPY, $\lambda_2 = 58$ Вт/мК — для стали. Определённое по формуле (8.5) удельное термическое сопротивление $r_{i\lambda w} = 0,015$ мК/Вт.

2. Дейдвудная труба гребного вала соединена посадкой на натяг (стык металл—металл). Приняты следующие данные: $d_1 = 880$ мм, $d_2 = 960$ мм, $d_3 = 1000$ мм, $d_4 = 1550$ мм, $\lambda_s = 58$ Вт/мК — для стали. Удельное термическое сопротивление определено по формуле (8.5): $r_{i\lambda w} = 0,016$ мК/Вт.

3. Дейдвудная труба гребного вала соединена посадкой на натяг только на части длины, а на остальной части выступает слой воздуха толщиной 20 мм. Приняты следующие данные: $d_1 = 880$ мм, $d_2 = 960$ мм, $d_3 = 1000$ мм, $d_4 = 1550$ мм, $\lambda_s = 58$ Вт/мК — для стали, $\lambda_p = 0,026$ Вт/мК — для воздуха. Удельное термическое сопротивление определено по формуле (8.5) $r_{i\lambda w} = 0,025$ мК/Вт.

Выводы из расчётов:

1. Сопротивление проводимости тепла в радиальном направлении сквозь цилиндрическую стенку сталь—EPY приблизительно в 10 раз больше сопротивления проводимости тепла сквозь стенку сталь—сталь.

2. Сопротивление проводимости в случае наличия слоя воздуха в 16,7 раза больше, чем при использовании пластмассы.

8.5.4. Анализ термических деформаций

Сначала были определены экспериментальные величины коэффициента линейного термического расширения пластмассы EPY для разных диапазонов температуры. Измерения были проведены на трёх образцах согласно стандарту PN-82/C-89021 «Пластмассы». Подробные данные представлены в работе [146]. Средние величины этого коэффициента для разных диапазонов температур поданы в таблице 8.1.

Таблица 8.1. Величины коэффициента линейной термической расширяемости α_t для пластмассы EPY

$\alpha_t \text{ } ^{20}_{-50}$	$\alpha_t \text{ } ^{100}_{20}$	$\alpha_t \text{ } ^{150}_{100}$
$24,7 \cdot 10^{-6}, 1^{\circ}\text{C}^{-1}$	$40,4 \cdot 10^{-6}, 1^{\circ}\text{C}^{-1}$	$68,3 \cdot 10^{-6}, 1^{\circ}\text{C}^{-1}$

Расчёт термического удлинения дейдвудной трубы

Согласно указаниям технической литературы [147] при очень длинных дейдвудных трубах гребного вала следует предусмотреть возможность свободного перемещения одного их конца для обеспечения возможности свободного удлинения или сокращения при изменениях температуры.

Для расчёта максимального перемещения одного конца по отношению к другому при изменении температуры была принята упрощённая модель системы, как на рис. 8.24, а также данные, учитывающие неблагоприятную ситуацию.

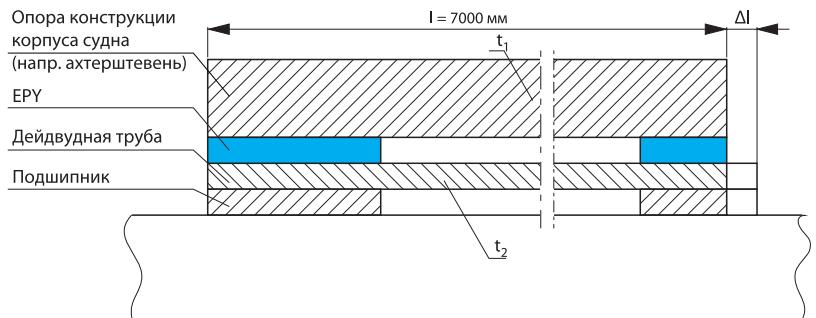


Рис. 8.24. Расчётная модель удлинения дейдвудной трубы

Удлинение дейдвудной трубы, вызванное повышением температуры, рассматривается по формуле:

$$\Delta l = \alpha_s l \Delta t \quad (8.6)$$

где:

α_s — коэффициент термической расширяемости стальной дейдвудной трубы,

l — длина дейдвудной трубы,

$\Delta t = (t_2 - t_1)$ — разница температур.

Приняты следующие данные: $\alpha_s = 12,5 \times 10^{-5} 1/\text{°C}$, $I = 7000 \text{ мм}$, $t_2 = 55\text{°C}$, $t_1 = -5\text{°C}$. Из расчётов по формуле (8.6) получено: $\Delta l = 5,25 \text{ мм}$.

Это удлинение дейдвудной трубы при полной свободе деформаций в экстремально неблагоприятных условиях. В действительности разница температур Δt обычно меньше и поэтому удлинение Δl также будет меньше.

В случае отсутствия возможности свободного перемещения крайних сечений дейдвудной трубы, в ней образовались бы продольные сжимающие напряжения:

$$\sigma_c = E_s \epsilon = E_s \Delta l / I = 2 \cdot 10^5 \cdot 5,25 / 7000 = 150 \text{ МПа} \quad (8.7)$$

где:

$E_s = 2 \times 10^5 \text{ МПа}$ — модуль Young'a для стали.

Изменение наружного диаметра ΔD дейдвудной трубы согласно предпосылкам, что $D = 1000 \text{ мм}$ и деформации являются свободными, равно:

$$\Delta D = \alpha_s D \Delta t = 12,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 60 = 0,75 \text{ мм}$$

Необходимо заметить, что рассчитанные величины термических удлинений Δl и ΔD вызваны только разницей температур $\Delta t = t_2 - t_1 = 60\text{°C}$ дейдвудной трубы вала и дейдвудной трубы корпуса и не зависят от того, проводится ли монтаж с использованием пластмассы или традиционным способом — без применения пластмассы. Этот факт указывает на то, что в случае использования пластмассы необходимо обеспечить возможность перемещения одного конца дейдвудной трубы в стыке с пластмассой.

В случае отсутствия свободы взаимных продольных и радиальных перемещений дейдвудной трубы и слоя пластмассы (рис. 8.25) напряжения выражаются формулами:

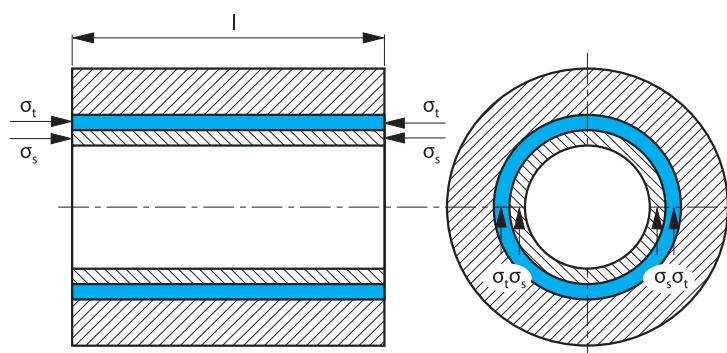


Рис. 8.25. Упрощённая модель для определения термических напряжений при отсутствии свободы продольных и радиальных перемещений

$$\begin{aligned}\sigma_t &= E_t \alpha_t (t_1 - t_2) \\ \sigma_s &= E_s \alpha_s (t_1 - t_2)\end{aligned}\quad (8.8)$$

где:

σ_t — напряжения в пластмассе,
 σ_s — напряжения в стальной дейдвудной трубе.

Для принятых граничных данных: $t_1 = -5^\circ\text{C}$ и $t_2 = +55^\circ\text{C}$ получаются в продольном и окружном направлении сжимающие напряжения:

$$\sigma_t = -11,9 \text{ МПа}, \sigma_s = -150 \text{ МПа}$$

В реальных условиях всегда имеются относительно небольшие величины разницы температур $\Delta t = (t_2 - t_1)$, а также некоторая ограниченная свобода деформаций и перемещений. В результате реальные величины термических напряжений обычно бывают меньше вышерассчитанных.

8.5.5. Модельные испытания монтажа дейдвудной трубы гребного вала

Целью этих испытаний была проверка возможности монтажа дейдвудных труб гребных валов больших диаметров (порядка 1 м) с использованием пластмассы EPY. Эти испытания были проведены на модели (рис. 8.26—8.28), изготовленной в механическом цеху Щецинской верфи.

Модель дейдвудной трубы гребного вала (рис. 8.27) была изготовлена из стальной трубы со швом. На одном её конце был приварен фланец. На внешней поверхности трубы были сделаны две продольные канавки шириной 16 мм и глубиной 14 мм, моделирующие смазочные каналы, а также один паз, моделирующий канал в подшипнике для датчика температуры масла. На дне смазочных канавок были просверлены наскоэз по три отверстия диаметром 10 мм. Смазочные канавки были прикрыты стальной полосой и уплотнены силиконом.

Модель корпусной втулки (внешняя труба рис. 8.28) была изготовлена из трёх стальных сваренных между собой сегментов. В этой трубе были сделаны: заливные отверстия, удаляющие воздух, и девять контрольных отверстий под винт 1,5" для заглушек, а также восемь отверстий с винтом M16 для регулирующих болтов (рис. 8.26). Внешняя труба была установлена на опоре (рис. 8.28) с наклоном $3^\circ 45'$, равным наклону реальной дейдвудной трубы стоящего на стапеле судна.

Носовое уплотнение было выполнено из полиуретановой пены и стального манжета (рис. 8.29). Внутренняя труба вместе с носовым уплотнением была вложена во внешнюю трубу при помощи подъёмного крана.

Основные данные:

- объём заливаемого пространства — $V = 118,7 \text{ дм}^3$;
- масса пластмассы EPY, необходимой для заливки пространства, $M = V \times \rho = 118,7 \text{ дм}^3 \times 1,59 \text{ кг/дм}^3 = 188,7 \text{ кг}$;
- температура окружающей среды 19°C ;

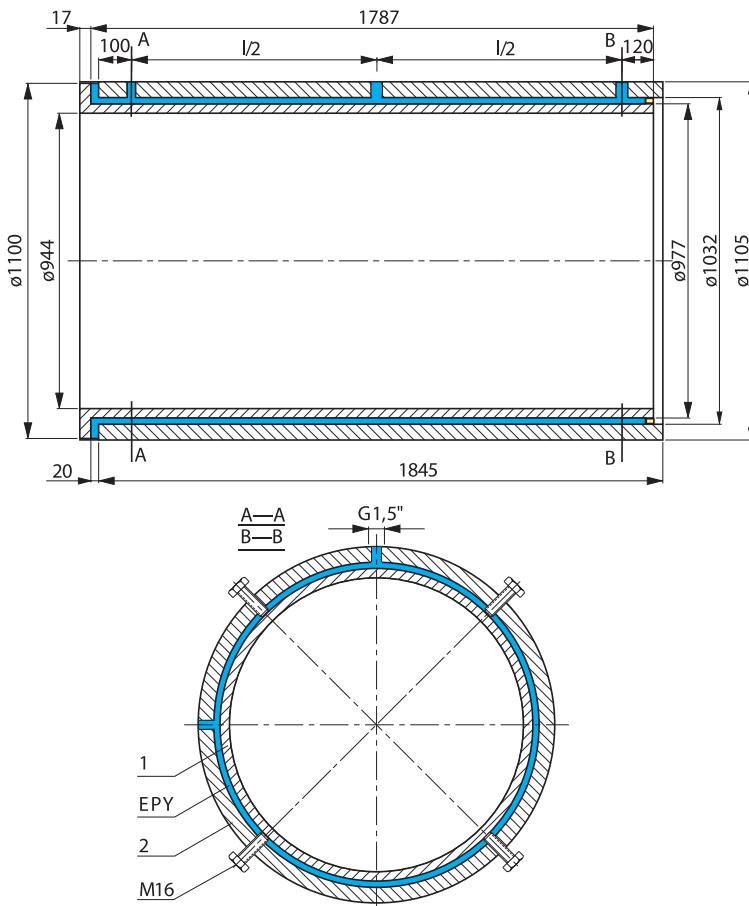


Рис. 8.26. Модель комплекта дейдвудной трубы (1) и опоры конструкции корпуса судна (2) вместе со слоем пластмассы EPY

- температура пластмассы перед смешиванием 28°C;
- температура пластмассы перед заливкой 36°C;
- время заливки порции пластмассы весом 12,6 кг через боковую вливную горловину (при щели 20 мм) около 1 минуты;
- масса литой пластмассы в первом этапе заливки пространства — $M_1 = 10 \times 12,6 \text{ кг} = 126 \text{ кг}$;
- время отверждения пластмассы,литой в первом этапе $t = 5$ часов;
- время заливки порции пластмассы весом 12,6 кг через верхнюю заливную горловину (при отверстии 5 мм) около 5 минут;
- масса пластмассы, влитой во втором этапе $M_2 = 5 \times 12,6 \text{ кг} = 63 \text{ кг}$;
- общая масса влитой пластмассы — $M = M_1 + M_2 = 126 + 63 = 189 \text{ кг}$.



Рис. 8.27. Модель дейдвудной трубы (подшипник – внутренняя втулка)



Рис. 8.28. Модель наружной (корпусной) опоры дейдвудной трубы



Рис. 8.29. Носовое уплотнение, изготовленное из полиуретановой пены и стального манжета (перед монтажом)



Рис. 8.30. Модель комплекта дейдвудной трубы и трубы корпусной опоры с установленными датчиками, предназначенными для измерения относительных перемещений соединяемых элементов

Кормовое уплотнение также было выполнено из полиуретановой пены и стального манжета. После монтажа труб и закладки кормового уплотнения были закреплены датчики (рис. 8.30) для измерения относительных перемещений этих труб во время заливки свободного пространства между ними и пластмассой

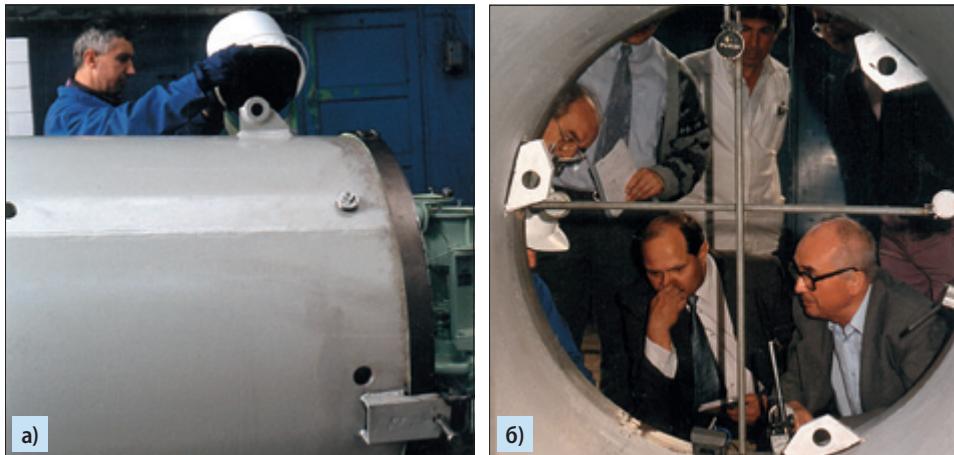


Рис. 8.31. Способ заливки модели пластмассой EPY (а) и считывания величин относительных перемещений соединяемых элементов (труб) (б)



Рис. 8.32. Финальный этап модельных испытаний монтажа дейдвудной трубы (на Щецинской верфи)

EPY и её отверждения. В заливные и переливные отверстия были вставлены соответствующие воронки. Способ заливки модели пластмассой EPY и регистрация относительных перемещений соединяемых труб иллюстрируют снимки (рис. 8.31).

Проведенные испытания, конечный этап которых показан на снимке (рис. 8.32), представили много существенной информации практического характера, а в особенности показали, что:

1. применение уплотнения заливного пространства вполне оправдалось как во время монтажа, так и во время заливки и отверждения пластмассы;
2. принятые решения закрыть смазочные каналы обеспечили непопадание в них пластмассы;
3. дейдвудную трубу (подшипник) гребного вала необходимо вкладывать соосно в корпусную втулку при помощи специальной оснастки, обеспечивающей её перемещение без повреждения носового уплотнения;
4. дейдвудную трубу (подшипник) гребного вала следует центровать при помощи регулировочных болтов таким образом, чтобы обеспечить её стабильное положение в радиальном и осевом направлениях;
5. заливное отверстие (диаметром около 40 мм) должно находиться в верхней части корпусной дейдвудной трубы, в месте максимальной толщины отливаемого слоя пластмассы, а переливное отверстие — в самом высоком месте заливаемого пространства;
6. дейдвудную трубу гребного вала необходимо заливать по меньшей мере в два этапа при температуре 20°C;
7. исследования в контрольных точках показали, что пластмасса полностью заполнила заливаемое пространство, также в местах наименьшей толщины слоя, равной 4 мм.

8.5.6. Окончательный вывод

Проведенные приблизительные расчёты, а также модельные испытания показали практическую возможность монтажа в условиях верфи дейдвудных труб (подшипников) гребного вала большого диаметра (порядка 1 метра) с использованием пластмассы EPY и дали много существенной информации, необходимой для разработки процесса монтажа на судах таких элементов подобной величины.

8.5.7. Эпилог

После завершения испытаний на Щецинской верфи модель системы дейдвудных труб (корпусной и гребного вала со слоем пластмассы) была перевезена в фирму Marine Service Jaroszewicz, где находилась под длительным воздействием атмосферных условий.

После семи лет наружная труба была разрезана и разобрана (рис.8.33) и тогда были определены:



Рис. 8.33. Модель состава дейдвудной трубы с её корпусной опорой (трубой) вместе со слоем пластмассы ЕРУ во время её демонтажа: а) разрезание наружной трубы; б) верхний фрагмент наружной трубы с видимым слоем пластмассы ЕРУ

- очень хорошее заполнение пластмассой всего заливного пространства между трубами;
- полная когезия и однородность залитой пластмассы;
- отсутствие коррозии на металлических поверхностях, соприкасающихся с пластмассой.

Это подтверждает хорошее прилегание к металлическим поверхностям. Адгезия пластмассы к металлическим поверхностям была меньше, чем её сопротивление растяжению, что в результате позволило отделить её большими листами от поверхности.

8.6. Исследование возможности использования микроволн для последующего отверждения пластмассы ЕРУ и отливаемых из неё фундаментных подкладок

8.6.1. Предварительные замечания

Основной проблемой при монтаже машин на фундаментных подкладках, литых на готово из пластмассы, является её надлежащее отверждение. При окружающей температуре ниже 10°C процесс отверждения пластмассы протекает очень медленно. Для сокращения времени и получения требуемых прочностных свойств применяется догрев подкладок с использованием наружных источников тепла. Чаще всего в район подкладок подводится горячий воздух от соответствующих нагревателей, причём нагревается весь участок фундамента и корпуса машины. Это трудоёмкий и энергоёмкий процесс.

Для устранения этих недостатков были предприняты исследования нового оригинального способа последующего отверждения подкладок при помощи микроволн. Целью этих исследований было изучение влияния микроволн на

прочностные свойства пластмассы ЕРУ при последующем отверждении, а также практические возможности использования микроволновой техники для последующего отверждения фундаментных подкладок, отлитых из пластмассы ЕРУ во время монтажа машин и устройств на судах. Подробное описание и результаты этих исследований содержатся в работах [148—151]. Ниже представлены только некоторые результаты этих исследований.

8.6.2. Испытания образцов из пластмассы

Экспериментальные исследования последующего отверждения пластмассы ЕРУ при помощи микроволн $f = 2,45$ ГГц были проведены на цилиндрических образцах ($\varnothing 20 \times 25$ мм), а также на моделях фундаментных подкладок натуральной величины. Испытания образцов послужили для сравнительных целей. Отверждение проходило различными способами (традиционным и при помощи микроволн), а затем образцы подвергались испытаниям на сжатие и ползучесть. Все образцы, использованные для испытаний, были отлиты из одной опытной партии жидкой пластмассы и отвердевались в течение 24 часов при температуре 23°C. Затем образцы были разделены на семь серий по 10 штук в каждой. Одну серию образцов оставили без дополнительного догрева, а четыре серии дополнительно подогревали в течение 24 часов в печи при температурах 60, 80 и 120°C. Следующие две серии были дополнительно отверждены в микроволновой печи мощностью 850 Вт, причём одну из них отверждали 2 минуты (непрерывно), а другую — четыре раза по 1 минуте с перерывами на 5 минут.

После охлаждения образцов (около 2 часов) часть из них была подвергнута испытанию на сжатие, а остальная часть — на ползучесть. Испытание на сжатие проводилось по стандарту ASTM на испытательной машине Instron (модель 850 1 Plus), а испытание на ползучесть — в специально предназначенной для этой цели крип-установке (рис. 7.31) при температуре 80°C и нагрузке $\sigma = 10$ МПа. Результаты этих исследований графически представлены на рис. 8.34 и 8.35.

Анализируя результаты исследований на сжатие и на ползучесть (рис. 8.34 и 8.35), можно констатировать следующее:

1. Нагрев пластмассы в печи в течение 2 часов вызывает увеличение её прочности, которое тем больше, чем выше температура нагрева образцов, а дальнейший нагрев при данной температуре в течение 2 часов не вызывает существенного увеличения прочности пластмассы.

2. Последующее отверждение образцов в микроволновой печи в течение 1—4 минут даёт подобный эффект, как и при нагреве в течение 2 часов в печи при соответственно высокой температуре. Существенным фактором, вызывающим увеличение прочности пластмассы, является её максимальная температура. В течение трёх минут температура образцов в микроволновой печи достигает 130—140°C. Чрезмерное продолжительное действие микроволн вызывает слишком большой рост температуры пластмассы и её разрушение.

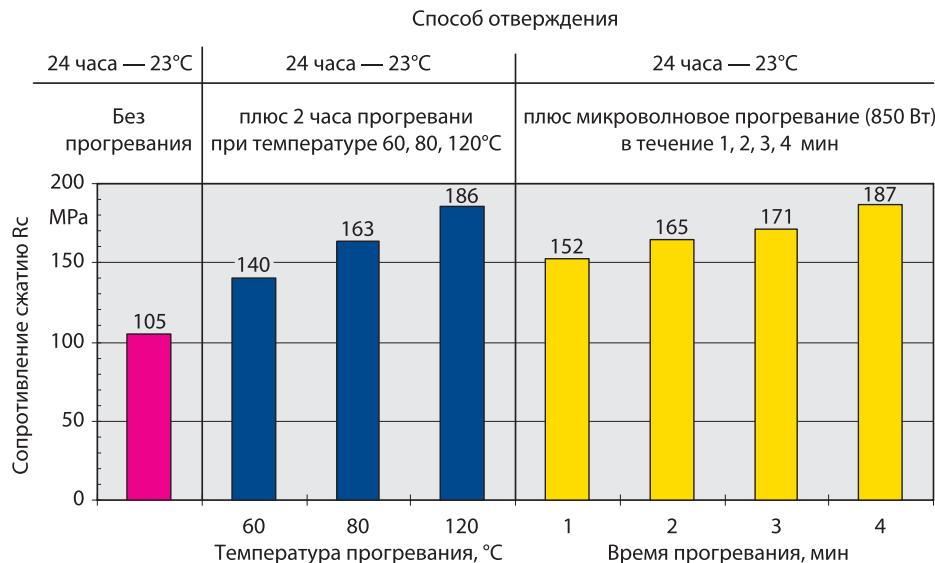


Рис. 8.34. Сопротивление сжатию образцов пластмассы ЕРУ, отверждённых разными способами (традиционным и микроволновым)

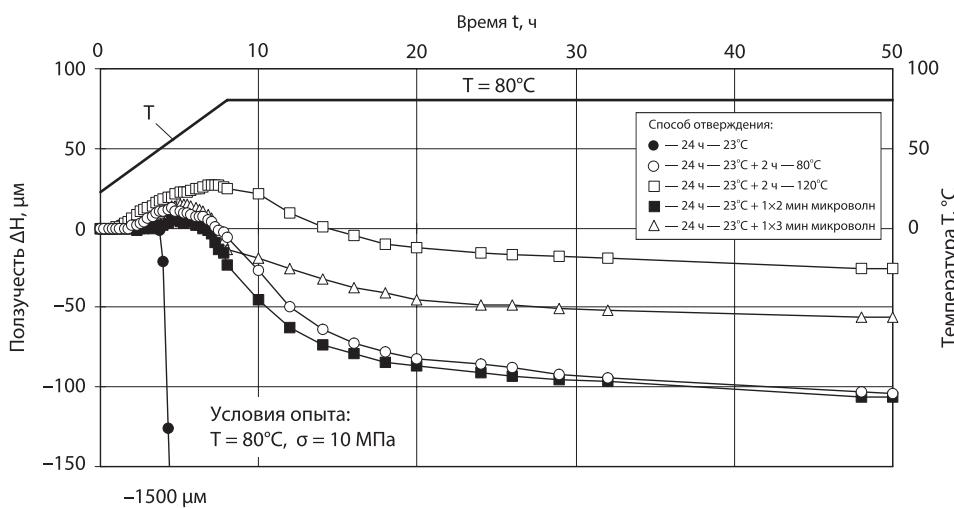


Рис. 8.35. Характеристика ползучести образцов пластмассы ЕРУ, отверждённых разными способами (традиционным и микроволновым)

3. Существуют определённые оптимальные условия (время и температура) последующего отверждения пластмассы, которые зависят от многих различных факторов.

8.6.3. Испытания моделей фундаментных подкладок

Положительные результаты исследований возможности применения микроволн для последующего отверждения образцов пластмассы так увлекли авторов, что они решили провести соответствующие испытания на моделях фундаментных подкладок натуральной величины. Для их последующего отверждения при помощи микроволн было построено специальное устройство, схематически представленное на рис. 8.36.

Исследования были проведены на осесимметрической модели подкладки, схематически представленной на рис. 8.37. Подкладку положили на стальной лист и прикрыли алюминиевой фольгой. Антенну, эмитирующую микроволны,

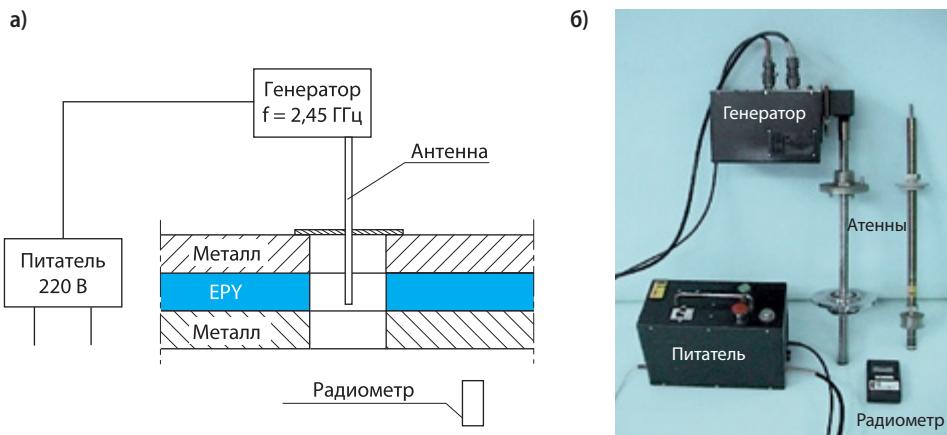


Рис. 8.36. Устройство для микроволнового дополнительного отверждения подкладок из пластмассы: а) схема; б) общий вид элементов устройства

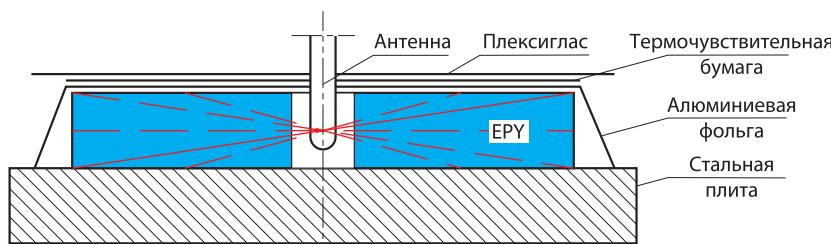


Рис. 8.37. Схема излучения микроволн в полость модели подкладки из пластмассы EPY

поместили в центре отверстия подкладки. Последующее отверждение подкладки проводилось 3 раза по 5 минут с перерывом около 5 минут. В перерывах контактным термометром измеряли температуру на верхней поверхности подкладки.

После окончания последующего отверждения и охлаждения подкладок были проведены испытания на сжатие 30 образцов $\varnothing 20 \times 25$ мм, взятых из разных мест подкладки (рис. 8.38). Результаты измерений температуры и испытаний на сжатие представляют графики на рис. 8.39.

Экспериментальные исследования проводились также на элементарной осесимметрической модели фундаментной подкладки (рис. 8.40), изготовленной в форме двух стальных плит толщиной 38 мм, имитирующих фундамент и основание двигателя. Между плитами была отлита подкладка из пластмассы ЕРУ толщиной 30 мм. Испытанию подверглись две подкладки. По периметру плит были установлены три датчика часового типа для измерения высоты подкладок во время испытания на сжатие на испытательной машине после микроволнового последующего отверждения.

На таблице 8.2 представлены циклы и результаты испытаний. Температура Т измерялась в точках 1, 2, и 3 (рис. 8.40а) после циклического микроволнового нагрева, а также проводилось измерение среднего изменения высоты ΔH подкладки под нагрузкой Р во время нагрева масла, окружающего подкладку, до температуры около 80°C . Такая нагрузка и увеличение температуры окружающей среды подкладки соответствуют реальным условиям во время пуска двигателя и во время его эксплуатации.

8.6.4. Важнейшие итоги исследований

1. Действие микроволн заключается — прежде всего — в подогреве пластмассы. Этот процесс проходит внутри пластмассы в полном её объёме и протекает очень быстро. В течение нескольких минут температура достигает около 100°C и пластмасса становится прочной на сжатие. Чрезмерно длительное действие микроволн вызывает перегрев и разрушение пластмассы.

2. Поглощение энергии микроволн менее отвердевшей пластмассы больше, чем более отвердевшей. Это означает, что более отвердевшая пластмасса является лучшим проводником этих волн, а количество поглощаемой ею энергии меньше. Эта проблема требует дальнейших исследований.

3. Экспериментальные исследования, проведенные на моделях фундаментных подкладок, дали положительные результаты. Они подтвердили возможность использования микроволн для последующего отверждения подкладок из пластмассы натуральной величины и пригодность устройства, запроектированного специально для этой цели.

4. Применение этого метода на практике и постройка устройства на судах требуют доработки деталей, безопасности труда и подбора оптимальных параметров

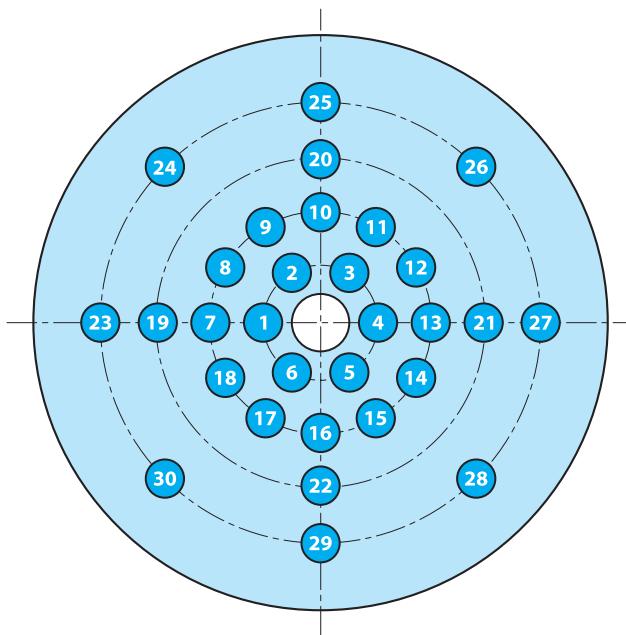


Рис. 8.38. Места отбора образцов из модели подкладки для испытаний

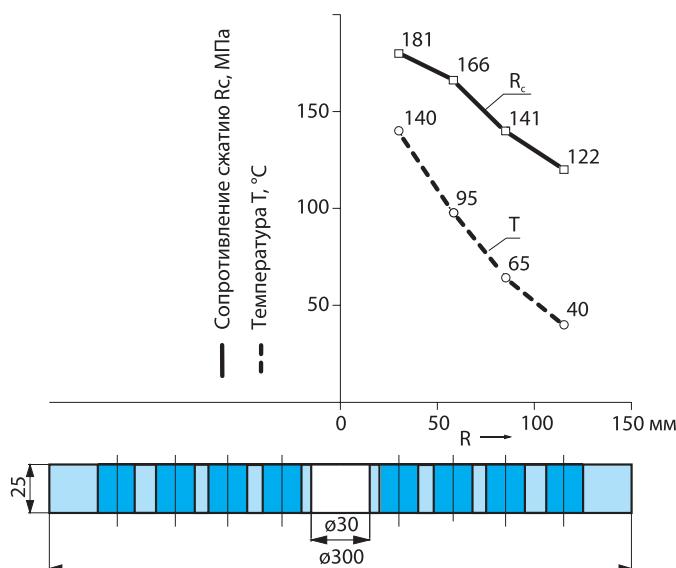


Рис. 8.39. Распределение максимальной температуры и сопротивления сжатию пластмассы EPY, дополнительно отверждённой микроволнами в модели фундаментной подкладки

Таблица 8.2. Ход и результаты исследований фундаментных подкладок

Ход исследований	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$
Отливка подкладки № 1	19	19	19
Гелеобразование 3 часа	36	36	36
Микроволновой нагрев 4 мин., 600 Вт	101	82	71
Перерыв нагрева 15 мин.	52	51	47
Микроволновой нагрев 4 мин., 600 Вт	68	69	65
Перерыв нагрева 15 мин.	50	48	48
Микроволновой нагрев 8 мин., 600 Вт	88	87	74
Нагрузка $P = 262,5 \text{ кН}$, 5 часов, $T_0 = 39—82^\circ\text{C}$		$\Delta H = -0,02 \text{ мм}$	
Отливка подкладки № 2	20	20	20
Гелеобразование 3 часа	36	36	36
Микроволновой нагрев 5 мин., 500 Вт	67	57	48
Перерыв нагрева 15 мин.	53	50	47
Микроволновой нагрев 5 мин., 500 Вт	65	64	58
Перерыв нагрева 15 мин.	55	55	55
Микроволновой нагрев 10 мин.	79	71	64
Нагрузка $P = 262,5 \text{ кН}$, 3 часа, $T_0 = 22—84^\circ\text{C}$		$\Delta H = -0,01 \text{ мм}$	

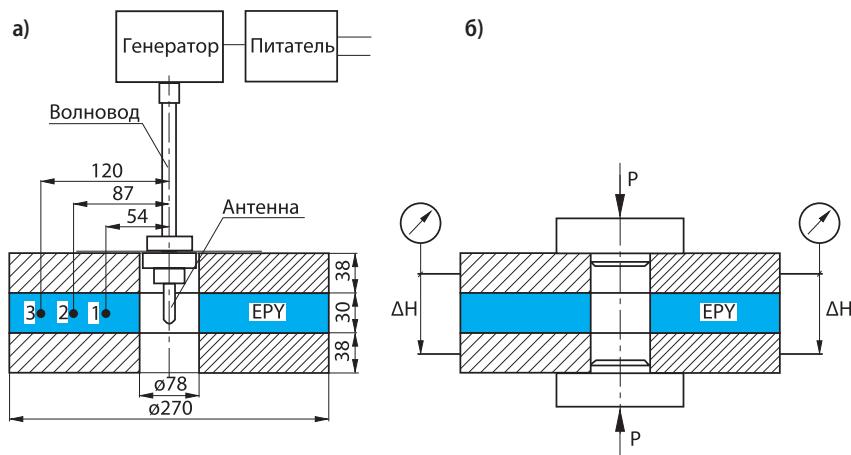


Рис. 8.40. Осесимметрическая модель фундаментного соединения с подкладкой, отлитой из пластмассы EPY: а) схема микроволнового дополнительного отверждения и обозначение точек измерения температуры (1, 2, 3); б) схема опыта сжатия и измерения изменения высоты подкладки

управления процессом микроволнового последующего отверждения подкладок (мощности, времени эмиссии микроволн и перерывов между ними).

5. Применение микроволнового последующего отверждения подкладок из пластмассы на судах может значительно сократить время монтажа машин и сэкономить энергию по сравнению с применяемым до сих пор термическим дополнительным отверждением этих подкладок.

8.7. Прочностные испытания анкеровки фундаментных болтов в бетоне с использованием пластмассы EPY

Преимущества метода анкеровки фундаментных болтов с использованием полимерных композиций особенно проявляются во время проведения ремонтных работ и модернизации установок, когда появляется необходимость замены разрушенных при эксплуатации машины болтов и посадки новых в местах, определённых изменениями конструкции (например фундаментной плиты).

Целью исследований, подробно описанных в работах [142, 153] и в сокращённом виде представленных ниже, была проверка на практике возможности использования пластмассы EPY для анкеровки фундаментных болтов в бетонных блоках.

Испытания предельной нагрузки анкеровок болтов в бетоне с использованием пластмассы EPY проводились на моделях (рис. 8.41), применяя для этой цели три вида болтов, форма и размеры которых представлены на рис. 8.41б, в, г.

Диаметры и глубина отверстий для болтов были равны: $D = 18 \text{ мм}$ и $L = 130 \text{ мм}$, а длина анкеровки $l_z = 125 \text{ мм}$. Болты вытягивали из бетона при помощи гидрав-

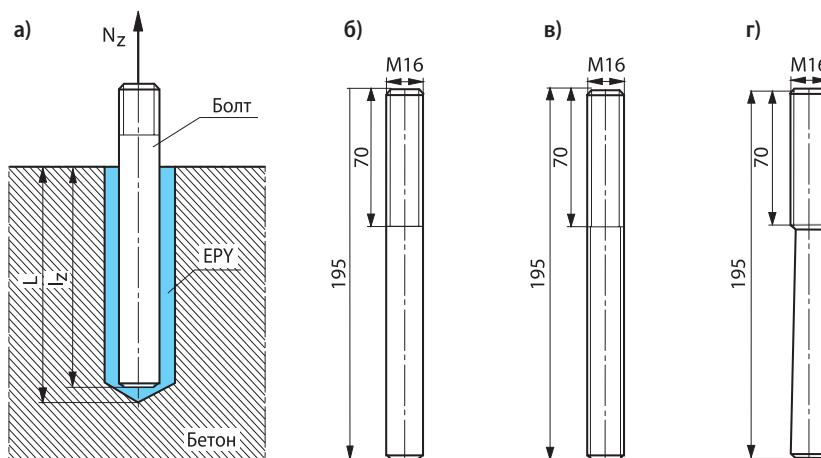


Рис. 8.41. Схема анкеровки болта в бетоне (а) и фундаментные болты с поверхностями, подготовленными для анкеровки, сформированными по-разному: с гладкой цилиндрической поверхностью (б), с винтовой резьбой (в), с конической поверхностью (г)

лического пресса. Средние величины измеренных сил N_z (предельных нагрузок анкеровки) в момент начала процесса разрушения анкеровок для болтов (рис. 8.41б, г) были равны: соответственно — 64, 57, 59 кН. Анализируя разницу между этими величинами, можно отметить, что она следует из натурального разброса и ошибок метода измерения, а не из влияния формы болта на длину анкеровки [152]. Форма болта по длине его анкеровки имеет большое влияние на ход процесса его разрушения, что будет показано ниже. Для сравнения необходимо добавить, что предельная нагрузка болта, непосредственно установленного в бетоне, рассчитанная на основании каталога фирмы Hilti [154], равна: $N_{zb} = 16$ кН.

Болты, установленные в бетоне с использованием пластмассы EPY, были также подвергнуты нагрузкам крутящим моментом до нарушения предела их прочности на кручение, наступившее при крутящих напряжениях $\tau_{sr} = 393$ МПа. При этом болты не были разрушены. Изломы болтов наступали за пределами их анкеровки.

Модель для испытания адгезии пластмассы или бетона к стальному стержню показана на рис. 8.42. Под понятием «адгезия» (прилипаемость) понимается сопротивление, которое оказывает установленный стержень при его вытягива-

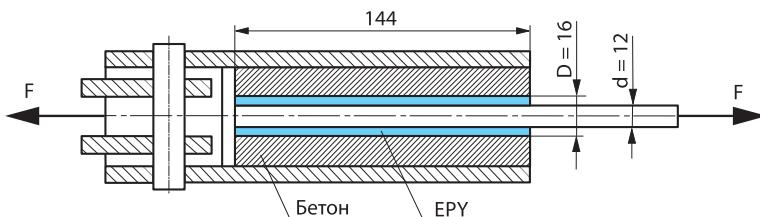


Рис. 8.42. Модель анкеровки болта с целью испытания его прилипания к пластмассе

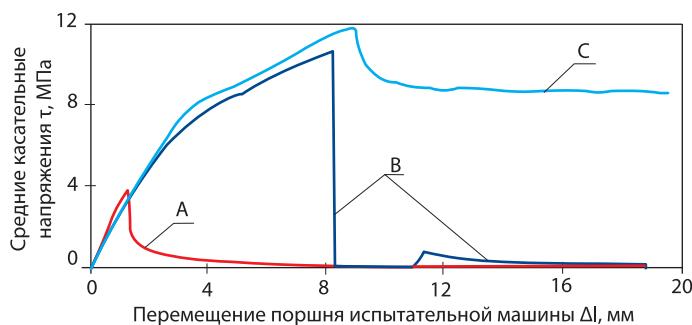


Рис. 8.43. Диаграммы выдергивания стержня из бетона (A) и из пластмассы (B и C)

нии [152]. Исследования проводились на испытательной машине Instron 8501 Plus. Примерные графики, показывающие ход и результаты исследований, представлены на рис. 8.42. Они соответствуют модели, для которой $D = 16$ мм, $d = 12$ мм, а $l_z = 144$ мм. Кривая А (рис. 8.43) относится к стержню цилиндрической формы по длине анкеровки, установленному непосредственно в бетоне, а кривые В и С — соответственно к стержням цилиндрической формы и в форме конуса (по длине анкеровки), установленным в пластмассе ЕРУ.

Для трёх видов анкеровок, взятых для сравнения, были расчитаны напряжения τ как отношение растягивающей силы F к площади срезываемого сечения A_τ . Касательные напряжения в случае стержней, находящихся в пластмассе, имеют подобные максимальные величины напряжений, определённых при вытягивании стержня, находящегося непосредственно в бетоне. В случае цилиндрических по форме стержней на части анкеровки разрушение соединений наступает внезапно (кривые А и В на рис. 8.43). Анкеровка стержня в форме конуса не теряет сразу всю свою предельную нагрузку (кривая С на рис. 8.43). Это предохраняет от серьёзных аварий.

Кроме экспериментальных исследований были проведены также численные расчёты методом конечных элементов (MES). Для расчётов были приняты данные, соответствующие экспериментальным исследованиям [152, 153]. Принято, что на стыках сталь—бетон, сталь—пластмасса и бетон—пластмасса выступает идеальная адгезия. Результаты расчётов в виде графиков представлены на рис. 8.44 и 8.45.

Касательное напряжение τ в слое пластмассы (или бетона при $h = 0$ мм), соприкасающейся с поверхностью анкера, уменьшается вместе с увеличением расстояния сечения пластмассы от поверхности бетона (рис. 8.44). Максимальные величины и интенсивность уменьшения напряжений зависят от толщины слоя пластмассы. Толщина слоя пластмассы имеет существенное влияние на максимальные касательные напряжения.

На рис. 8.45 представлена зависимость податливости анкерного болта от безразмерной его длины (l_z/d) и толщины слоя пластмассы. При определённой толщине пластмассы ($h = 2$ мм) податливость анкеровки, рассчитанная как отношение перемещения сечения анкерного болта, соприкасающегося с поверхностью бетона, к силе, вызывающей это перемещение, не зависит от длины анкеровки, если его длина l_z больше, чем $6d$ (рис. 8.45, кривая 1). При определённой длине анкеровки (например, $l_z = 256$ мм) податливость увеличивается с ростом толщины слоя пластмассы (рис. 8.45, кривая 2).

Проведенные исследования подтвердили хорошие прочностные свойства анкеровок фундаментных болтов в бетоне с использованием пластмассы ЕРУ. Предельная нагрузка таких анкеровок является в три раза большей, чем предельная нагрузка болтов, по традиции установленных непосредственно в бетоне.

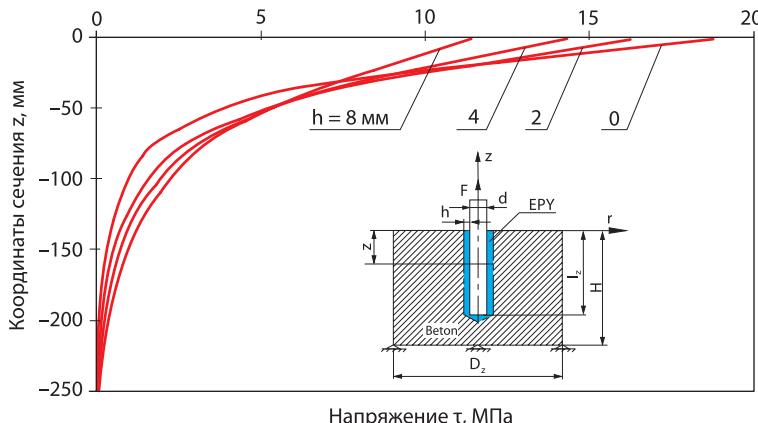


Рис. 8.44. Распределение касательных напряжений в поверхностном слое пластмассы, соприкасающейся с болтом, по длине его анкеровки

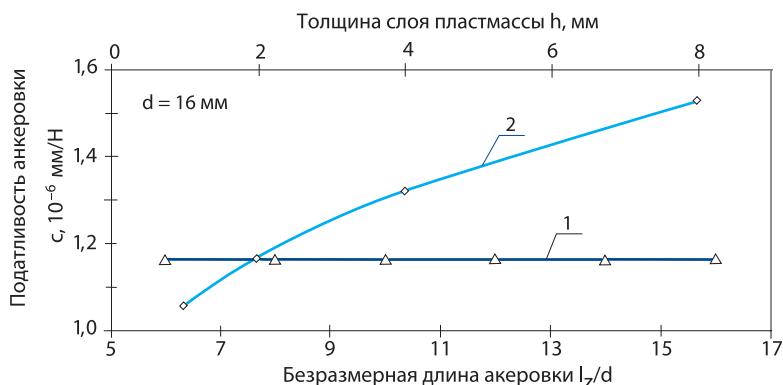


Рис. 8.45. Зависимость податливости анкеровки от её безразмерной длины (кривая 1) и толщины слоя пластмассы (кривая 2)

Оптимальной длиной анкеровки, учитывая предельную нагрузку, можно считать $I_z = 8d$. Форма болта по длине его анкеровки (гладкая цилиндрическая поверхность с винтовой канавкой, конусная поверхность) в некоторой небольшой степени влияет на предельную нагрузку анкерного устройства, однако влияет также на процесс его разрушения. Разрушение гладкой цилиндрической поверхности анкерного болта проходит резко и имеет хрупкий характер. Однако потеря предельной нагрузки анкеровки с конусной поверхностью проходит в течение некоторого времени и имеет «упруго-пластический» характер, что может быть некоторым предохранением от аварий.

8.8. Исследования адгезии пластмассы EPY к стержню фундаментного болта

8.8.1. Вступительные замечания

Во время ремонта железобетонных фундаментов и модернизации установок больших поршневых компрессоров, а в настоящее время также новых такого типа объектов, всё чаще применяются фундаментные болты, закреплённые в специально для этой цели созданных полимерных пластмассах (рис. 8.46а). Это имеет много существенных технических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с традиционным способом анкеровки фундаментов в бетоне.

При анкеровке фундаментных болтов существенную роль играет прилипание пластмассы к смолам и к бетону. Оно должно быть настолько большим, чтобы безопасно могло переносить без нарушения когезии статические и динамические нагрузки, действующие на данную систему.

Знание адгезии и факторов, от которых она зависит, имеет основное значение не только при проектировании и реализации фундаментных соединений, но и при моделировании и динамическом анализе установленных объектов, которые в современном понятии [105—111] должны считаться интегрированными системами, состоящими из машины, фундамента и крепящей системы.

Исследования адгезии, упомянутые в литературе [155], а также представленные в предыдущих собственных работах [152, 153], носили общий характер и касались прилипания бетона или пластмассы к стержням или к стержням стальных болтов со значительной длиной анкеровки.

Основной целью исследований, представленных в этом разделе, была разработка соответствующего метода и определение прилипания, относящегося к единице поверхности стыка пластмассы EPY со стержнем стального фундаментного болта, а также со стенками отверстия, сделанного в бетоне. Обстоятельные исследования в этой области были проведены в рамках исследовательского проекта [156]. В этой разработке были представлены только некоторые результаты этих исследований.

8.8.2. Исследования адгезии пластмассы к стержню стального фундаментного болта

8.8.2.1. Метод и образцы, принятые для исследований

Явление адгезии необходимо здесь понимать в общем смысле [155] как сопротивление, образующееся в слое стыка пластмассы или бетона со стальным стержнем, при попытке вырвать его из центра, в котором он был закреплён. Факторами, вызывающими явление прилипания, в общем, являются [155]:

- адгезия, т. е. молекулярное притяжение, появляющееся на стыке двух материалов;

- взаимное зацепление материалов, выступающих на соприкасающихся поверхностях;
- трение на стыке материалов;
- химическая связь материалов.

Несмотря на то, что проблеме прилипания бетона и пластмассы к стали было уделено много внимания, до настоящего времени нет соответственно разработанной теории, касающейся этой тематики. Не хватает также нормативных рекомендаций, определяющих метод исследований, и критериев качественной и количественной оценки полученных результатов исследований.

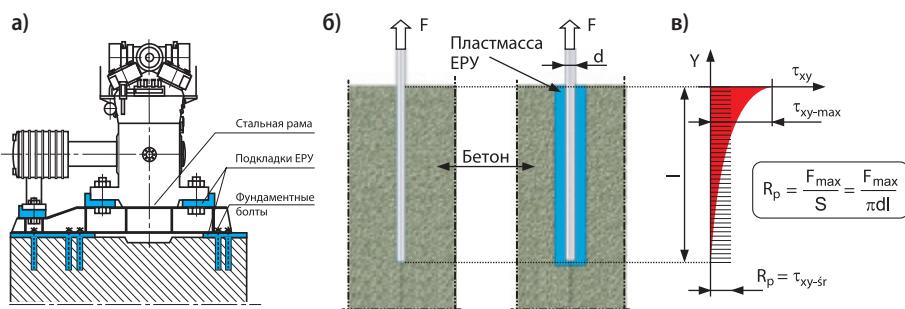


Рис. 8.46. Модернизированный монтаж мотокомпрессора (GMVH-12) с применением пластмассы ЕРУ (а), схема типичного способа испытания прилипания заанкерованного стержня (б), а также распределение касательных напряжений, выступающих при анкеровке (в)

Исследования прилипания бетона или пластмассы к арматурным стержням или к стержням фундаментных болтов обычно проводятся для определённой длины l их анкеровки (рис. 8.46б), причём эта длина подбирается так, чтобы не наступил их срыв [155]. В таких случаях, в исследуемой системе, на поверхности стыка двух материалов образуется очень неравномерное распределение касательных напряжений, схематически показанное на рис. 8.46в [157].

Мерой прилипания, называемой также напряжением прилипания [155], обычно считается предельная величина касательного напряжения R_p , полученная по формуле на рис. 8.46в, где F_{\max} означает силу, при которой наступило разрушение данного соединения, а S — площадь поверхности стыка стального элемента с данной средой.

Определённое таким образом прилипание R_p означает среднюю величину этого показателя, которая существенным образом зависит от длины l соединения. Она не отражает должным образом прилипания как физического явления, независимо от длины l, определяющего его реальное сопротивление сдвигу, относящееся к удельной поверхности стыка.

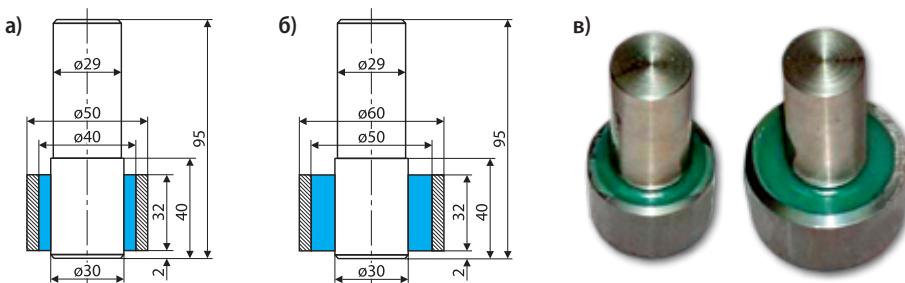


Рис. 8.47. Образцы, применённые для испытания прилипания пластмассы EPY к стальному стержню фундаментного болта: а) и б) схемы и размеры образцов; в) вид готовых образцов

Для определения реального (удельного) прилипания пластмассы EPY к стальному стержню фундаментного болта были проведены экспериментальные испытания образцов, представляющих собой некоторые небольшие отрезки этих соединений. Схема и основные размеры этих образцов представлены на рис. 8.47а и б, а их вид – на рис. 8.47в. Это осесимметрические образцы, состоящие из стержня и втулки, изготовленных из стали, а также находящегося между ними кольца, отлитого в этом месте из пластмассы EPY.

Принятый диаметр стержня ($\varnothing 30$ мм) равен диаметру фундаментных болтов поршневых компрессоров. Относительно небольшая длина соединения пластмассы со стержнем (32 мм) была здесь принята для того, чтобы получить приблизительно равномерное распределение касательных напряжений по длине стержня.

Исследуемые стержни были изготовлены из стали 45 путём точения и на контактной поверхности с пластмассой имели следующие параметры шероховатости: $R_a = 5,26—6,43 \mu\text{м}$, $R_z = 25,30—31,67 \mu\text{м}$. После надлежащей очистки и обезжикирования поверхности стержней, предназначенных для контакта с пластмассой, эти стержни были концентрически установлены внутри стальных втулок и залиты жидкой пластмассой EPY, перемешанной с отвердителем. Отвердение пластмассы проходило при комнатной температуре 22—23°C. Исследования прилипания были проведены через 5 суток после отверждения пластмассы.

8.8.2.2. Реализация и результаты испытаний образцов с гладкими стержнями

Испытания были проведены на испытательной машине Instron (модель 8850). Было принято, что нагрузочная сила на исследуемое соединение будет увеличиваться с постоянной скоростью перемещения головки испытательной машины $v = 1 \text{ мм/мин}$ (принятое при сжатии материалов) не только до разрушения исследуемого соединения, но и до полного выпадения стержня из пластмассы.

Схема и реализация вырывания стержня, осаженного в пластмассе на испытательной машине, представлены на рис. 8.48. Ход этих испытаний пока-

Исследования адгезии пластмассы EPY к стержню фундаментного болта

зывают примерные графики, представленные на рис. 8.49, а их результаты в таблице 8.3.

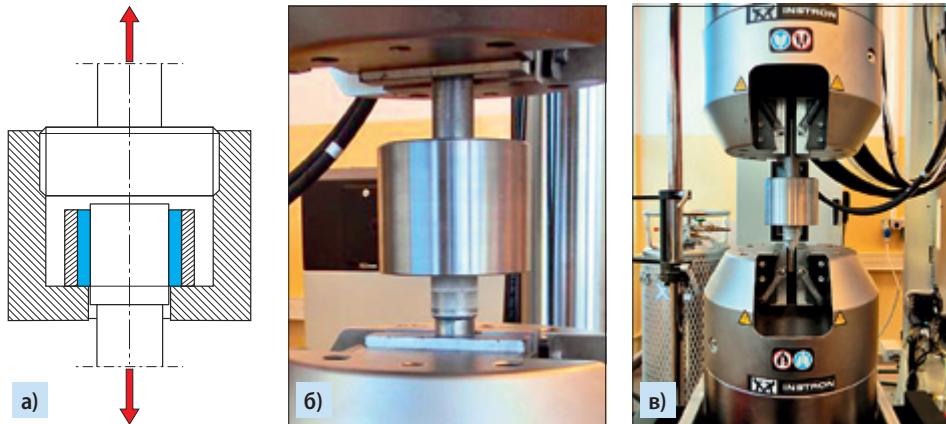


Рис. 8.48. Схема испытания выдёргивания стержня, осаженного в пластмассе (а), и его реализация на испытательной машине (б, в)

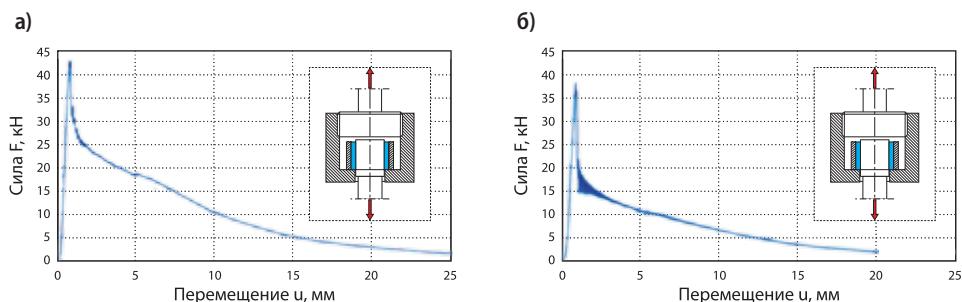


Рис. 8.49. Примеры диаграмм, представляющих способы выполнения и результаты испытаний выдёргиваний стержней, осаженных в пластмассе EPY; а) для образца Ø30/Ø40×32, б) для образца Ø30/Ø50×32

Таблица 8.3. Результаты исследований адгезии пластмассы EPY к стали, полученные в результате испытания выдёргивания стержня из пластмассы

Образцы Ø30/Ø40×32			Образцы Ø30/Ø50×32		
№ образца	F _{max} , кН	R _t , МПа	№ образца	F _{max} , кН	R _t , МПа
1	42,66	14,14	1	37,88	12,38
2	31,26	10,36	2	41,35	13,71
3	37,36	12,38	3	25,71	8,52
Средняя величина	37,09	12,29	Средняя величина	34,98	11,54

Анализируя полученные графики (рис. 8.49), можно отметить, что разрушение исследуемых соединений стального стержня с пластмассой является результатом действия касательных напряжений, выступающих при контакте этих двух материалов. Быстрое, равномерное, линейное увеличение нагрузки до её максимальной величины и внезапное её падение свидетельствуют о том, что разрушение соединения, вызванное касательными напряжениями, выступает практически одновременно на всей поверхностистыка стержня с пластмассой. После потери когезии стержня с пластмассой исследуемые соединения не теряют полностью несущей способности благодаря появлению в них довольно большого сопротивления трению. Когда сопротивление уменьшается, тогда стержень постепенно высовывается из пластмассы и трущиеся поверхности становятся гладкими.

Определённые количественные результаты этих исследований, собранные в таблице 8.3, содержат величины разрушающей силы F_{max} , а также силы прилипания R_p , рассчитанной по формуле на рис. 8.46в. Эти результаты характеризуются довольно большим разбросом. Для исследуемых образцов они могут сравниваться со слоем пластмассы толщиной 5 и 10 мм. Появляющиеся разницы укладываются в пределах разброса величин установленных параметров.

Определённые в исследованиях средние величины (в пределе 12 МПа), а также максимальные величины ($R_{pmax} = 15,67$ МПа) прилипания являются значительно меньшими, чем сопротивление сдвигу исследуемой пластмассы EPY, которой $R_t = 40—52$ МПа. Соответственно используя прочностные свойства этой пластмассы (больше чем бетона), можно значительно улучшить предельную нагрузку анкеровки фундаментных болтов в этой пластмассе путём соответствующего сформирования поверхностей их стержней.

Для проверки этих возможностей, очень важных с точки зрения инженерской практики, были запланированы и выполнены надлежащие экспериментальные исследования. Способ их реализации и полученные результаты представлены ниже (в следующем подпункте).

8.8.2.3. Исследования прилипания пластмассы к стержням с нарезанными канавками

Для добавочного предохранения от вырывания болта, заанкерованного в пластмассе, вместо часто применяемой (неудобной на практике) предохраняющей гайки, находящейся на нижнем конце стержня, можно соответственно сформировать боковую поверхность стержня таким образом, чтобы увеличить эффект прилипания и лучше использовать прочностные свойства пластмассы. В особенности это относится к сопротивлению пластмассы на сдвиг, которое является значительно большим, чем её прилипание к стали с относительно гладкой поверхностью. Такие технические приёмы часто применяются при арматурных стержнях, заливаемых бетоном, путём надлежащего обрефригирования их поверхности.

При фундаментных болтах легко можно этого добиться благодаря нарезке на поверхности стержней соответствующих канавок. Для проверки таких решений были проведены надлежащие экспериментальные исследования.

Для исследований были изготовлены 3 серии образцов по 3 штуки в каждой из них. Стержни этих образцов подверглись черновому (обдирочному) точению до размера Ø30 мм и на их контактной поверхности были нарезаны канавки в окружном направлении. Формы и размеры этих канавок, а также общий вид стержней с нарезанными канавками показан на рис. 8.50.

Подготовленные таким образом стержни после тщательной очистки и после обезжикивания их поверхностей, предназначенных для контакта с пластмассой, вместе со стальными втулками были поставлены на специальные стальные подставки, обеспечивающие им надлежащую центровку, и были залиты жидкой пластмассой ЕРУ, раньше перемешанной с отвердителем.

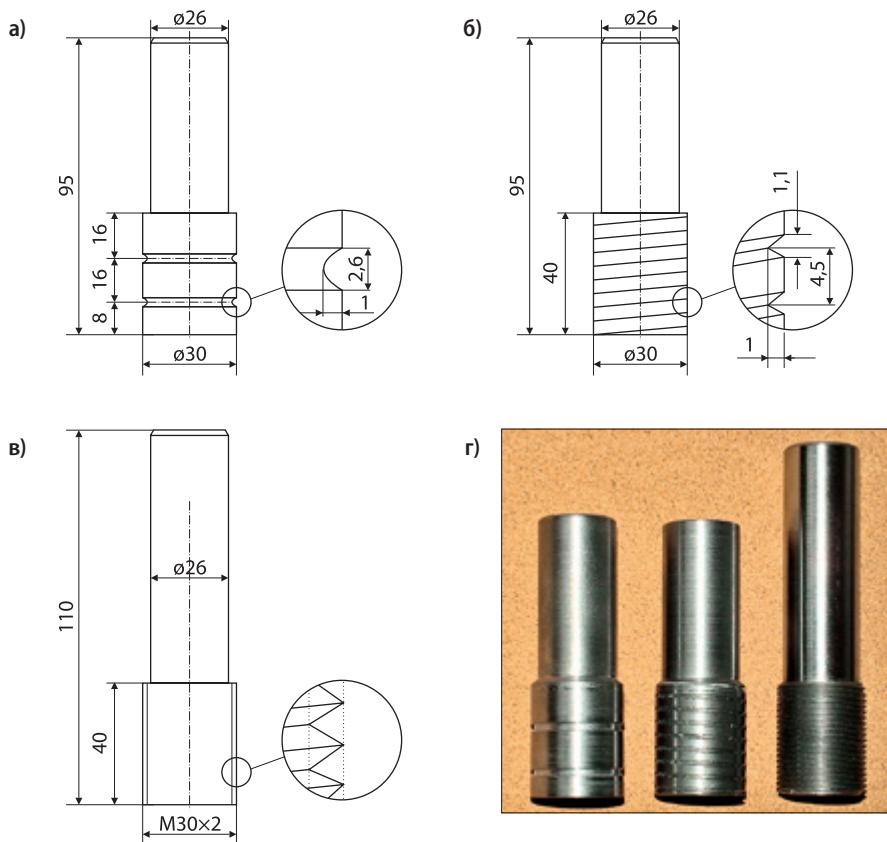


Рис. 8.50. Образцы стержней с нарезанными канавками, предназначенные для испытаний

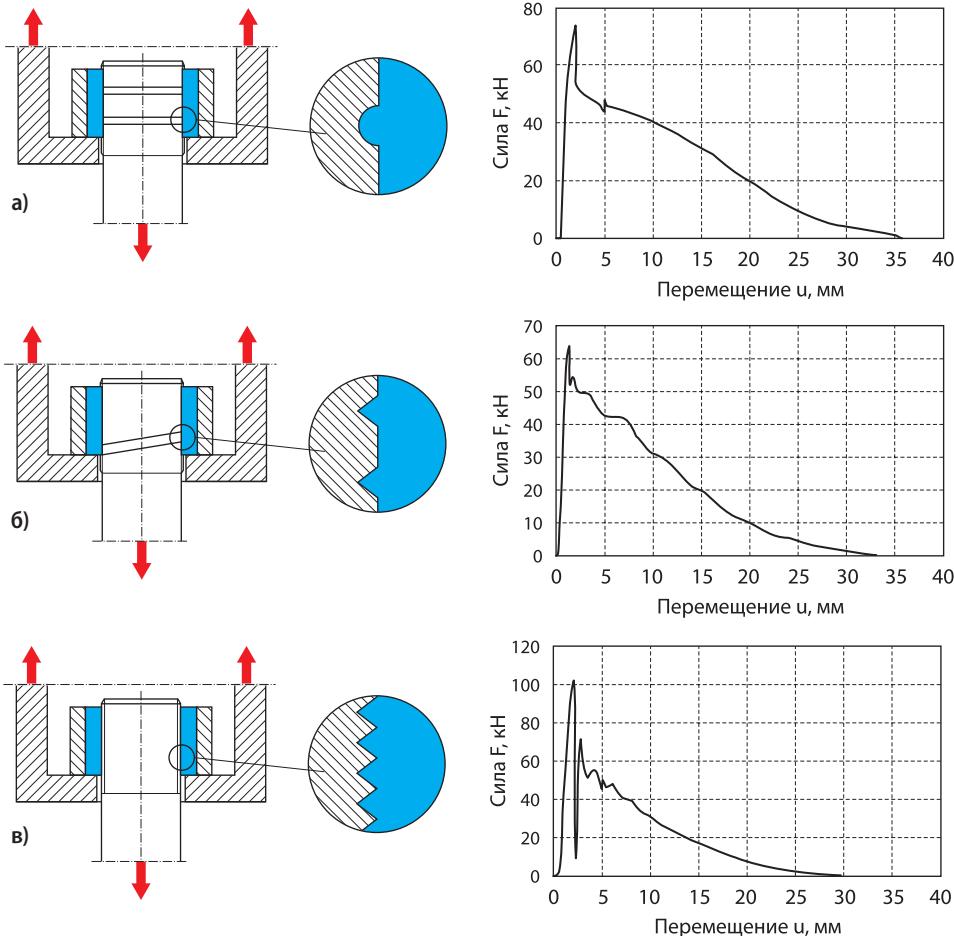


Рис. 8.51. Схемы и диаграммы результатов испытаний выдергивания из пластмассы EPY стальных стержней с разными нарезками

Таблица 8.4. Результаты исследований адгезии пластмассы EPY к стальным стержням с нарезками разных форм на их поверхностях

Стержни с двумя окружными канавками			Стержни с винтовой нарезкой			Стержни с нарезкой M30×2		
№ образца	F _{max} , кН	R _p , МПа	№ образца	F _{max} , кН	R _p , МПа	№ образца	F _{max} , кН	R _p , МПа
1	73,48	24,36	1	64,16	21,27	1	115,3	38,23
2	75,60	25,07	2	66,56	22,07	2	101,9	33,78
3	77,62	25,74	3	63,52	21,06	3	107,2	35,54
Средняя величина	75,57	25,06	Средняя величина	64,75	21,40	Средняя величина	108,1	35,85

После отверждения пластмассы при комнатной температуре (22—23°C) в течение 5 суток стержни, закреплённые в пластмассе, подверглись испытанию вырывания из неё. Схема такого испытания и практическая его реализация показаны выше на рис. 8.48.

Ход отдельных испытаний в виде примерных графиков, полученных на испытательной машине, представлен на рис. 8.51, а численные результаты — в таблице 8.4.

Анализируя отдельные графики, представленные на рис. 8.51, показывающие ход испытаний вырывания каждого стержня из пластмассы, можно в общих чертах заметить их большое качественное сходство. Оно основывается на быстрым увеличении нагрузки и резком ходе разрушения соединения, а также на сохранении значительной предельной нагрузки, исходящей из относительно больших сопротивлений трению. Решающими для разрушения соединения являются касательные напряжения, выступающие на номинальной цилиндрической контактной поверхности стержня с пластмассой. Выступающие затем сопротивления трению уменьшаются, что связано с постепенным выдвижением стержня из пластмассы, а также со сглаживанием трущихся поверхностей.

Количественные результаты отдельных испытаний, содержащие разрушающие силы F_{max} , а также сопротивление прилипанию R_p , определённые по формуле на рис. 8.46в, сопоставлены в таблице 8.4. В проведенных исследованиях номинальная поверхностьстыка стержня с пластмассой $S_n = \pi \times 30 \times 30 = 3014,4 \text{ мм}^2$. Поверхность среза в образцах с двумя кольцевыми канавками равна: $S_1 = \pi \times 30 \times 2,6 \times 2 = 489,8 \text{ мм}^2$, что составляет 16,25% номинальной поверхности стыка; в образцах с винтовой канавкой $S_2 \approx 7\pi \times 1,1 \times 30 = 725,34 \text{ мм}^2$, что составляет 24,06% номинальной поверхности, а в образцах с нарезной резьбой — практически 100% номинальной поверхности стыка. Образцы с небольшой отдельной винтовой канавкой, несмотря на большое отношение сдвинутой поверхности ко всей контактной поверхности (составляющее 24,06%), имели меньшее сопротивление, чем образцы с двумя кольцевыми канавками с поверхностью сдвига, составляющей 16,25% всей контактной поверхности.

8.8.2.4. Сравнение результатов исследований прилипания пластмассы к гладким стержням и к стержням с нарезанными канавками

На рис. 8.52 представлены результаты всех исследований прилипания гладких стержней и с нарезанными на их поверхности канавками. Сравнивая результаты исследований для отдельных видов образцов (рис. 8.52), можно определить очень большие количественные разницы. Они показывают отчётливо предполагаемое выгодное влияние наличия канавок на поверхности стержня на силы сопротивления при их вырывании из пластмассы. Относя прочность соединений образцов с нарезанными канавками к прочности соединений образцов с гладкими точёными стержнями, получены показатели (средних) увеличений от 174,6 до 291,5%. Самый большой, почти трёхкратный рост прочности, получен для стержней

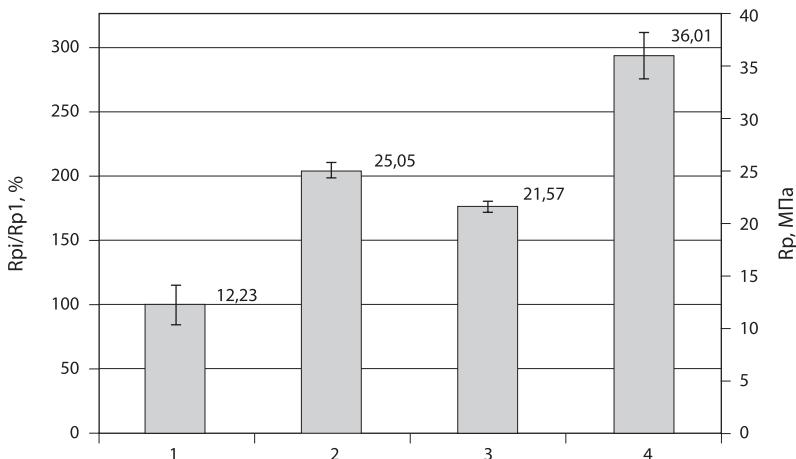


Рис. 8.52. Сравнение прилипаемости R_p пластмассы EPY к осаженным в ней точёным стальным стержням, гладким и с канавками, нарезанными на их поверхностях: 1 — точёный гладкий стержень; 2 — стержень с двумя канавками, нарезанными по окружности; 3 — стержень со спиральной нарезкой; 4 — стержень с винтовой нарезкой (M30×2)

с нарезанным винтом. Эти увеличения вызваны большей сопротивляемостью пластмассы сдвигу, чем её адгезионным прилипанием к стальному гладкому стержню. Пластмасса, заполняющая канавки и выступающая на поверхности стержней, образует некоторые зацепки (шипы), увеличивающие сопротивление при их вырывании. Чтобы стержень мог высунуться из пластмассы, его выступы, заполняющие эти канавки, должны быть срезаны высовывающимся стержнем. Чем больше отношение поверхности сдвига к номинальной (цилиндрической) поверхности контакта пластмассы со стержнем, тем больше прочность данного соединения. Однако это не показывает простую пропорциональную зависимость. Некоторое влияние на это имеет также форма, величина и расположение канавки.

В этом месте стоит обратить внимание на значительно меньшие относительные разбросы результатов исследований (рис. 8.52), полученных для стержней с нарезанными канавками, по отношению к стержням с гладкой точёной поверхностью.

8.8.3. Исследования прилипания пластмассы к бетону

8.8.3.1. Образцы, подготовленные для исследований

Исследования прилипания пластмассы EPY к бетону были проведены на образцах, представленных на рис. 8.53. Они являются небольшими отрезками стержня фундаментного болта, установленного в бетонном блоке и анкерно закреплённого с использованием пластмассы (рис. 8.46). Эти образцы создают осесимметрическую систему элементов, изготовленных из стали, бетона и пластмассы, находящихся в плотном контакте друг с другом. Длина I этого отрезка была

принята очень малой, равняющейся диаметру стержня болта, для получения хорошего равномерного распределения касательных напряжений при контакте пластмассы с бетоном.

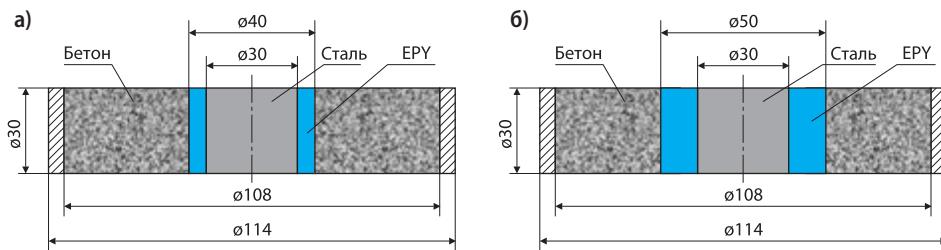


Рис. 8.53. Образцы для испытания прилипания пластмассы EPY к бетону

При изготовлении этих образцов необходимо было создать некоторое сходство с условиями, выступающими в реальных системах. Сначала были приготовлены надлежащие формы для отливки колец из бетона. Они состояли из стальных колец ($\varnothing 108/\varnothing 114 \times 30$ мм), а также отрезков пластмассовой трубы с внешним диаметром 40 мм и 50 мм. Были изготовлены 3 формы для каждого диаметра. Эти формы были уплотнены и наполнены цементным раствором. Через несколько часов, когда бетон стал жёстким, удалили пластмассовые трубы, не нарушая связность (когезию) бетона.

Упрочнение бетона проходило под прикрытием мокрой тряпкой (много-кратно увлажнённой) и фольгой, и длилось практически около двух месяцев. Одновременно был отлит цилиндрический образец ($\varnothing 59 \times 67$ мм) тем же самым бетонным раствором для проверки прочности бетона на сжатие. Испытание на сжатие бетона дало следующий результат: $R_c = 27,58$ МПа.

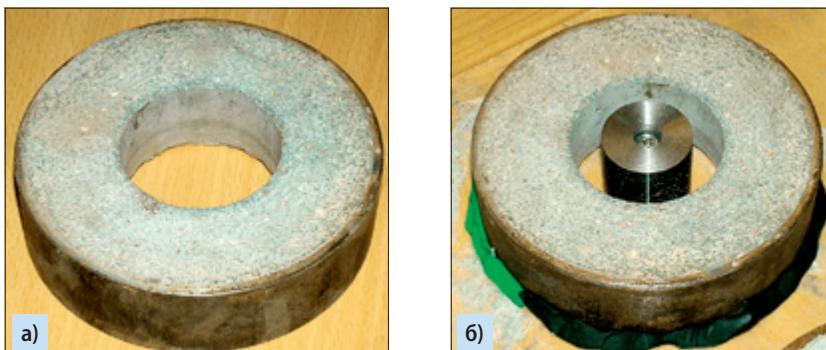


Рис. 8.54. Отвердевший бетонный „кружок“ (а) и со стальным элементом в середине (б), готовый для заливки его пластмассой

После придания жёсткости бетонным кружкам в их отверстия были вставлены стальные цилиндры Ø30×30 мм, являющиеся сегментами стержней фундаментных болтов (рис. 8.54). Затем пространство между стальным цилиндром и бетоном было залито жидкой пластмассой ЕРУ, перемешанной с отвердителем. Всего было изготовлено 6 таких образцов, в том числе: 3 с пластмассовым кольцом толщиной 5 мм и 3 с пластмассовым кольцом толщиной 10 мм. Заливка образцов пластмассой и её отверждение проходили при комнатной температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$. Время отверждения пластмассы равнялось 72 часа (при требуемом минимальном — 24 часа).

8.8.3.2. Реализация и результаты испытаний

Исследования прилипания пластмассы к бетону были проведены на испытательной машине Instron 8850 с использованием для этой цели соответствующего программного обеспечения, управляемого компьютером. Это давало гарантию выполнения всех исследований одинаковым способом. Схема и способ реализации этих исследований на практике показаны на рис. 8.55. Принимая во внимание практические соображения, был применён метод выталкивания пластмассы из бетона при помощи стального штемпеля. Для достаточно коротких соединений этот метод является эквивалентным методу вытягивания, что было доказано в вышеупомянутых исследованиях [157].

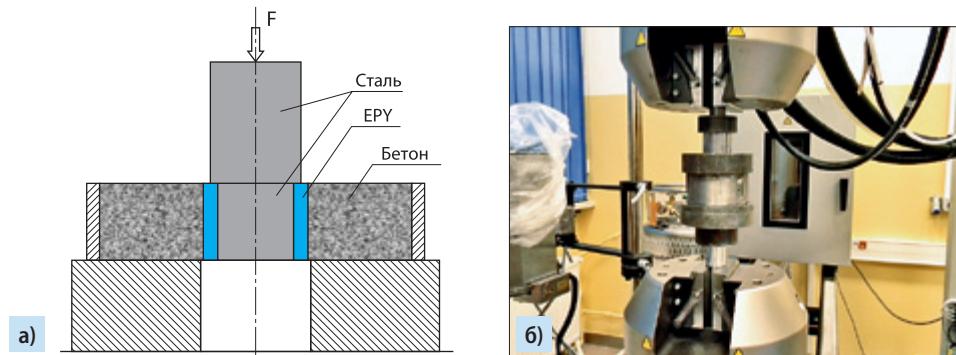


Рис. 8.55. Схема (а) и реализация испытаний на испытательной машине (б)

Диаметр штемпеля был подобран таким образом, чтобы получить равномерное размещение касательных напряжений при контакте пластмассы с бетоном. Для этой цели были проведены надлежащие численные расчёты при помощи MES.

Разрушающую величину касательных напряжений, в этом случае определяющую прилипание пластмассы к бетону, обозначенную R_p , вычислили по формуле на рис. 8.46, где: F_{\max} — означает максимальную силу нагрузки, разрушающую данное соединение; $S = \pi d l$ — площадь контактной поверхности пластмассы с бетоном, на которой наступает сдвиг.

Окончательно исследования прилипания пластмассы EPY к бетону были проведены с использованием стального штемпеля диаметром 36 мм для образцов Ø30/40×30 мм, а также штемпеля диаметром 46 мм для образцов Ø30/Ø50×30 мм. Размещение касательных напряжений по всей длине соединения в случае применения штемпеля диаметром 36 мм показано на рис. 8.56. Приблизительно оно является равномерным по всей длине контакта пластмассы с бетоном.

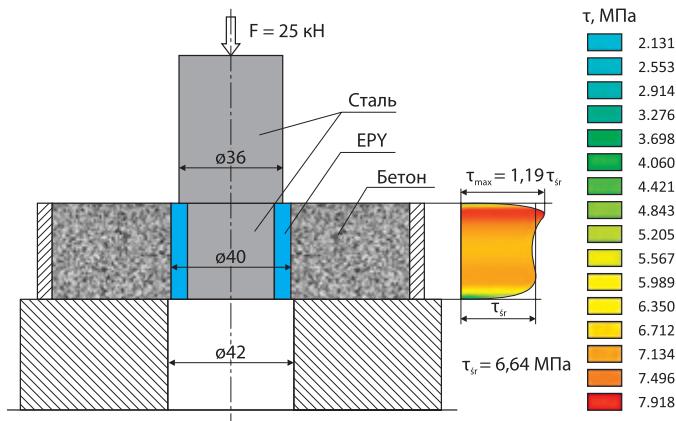


Рис. 8.56. Распределение касательных напряжений по длине стыка пластмассы с бетоном для штемпелей диаметром 36 мм

Исследования были проведены не только до конца предельной нагрузки данного соединения и его разрушения, но и до полного выдвижения пластмассы из бетона. Каждое испытание было выполнено при двух скоростях перемещения поршня испытательной машины: сначала в течение 5 минут со скоростью $v = 1$ мм/мин, а затем в течение 3 минут со скоростью $v = 10$ мм/мин. Переключение скорости наступало автоматически во время проведения испытания. Скорость $v = 1$ мм/мин была принята при стандартных испытаниях на сжатие материалов. Затем после разрушения соединений скорость была увеличена для

Таблица 8.5. Количественные результаты исследований адгезии пластмассы EPY к бетону

Образец Ø30/Ø40×30			Образец Ø30/Ø50×30		
№ образца	F_{max} , кН	R_p , МПа	№ образца	F_{max} , кН	R_p , МПа
1	102,26	27,12	1	113,94	24,18
2	94,73	25,13	2	128,32	27,23
3	85,83	22,77	3	125,17	26,56
Средняя величина	94,27	25,00	Средняя величина	122,48	25,99

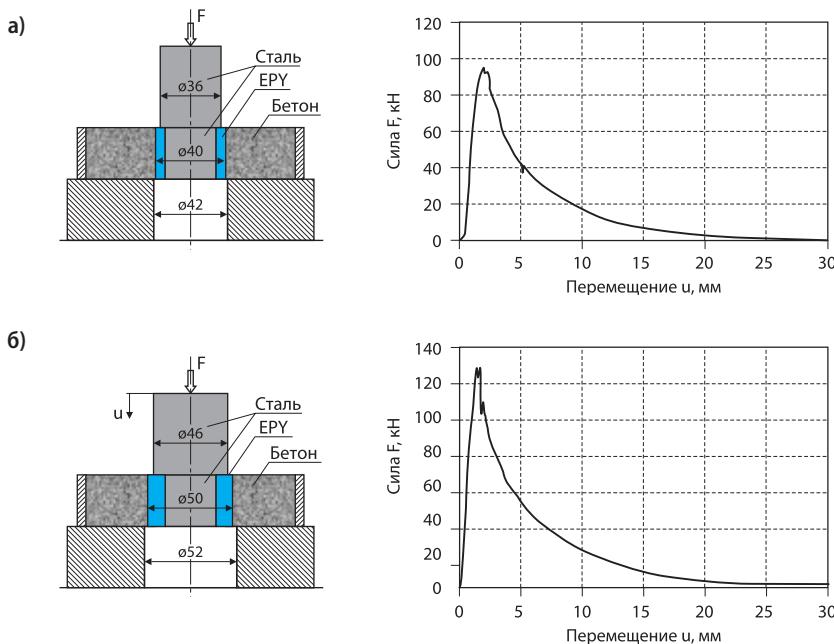


Рис. 8.57. Схема и результаты испытаний прилипания пластмассы EPY к бетону: а) для образца Ø30/Ø40 × 30, б) для образца Ø30/Ø50×30

сокращения времени разделения соединенных друг с другом элементов. Ход этих испытаний показывают примерные графики, представленные на рис. 8.57, а их численные результаты поданы в таблице 8.5. В ней содержатся величины разрушающей отдельные образцы силы F_{max} и прилипания R_p , вычисленного по формуле на рис. 8.4б.

8.8.3.3. Анализ полученных результатов исследований

Анализируя полученные результаты исследований, можно в общих чертах определить, что разрушение исследуемых контактных соединений пластмассы с бетоном является результатом действия касательных напряжений, выступающих при контакте соединенных друг с другом материалов.

Быстрое и приблизительно линейное увеличение нагрузки до её максимальной величины и затем резкое её уменьшение свидетельствуют о том, что разрушение соединения наступает очень быстро и на всей поверхности стыка пластмассы с бетоном. После потери связности (когезии) пластмассы с бетоном эти соединения не теряют всей несущей способности сопротивления нагрузке благодаря появлению в них больших сопротивлений трению. Эти сопротивления не уменьшаются, что связано с постепенным выдвижением пластмассы из бетона, а также сглаживанием трущихся поверхностей.



Рис. 8.58. Вид образцов после испытаний

Вид образца после его разрушения показан на рис. 8.58. Соединённые друг с другом элементы, как бетон, так и пластмасса, во время испытания и после него сохраняют свою связность (когезию). Разрушение соединения пластмассы с бетоном, являющееся результатом действия касательных напряжений, всегда чётко выступало со стороны бетона. Об этом свидетельствует тонкий слой бетона, прилипнувший к пластмассе, а также отсутствие пластмассы на поверхности отверстия в бетоне. Можно предположить, что для лучшего класса бетона можно получить большую величину прилипания. Однако этот вопрос требует соответствующих экспериментальных исследований.

Полученные средние величины разрушающей силы F_{max} зависят от диаметра отверстия в бетоне и являются пропорциональными площади S его поверхности. Рассчитанные средние величины прилипания R_p равны 25,00, а также 25,99 МПа и практически являются такими же самыми для соединений с малой и большой толщиной слоя пластмассы, равной 5 и 10 мм. Появляющиеся разницы укладываются в пределы разброса.

8.9. Экспериментальные исследования моделей фундаментных подкладок, изготовленных из стали и пластмассы EPY

8.9.1. Общие замечания

Фундаментные болтовые соединения тяжёлых машин и устройств по своим структурным и материальным свойствам относятся к механическим системам. В классической классификации [158], а также по правилам классификационных обществ, ведущих надзор за постройкой морских судов [97], эти соединения относятся к категории **жестких конструкционных соединений** (в отличие от **эластичных соединений**). Это относится не только к фундаментным болтовым соединениям с традиционными стальными подкладками, но и к современным с подкладками, литыми из специальных полимерных пластмасс. Такая классификация является часто условной. Она упрощает реальность и затруд-

няет надлежащее понимание и решение современных научных и технических проблем, касающихся монтажа тяжёлых машин и устройств на фундаментах. Это особенно относится к машинам и устройствам, генерирующими большие динамические силы и вибрации.

В реальных системах, крепящих машины и устройства к фундаментам, как к стальным, так и к бетонным, выступают сложные деформационные, вибрационные и прочностные явления, а также явления трения, которые — как оказывается на практике — очень часто имеют значительное влияние не только на надёжность и прочность самих креплений, но и на поведение всей системы, которую создают машина, фундамент и крепящая система.

Имея в виду сложность оговоренных явлений, крепящая система должна восприниматься и анализироваться как некоторая механическая система деформаций, состоящая из многочисленных разных взаимодействующих элементов. Достоверным представителем этой системы является единичное болтовое соединение, крепящее основу машины к фундаменту. Важную роль в этом соединении играет фундаментная подкладка, которая является интегральной частью соединяемых элементов. Вместе с крепящим болтом они создают сложный конструкционный узел с определёнными прочностными и динамическими свойствами, которые зависят от многочисленных различных факторов. Из исследований следует, что в таких сложных структурах существенное влияние на их поведение под нагрузкой имеют не только геометрические и материальные свойства их составных элементов, но и в большой степени конкретные явления, выступающие в их соединениях. Очень часто именно они решают о прочности, надёжности, долговечности и динамике не только данного конструкционного узла, но и в большой степени всей системы, в которой он находится.

Для надлежащего понимания и решения современных проблем прочности, динамики и надёжности фундаментных болтовых соединений необходимо обязательно ознакомиться с выступающими в них физическими явлениями. Приобретение этих знаний требует проведения надлежащих экспериментальных исследований. Такие исследования были запланированы и проведены в рамках специального исследовательского проекта, финансированного Министерством науки и высшего образования Польши. Подробное описание и результаты этих исследований были представлены в отчёте о реализации этого проекта. В этой работе были представлены только некоторые результаты исследований.

Основной целью этих исследований было определение характеристик нормальных деформаций фундаментной подкладки, поддаваемой сжатию между двумя плоскими металлическими поверхностями с учётом не только деформаций материала подкладки (что обычно делается при моделировании и расчётах), но и контактных деформаций, выступающих в контактных соединениях этой подкладки с нажимающими на неё металлическими поверхностями. Такие исследования были проведены на специальных моделях традиционно приме-

няющейся стальной подкладки и современной, отлитой из пластмассы EPY. Был проведен сравнительный анализ полученных результатов и на их основании были сформулированы выводы.

8.9.2. Модели фундаментных подкладок и способ проведения исследований

Исследования были проведены на простых осесимметрических моделях фундаментных подкладок при сохранении надлежащих условий их изготовления и нагрузок, выступающих в реальных фундаментных болтовых соединениях многочисленных машин и технических устройств. Эти модели были изготовлены из пластмассы EPY. Они имели форму кольца (рис. 8.59а) внутренним диаметром $D_w = 30$ мм, внешним диаметром $D_z = 80$ мм и высотой $H = 25$ мм.

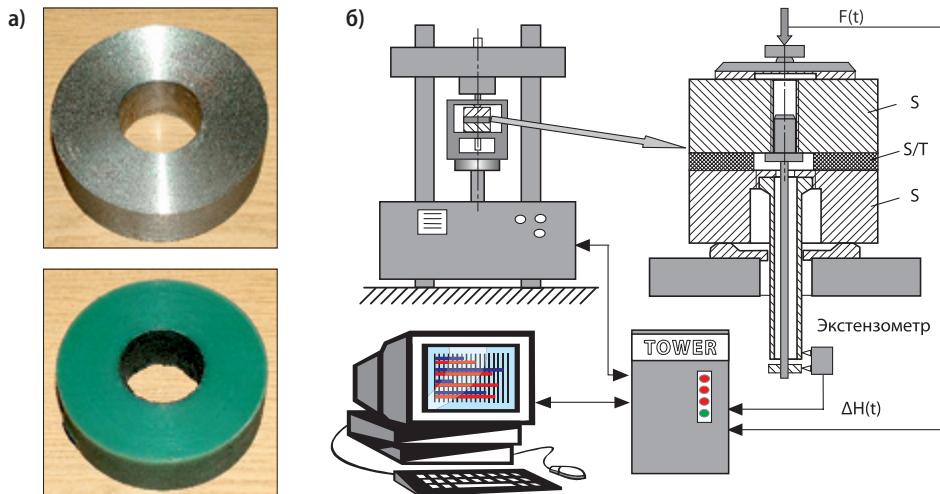


Рис. 8.59. Модели фундаментных подкладок (а) и схема установки для испытания их деформации при нормальных нагрузках (б)

Экспериментальные исследования были проведены на испытательной машине Instron (модель 8501 Plus). Общая схема испытательного стенда показана на рис. 8.59б. Исследуемая подкладка была помещена между двумя плоскими лобовыми поверхностями стальных кружков, являющихся вырезками стального фундамента и основания монтируемой машины (рис. 8.59б). Лобовые поверхности стальных кружков, вызывающие нагрузку на исследуемую подкладку, были обработаны механическим способом (фрезерование) и имели следующие параметры шероховатости: $R_a = 13,5—14,53 \mu\text{m}$, $R_z = 52,20—59,59 \mu\text{m}$. Они приблизительно отвечают поверхностям металлических фундаментов, а также основаниям монтированных устройств.

Созданная таким способом система, состоящая из стальной фундаментной подкладки и двух контактно действующих на неё поверхностей стальных кружков, была помещена в специальную оснастку и несколько раз подверглась испытанию на сжатие. В исследованиях применялось специальное программирование Wavemaker для динамических испытаний, являющееся оборудованием испытательной машины. Динамические исследования основываются на том, что все входные и выходные величины считаются функцией времени. Используя эту программу, были разработаны детальные программы для нескольких испытаний, реализующих определённые циклы нагрузок, отличающиеся временем и диапазоном величины силы нагрузки. Компьютерное управление определёнными циклами обеспечило большую точность и повторяемость реализации. Мерой эффективных деформаций исследуемой подкладки считалось взаимное приближение лобовых поверхностей стальных кружков, нажимающих на данную подкладку. Таким образом были учтены не только деформации материала подкладки высотой Н, но и контактные деформации, выступающие на двух поверхностях стыка с нажимающими на неё элементами.

В реальных подкладках это металлические поверхности фундамента и основания смонтированной машины. В принятой системе нужно было обеспечить равномерное распределение поверхностных нагрузок, а также измерение средней величины вызванных ими эффективных деформаций ΔH подкладки (т. е. суммы деформаций материала подкладки и контактных деформаций). Для измерения деформаций был применён экстензометр фирмы Instron. Способ их измерений схематически показан на рис. 8.596.

8.9.3. Реализация и результаты исследований системы со стальной подкладкой

Исследуемая подкладка ($\varnothing 30/\varnothing 80 \times 25$ мм) была изготовлена из стали обыкновенного качества — St3. Поверхности стыка подкладки были обточены, а их параметры шероховатости вмещались в пределах: $R_a = 4,67\text{--}6,04 \mu\text{м}$, $R_z = 23,28\text{--}33,22 \mu\text{м}$. Эту подкладку поместили между двумя стальными кружками (рис. 8.60), являющимися основанием машины, и фундаментом, и подвергли некоторым испытаниям на сжатие, отличающимся ходом и диапазоном нагрузок. Полный объём исследований был представлен в отчёте [156]. Ниже поданы некоторые из них.

Сначала были проведены испытания на сжатие подкладки при линейно изменяющихся во времени нагрузках по равнобедренному треугольнику с постепенно растущей высотой. Ход и величина нагрузок, принятых и выполненных на испытательной машине, а также вызванных ими деформаций представлены на графиках (рис. 8.61) в виде результатов, полученных непосредственными измерениями. Скорость увеличения и уменьшения силы при нагрузке и разгрузке была равна $v = 10,8 \text{ кН/с}$, что вызывало увеличение и уменьшение средних сжимающих напряжений в подкладке со скоростью 2,5 МПа/с.

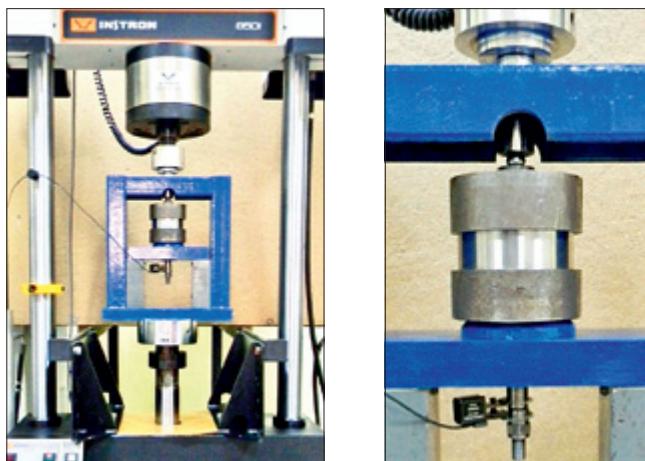


Рис. 8.60. Испытание стальной подкладки на испытательной машине Instron 8501 Plus

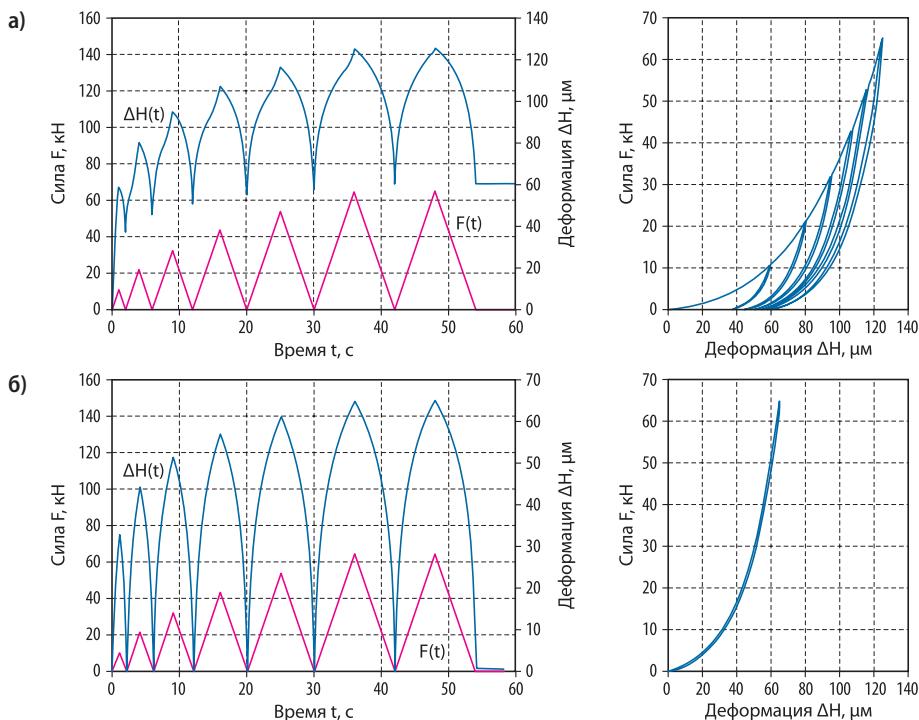


Рис. 8.61. Деформации $\Delta H(t)$ для заданных величин сжимающих сил в функции времени для первого (а) и третьего (б) цикла одинаковых нагрузок; диаграммы с правой стороны представляют те же самые результаты измерений в системе координат $F—\Delta H$ (очередные пикиовые величины поверхностных нагрузок $\sigma_i = 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0$ МПа)

Из испытаний следует (рис. 8.61), что линейному ходу $F(t)$ соответствует чётко нелинейный ход деформаций $\Delta H(t)$. Во время первой нагрузки исследуемой системы её деформации имеют упруго-пластический характер. При третьем и дальнейших циклах нагрузок, которые не превышают предыдущих максимальных величин, деформации в основном имеют упругий характер. Это отчётливо видно на рис. 8.61б и 8.62.

Довольно устойчивые (прочные) значительные деформации, образовавшиеся в исследуемой системе при первых её нагрузках с увеличивающейся силой, можно объяснить пластическими деформациями, выступающими на верхушках шероховатостей взаимодействующих поверхностей отдельных стальных элементов данной системы. Эти деформации иногда могут иметь существенное значение во время монтажа конструкционных узлов машин и устройств, нуждающихся в точной установке. Зато упругие деформации, выступающие в такого рода соединениях, относящихся к группе жёстких соединений, чётко показывают, что они не являются совершенно жёсткими. Они объясняют выступающие в таких соединениях сложные физические явления. Эти деформации имеют существенное влияние на характеристики деформаций болтовых соединений, а также на податливость всей системы, в которой они находятся. Их необходимо учитывать при моделировании, а также при статическом и динамическом анализе машин. Это особенно относится к анализу вибраций, выступающих в системах больших поршневых компрессоров, где крепящие системы обычно являются самым слабым их звеном и причиняют много хлопот потребителям этих устройств во время эксплуатации [105—111].

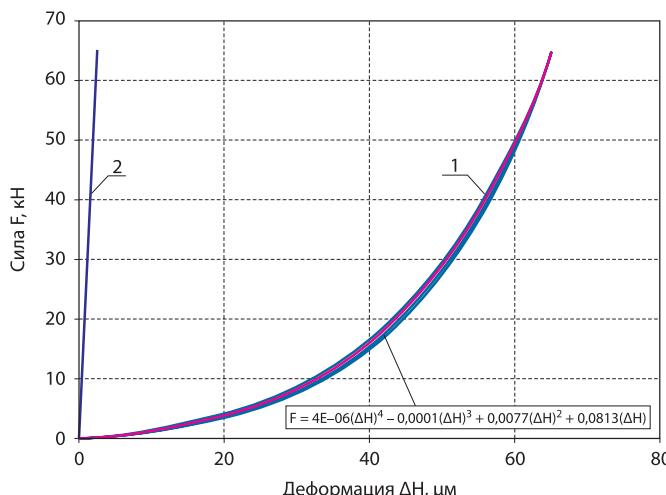


Рис. 8.62. Стабилизированная характеристика деформаций для испытываемого состава со стальной подкладкой. Определена экспериментально (кривая 1) и рассчитана по закону Hooke'a для одноосевого сжатия (кривая 2)

На рис. 8.62 показана увеличенная стабилизированная характеристика деформаций стальной подкладки в исследуемой системе. Для сравнения на этом рисунке показана также характеристика деформаций исследуемой подкладки, рассчитанная по простому закону Hooke'a:

$$\Delta H = \frac{FH}{SE} = \frac{\sigma H}{E} = \frac{15 \cdot 25}{2,1 \cdot 10^5} = 0,001785 \text{ мм} \quad (8.9)$$

Деформации материала стальной подкладки являются линейной функцией нагрузок и при принятых величинах этих нагрузок (существенных с точки зрения инженерской практики) они являются только очень малой частью всех деформаций исследуемой системы. Доминирующую роль играют здесь контактные деформации, выступающие на поверхностистыка соединяемых элементов,

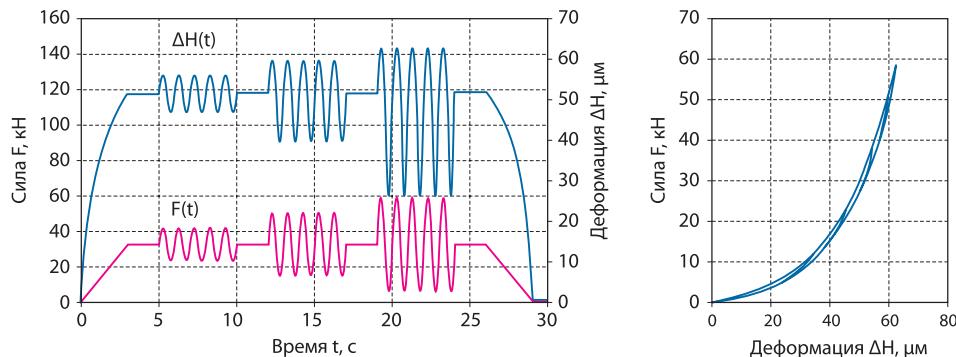


Рис. 8.63. Линии синусоидально изменяющейся силы, имеющей постоянную среднюю величину ($\sigma_{\bar{f}} = 7,5 \text{ МПа}$) и разные амплитуды ($\sigma_a = 2, 4, 6 \text{ МПа}$), а также вызванные ею деформации; по правой стороне — те же самые результаты измерений в системе координат F—ΔH

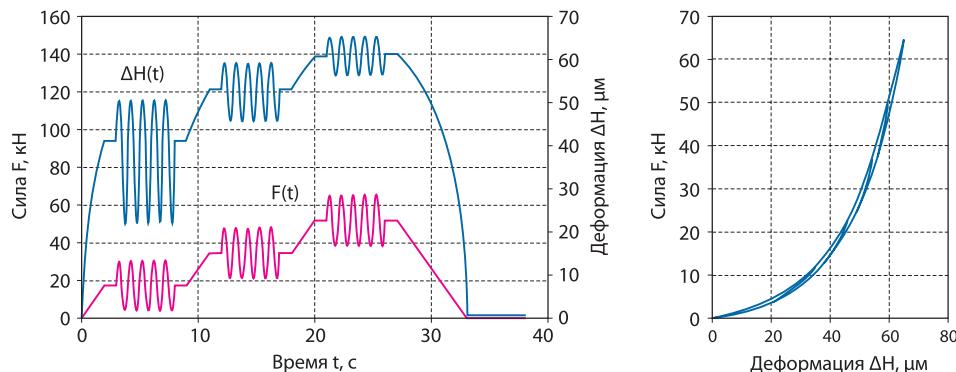


Рис. 8.64. Линии синусоидально изменяющейся силы, имеющей разную среднюю величину ($\sigma_{\bar{f}} = 4, 8, 12 \text{ МПа}$) и постоянную амплитуду ($\sigma_a = 3 \text{ МПа}$), а также вызванные ею деформации; по правой стороне — те же самые результаты измерений в системе координат F—ΔH

имеющие нелинейный упругий характер. Они практически полностью исчезают немедленно после уменьшения нагрузки (рис. 8.62). Это свидетельствует о большой стабильности исследуемой системы.

Упругая податливость этой системы зависит от актуальной нагрузки и уменьшается по мере её увеличения. Небольшая петля гистерезиса, наблюдавшаяся в этой системе (после её стабилизации), вызвана явлением трения, выступающего при контакте верхушек неровностей поверхностей.

В следующих экспериментах нагрузки имели синусоидальный пробег: с определённой средней нагрузкой и тремя разными амплитудами, а также с тремя разными средними величинами и постоянной амплитудой. Временный пробег принятых нагрузок и вызванных ими деформаций показан на рис. 8.63 и 8.64. Они относятся к стабилизированной системе.

Исследуемая система проявляет стабильные линейно-упругие свойства. Реакцией этой системы на гармонические воздействия являются деформации негармонического характера. Отклонения являются несимметричными по отношению к положению равновесия и чётко зависят от средней величины, а также от амплитуды возмущающей силы (рис. 8.63 и 8.64).

8.9.4. Реализация и результаты исследований системы с подкладкой, отлитой из пластмассы EPY

Для сравнительных целей идентичные исследования как для системы со стальной подкладкой были проведены также для системы с фундаментной подкладкой, изготовленной из пластмассы EPY. Эта подкладка не была механически обработана. Она была отлита на готово между стальными кружками, являющимися

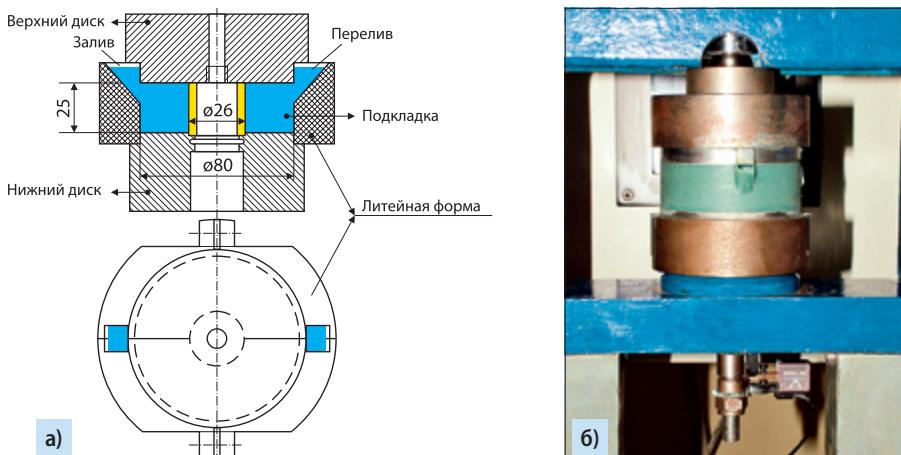


Рис. 8.65. Литейная форма фундаментной подкладки из пластмассы EPY (а) и реализация испытаний состава на испытательной машине (б)

фрагментами фундамента и основания машины. Для изготовления этой подкладки была подготовлена специальная литейная форма, показанная на рис. 8.65а. Были приняты такие условия литья подкладок, которые чаще всего применяются на практике. Подкладка была отлита при комнатной температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$ и отверждена при этой температуре в течение минимум 48 часов.

Для созданной таким образом системы были проведены такие же тесты, как и раньше для системы со стальной подкладкой. Результаты этих тестов представлены ниже, на рис. 8.66 и 8.68.

На рис. 8.66 представлены временные процессы линейно изменяющихся нагрузок (по треугольнику с увеличивающейся высотой) и вызванных ими деформаций.

Поведение исследуемой системы с подкладкой из пластмассы принципиально отличается от поведения исследуемой раньше системы со стальной подкладкой. Здесь чётко выступают линейно-упругие зависимости между нагрузками и деформациями. Деформации при первом, втором, третьем и последующих циклах нагрузок практически не отличаются. С самого начала система ведёт

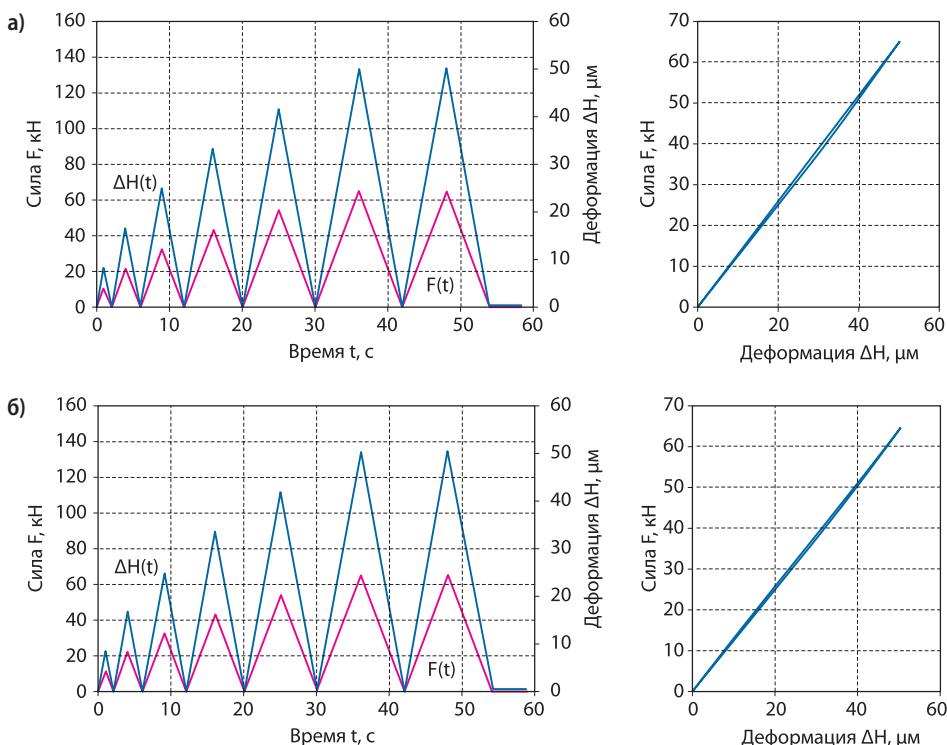


Рис. 8.66. Изменения заданных сжимающих нагрузок $F(t)$ и вызванных ими деформаций $\Delta H(t)$ для первого (а) и третьего (б) цикла тех же нагрузок; диаграммы с правой стороны представляют те же самые результаты измерений в системе координат F — ΔH

себя стабильно. Измеренные в этом случае деформации ΔH являются целиком и полностью результатом деформаций материала подкладки. Отлитая подкладка тщательно прилегает ко всем макро и микронеровностям стальных кружков и здесь не выступают заметные результаты контактных деформаций, характерных для стыка двух механически обработанных поверхностей. Здесь можно принять, что реальная поверхность стыка равна номинальной поверхности стыка, что имеет существенное практическое значение для переноса механических нагрузок. Эффективный модуль упругости для исследуемой подкладки, определённый в экспериментальных исследованиях (рис. 8.66), имеет следующую величину:

$$E_{EPY} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta\sigma \cdot I}{\Delta H} = \frac{15 \cdot 25}{0,050} = 7500 \text{ МПа} \quad (8.10)$$

Примечание: величина этого модуля больше, чем его величина по каталогу ($E = 4915 \text{ МПа}$), которая определяется при стандартном испытании на сжатие образцов пластмассы ($\varnothing 20 \times 25 \text{ мм}$) с лобовыми механически обработанными поверхностями. В таких случаях образуются добавочные контактные деформации, которые снижают реальную величину этого модуля. Определённая величина этого модуля на длинных образцах, при измерении их при помощи экстензометра, является большой и равна $7000—8000 \text{ МПа}$ (см. раздел 7, пункт 7.15.2).

Для нагрузки исследуемой системы силой сжатия с синусоидальным ходом, таким же самым, как для системы со стальной подкладкой, получены результаты, представленные на рис. 8.67 и 8.68. Они показывают, что исследуемая система имеет линейно-упругий характер. Деформации также, как и возмущающая их сила, имеют гармонический ход, а их амплитуды являются пропорциональными амплитудам силы. После разгрузки системы деформации сводятся до нуля (исчезают). Система сохраняет полную стабильность.

8.9.5. Сравнение результатов исследований и выводы

На рис. 8.69 сопоставлены определённые экспериментальным путём характеристики нормальных деформаций для системы со стальной подкладкой (кривая 1) и для системы с подкладкой из пластмассы EPY (кривая 2). На этом рисунке показана также характеристика деформаций материала стальной подкладки, определённая по классической формуле Hooke'a (простая 1'). Видна большая качественная и количественная разница в полученных результатах.

В системе со стальной подкладкой, в диапазоне существенных для практики нагрузок, решающую роль играют контактные деформации, которые по своему характеру являются линейно-упругими и имеют величины во много раз больше, чем деформации материала этой подкладки. Они являются результатом значительных деформаций верхушек неровностей взаимодействующих поверхностей.

Учитывая шероховатость, волнистость и ошибки формы, реальная поверхность стыка в таких соединениях составляет только очень небольшой процент

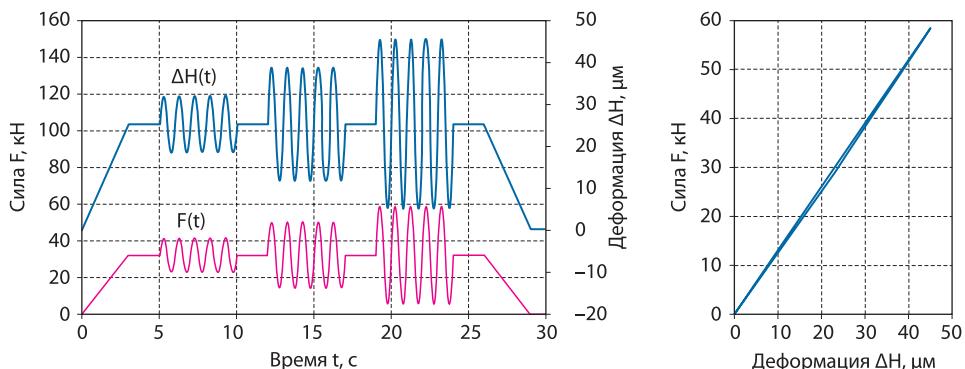


Рис. 8.67. Линии синусоидально изменяющейся силы, имеющей постоянную среднюю величину ($\sigma_{sr} = 7,5 \text{ МПа}$) и разную амплитуду ($\sigma_a = 2, 4, 6 \text{ МПа}$), а также вызванные ею деформации; по правой стороне — те же самые результаты измерений в системе координат F — ΔH

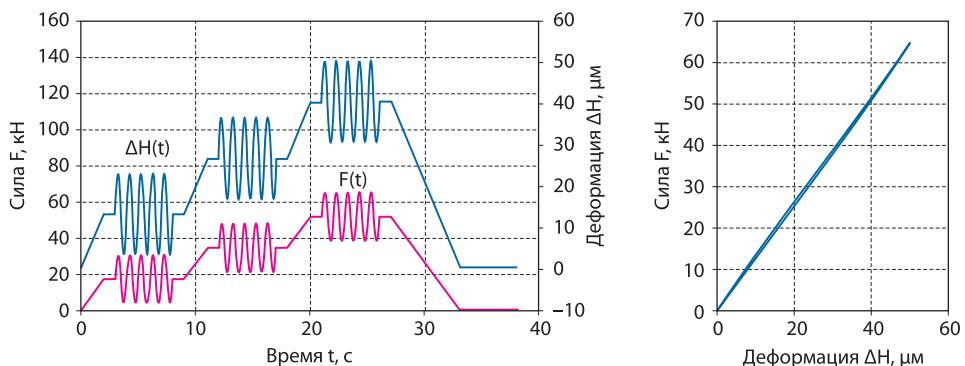


Рис. 8.68. Линии синусоидально изменяющейся силы, имеющей разную среднюю величину ($\sigma_{sr} = 4, 8, 12 \text{ МПа}$) и постоянную амплитуду ($\sigma_a = 3 \text{ МПа}$), а также вызванные ею деформации; по правой стороне — те же самые результаты измерений в системе координат F — ΔH

их номинальной поверхностистыка. Это имеет существенное влияние на их поведение под нагрузкой.

Отлитая из пластмассы подкладка точно прилегает ко всем неровностям металлических поверхностей. Здесь не выступают заметные контактные деформации, характерные длястыка двух механически обработанных поверхностей. Измеренные для этой системы величины деформаций полностью являются результатом деформаций материала подкладки. Они имеют линейно-упругий характер, а их величины хорошо покрываются с деформациями, рассчитанными по формуле Hooke'a. Они легко моделируются и теоретически анализируются.

Определённые характеристики деформаций позволяют понять и научно обосновать вывод, что фундаментные подкладки, отлитые из пластмассы, лучше

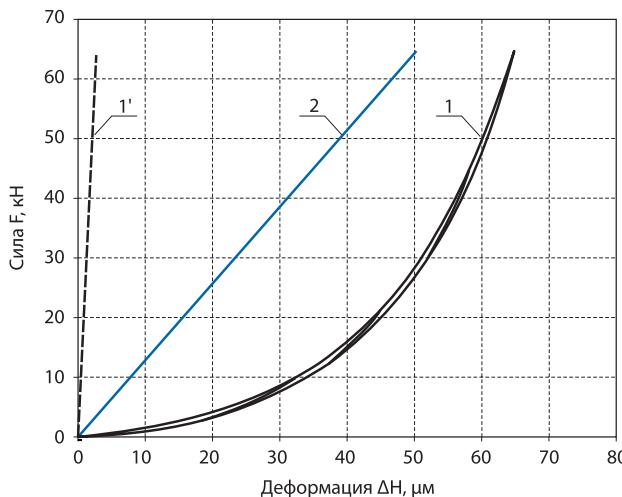


Рис. 8.69. Сравнение характеристик деформаций, определённых для испытанных фундаментных подкладок

выполняют своё задание, чем стальные подкладки. Основным техническим преимуществом фундаментных подкладок из пластмассы является их точное прилегание к шероховатым металлическим поверхностям. Это гарантирует хорошее распределение нагрузок по всей номинальной поверхностистыка, что в результате обеспечивает хорошую работу, большую надёжность и прочность такого соединения.

Из проведенных исследований следует общий вывод, что фундаментные болтовые соединения, как с металлическими подкладками, так и с отлитыми из пластмассы, не должны при анализе и моделировании восприниматься как совершенно жёсткие крепления. Они имеют чёткие характеристики деформаций (существенно зависящие от типа фундаментной подкладки) и оказывают основное влияние на качество работы (вибрации), надёжность и устойчивость не только крепящих систем, но и часто самих систем, в которых они выступают.

8.10. Исследования характеристик конструкционного трения и относительных перемещений в фундаментных болтовых соединениях со стальной подкладкой и с отлитой из пластмассы EPY

8.10.1. Общие замечания

Фундаментные болтовые соединения машин подвергаются нагрузкам не только силами, параллельными оси болта, создавшимися благодаря весу монтированного объекта, монтажному напряжению болта и рабочим нагрузкам, но и очень часто

также значительным поперечным силам. Они должны быть так запроектированы и изготовлены, чтобы поперечные оси силы (касательные поверхности крепления) целиком переносились силами трения, выступающими в этих соединениях ($N\mu > T$, где N означает нормальную силу, T — касательную силу на поверхности крепления, а μ — коэффициент трения). Если силы трения в соединении будут слишком малыми, то в нём будет выступать микроскольжение, которое ведёт к его разрушению.

Основной целью исследований, представленных в этой работе, было экспериментальное определение характеристик, образно представляющих конструкционное трение и относительные перемещения соединяемых элементов в касательном направлении, для фундаментных болтовых соединений с традиционно применяемой стальной подкладкой и с современной — литой на готово из полимерной пластмассы, а также проведение сравнительного анализа и оценки этих двух решений.

Обстоятельные исследования этой проблемы, исходящие из текущих потребностей, были выполнены в рамках исследовательского проекта N N502 194 938. Обширное описание и результаты этих исследований содержатся в отчёте о реализации этого проекта [156]. В нём представлены только некоторые результаты этих исследований, а также вытекающие из них выводы познавательного и практического характера.

8.10.2. Принятые системы и способ выполнения исследований

Для реализации запланированных исследований были запроектированы и изготовлены специальные болтовые соединения, приспособленные надлежащим образом для крепления на испытательной машине с целью двухсторонней нагрузки поперечной силой оси болта. Эти соединения (рис. 8.70) состоят из двух соответственно профилированных, соединённых друг с другом, стальных элементов, обладающих большой жёсткостью, находящейся между ними дистанционной подкладки (квадратной с боками 80 мм и толщиной 20 мм, с отверстием 24 мм в центре), а также из болта M20×1,25 с гайкой. В соединяемых стальных элементах были размещены цилиндрические хвосты для их крепления в зажимных колодках испытательной машины. Подкладка являлась заменимым элементом.

Исследования сначала были выполнены для соединения со стальной подкладкой, традиционно применяемой при монтаже тяжёлых машин, а затем с подкладкой, отлитой на готово из полимерной пластмассы EPY, всё чаще применяемой в настоящее время на практике. Болт с наклеенными электроопорными тензометрами был соответственно выкалиброван и служил силомером для получения надлежащего монтажного напряжения болта и для его контроля во время испытаний. Под гайку была наложена пружинная подкладка, а также осевой шариковый подшипник с шариковой подкладкой (NSK Bearings 52204U), обеспечивающей осевую нагрузку болта. Исследования были выполнены на

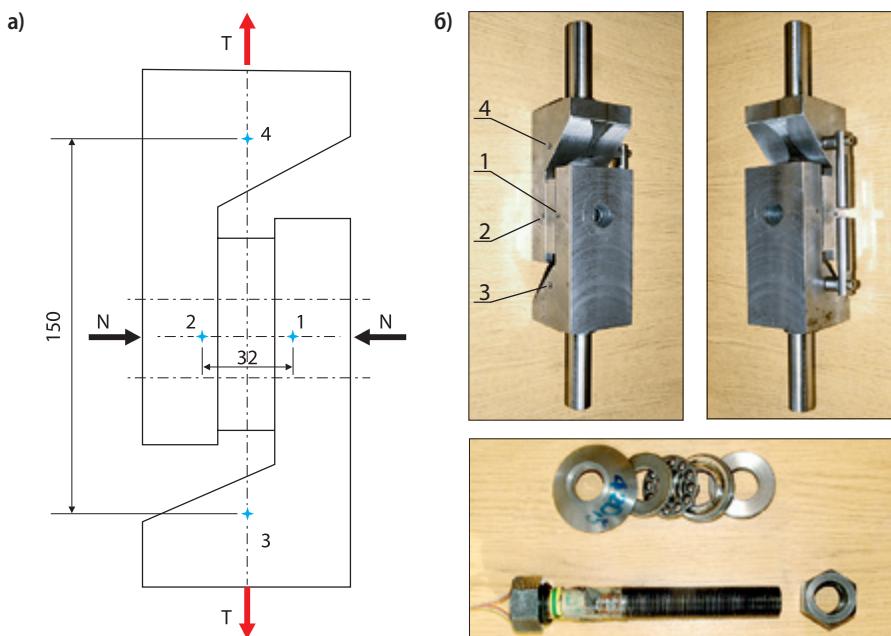


Рис. 8.70. Винтовое соединение, предназначенное для испытаний характеристик конструкционного трения, а также касательных перемещений (поперечных оси винта): а) схема с отмеченными точками, предназначенными для измерения относительных перемещений; б) вид изготовленных элементов соединения и винт с наклеенными на нём тензометрами, предназначенными для измерения выступающей в нём силы

испытательной машине Instron 8850. Головки этой машины (рис. 8.71а) оборудованы гидравлическими зажимающими щёками, что делает возможным двухстороннюю нагрузку соединения с гладким переходом через нуль.

Для измерения относительных перемещений соединяемых элементов исследуемой системы были применены экстензометры фирмы Instron (рис. 8.71). Были измерены относительные перемещения соединяемых элементов на боковых поверхностях в двух местах, обозначенных на рис. 8.70а цифрами 1 и 2, а также 3 и 4. Экстензометр, обозначенный цифрой 1 на рис. 8.71 (с базой 10 мм), измерял относительные перемещения соединяемых элементов в точках 1 и 2, находящихся на одной поперечной линии в середине соединения (в месте, где находится ось болта, рис. 8.70а). Эти перемещения имеют местный характер. В общем случае они являются результатом деформаций без изменения объёма соединяемых элементов (чистый сдвиг), контактных касательных деформаций, а также микроскольжения, выступающего в контактных соединениях взаимодействующих поверхностей подкладки и соединяемых элементов.

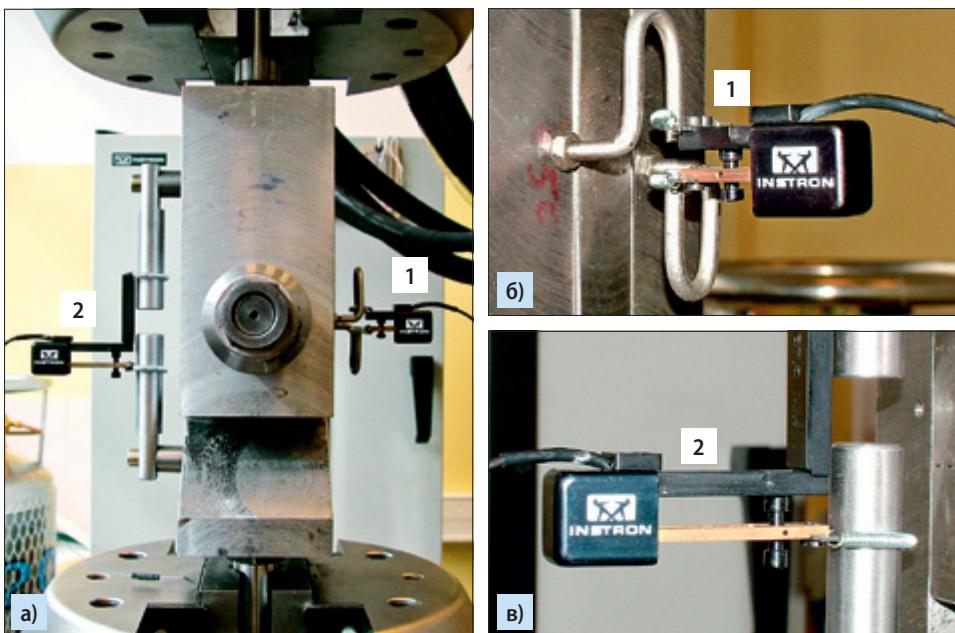


Рис. 8.71. Реализация испытаний на машине Instron 8850 с видимыми экстензометрами, предназначенными для измерения относительных перемещений мерительных точек (обозначенных на рис. 8.70)

Экстензометр, обозначенный цифрой 2 на рис. 8.71 (с базой 50 мм), измерял изменение взаимного расстояния точек 3 и 4, находящихся на значительном расстоянии ($l = 150$ мм) друг от друга, на линии в соответствии с направлением действующей нагрузки (рис. 8.70а). Эти перемещения имеют глобальный характер. Они являются результатом осевых деформаций материала той части соединения, которая находится между этими точками, деформаций без изменения объёма соединяемых элементов, а также контактных касательных деформаций и микроскольжения, выступающего в контактных соединениях подкладки с соединяемыми элементами.

При исследованиях было принято профессиональное программирование испытательной машины Instron Wave Matrix v.1.5.318, предназначенное для динамических испытаний. Оно составляло основу для разработки детальных программ нагрузок и их реализации при помощи компьютера с очень большой точностью и повторяемостью, а также для обработки и издания полученных результатов измерений в разной форме. Динамические исследования, в общем, характеризуются тем, что все вводимые и все получаемые величины считаются функциями времени.

Сначала были проведены исследования соединения с традиционной стальной подкладкой, а затем – с подкладкой, отлитой из пластмассы ЕРУ.

8.10.3. Реализация и результаты исследований соединения со стальной подкладкой

Контактные поверхности соединяемых элементов были фрезерованы, а измеренные параметры шероховатости этих поверхностей были следующими: $R_a = 2,47—2,51 \mu\text{м}$; $R_z = 13,40—13,50 \mu\text{м}$. Контактные поверхности подкладки (толщиной 20 мм) были обточены и имели следующие параметры шероховатости: $R_a = 2,29—3,60 \mu\text{м}$; $R_z = 11,69—17,25 \mu\text{м}$.

Монтажное напряжение болта $N = 51700 \pm 200 \text{ Н}$ вызвало растягивающее напряжение в болте $\sigma = 199,7 \text{ МПа}$ и средние поверхностные нагрузки на подкладку $p = 8,69 \text{ МПа}$. Реализация этих исследований на испытательной машине показана на рис. 8.72.

Было проведено несколько экспериментов, принимая разные управляемые компьютером программы нагрузок. Подробные описания и результаты этих экспериментов содержатся в отчёте [156]. Ниже представлены только некоторые результаты этих исследований.

График на рис. 8.73 показывает характеристику относительных перемещений точек замера 1 и 2. Она образовалась в результате медленно увеличивающейся нагрузки и разгрузки (до нуля) исследуемого соединения после достижения определённых относительных перемещений точек замера 1 и 2, измеряемых (в направлении действующей нагрузки) при помощи экстензометра 1. После уменьшения нагрузки до нуля наступала следующая нагрузка до достижения следующей принятой величины перемещения.



Рис. 8.72. Реализация испытаний винтового соединения со стальной подкладкой на машине Instron 8850

Последнее пятое уменьшение нагрузки не закончилось на нуле. Оно плавно перешло от растягивающей нагрузки до сжимающей исследуемое соединение. Сжимающая нагрузка так долго и таким образом продолжалась, что было достигнуто начальное состояние, т. е. нулевые величины деформаций и силы (рис. 8.73).

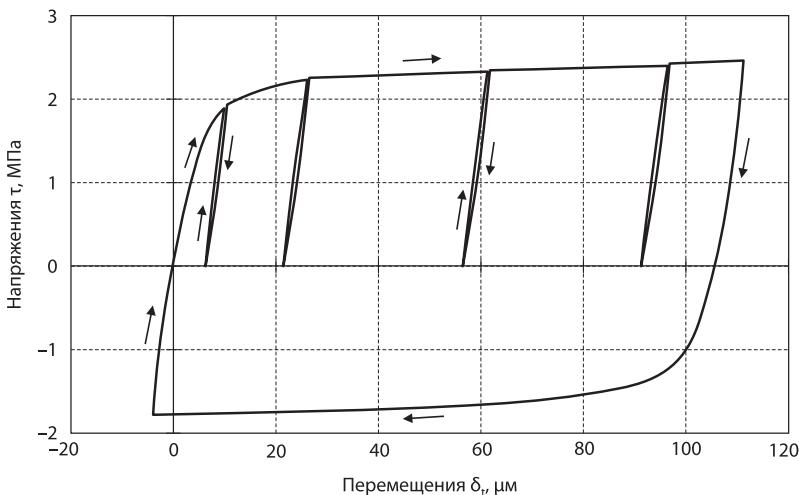


Рис. 8.73. Характеристика относительных перемещений, измеряемых в точках 1 и 2 (в направлении действия нагрузки) во время постепенного нагружения или разгрузки испытываемого винтового соединения, в функции средних касательных напряжений t , действующих на подкладку ($N = 51700 \pm 200$ Н; $p = 8,69$ МПа)

Механизм появления измеряемых экстензометром 1 относительных перемещений δ_t точек 1 и 2, вызванных принятой силой T , касательной к контактным поверхностям, объясняет рис. 8.74. В этом случае измеряемые относительные перемещения δ_t являются результатом упругих деформаций без изменения объема γ материала соединяемых элементов ($\delta'_t = \gamma h$), контактных касательных деформаций, а также микроскольжения касающихся поверхностей.

На рис. 8.75 представлена характеристика конструкционного статического трения для исследуемого болтового соединения. Из неё следует, что развитию силы статического трения сопутствуют некоторые касательные микроперемещения, которые только в некоторой степени имеют упругий характер. Доминирующую роль здесь играют микроскольжения (рис. 8.75), которые могут достичь значительных величин перед срывом стыка и появлением макроскольжения. Величины упругих контактных касательных деформаций (касательная контактная податливость) можно легко определить в каждой точке характеристики, уменьшая нагрузку и повторно нагружая данное соединение. Для определенных нормальных нагрузок контактная касательная податливость имеет постоянную

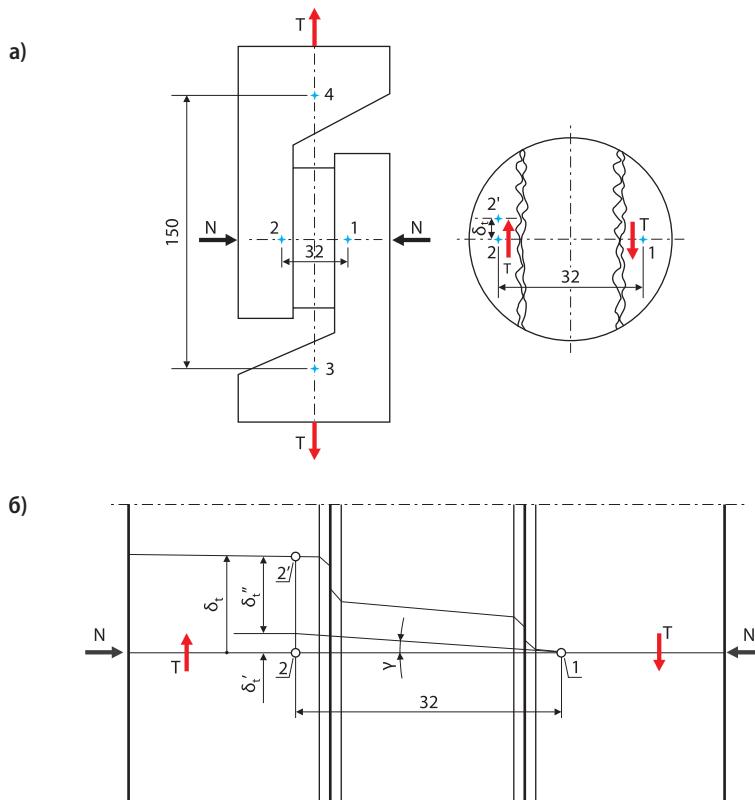


Рис. 8.74. Обозначение мерительных точек 1 и 2 на соединяемых элементах (а) и схема, поясняющая механизм появления относительных перемещений δ_t этих точек, вызванных силами Т(б)

величину. Она зависит от величины этих нагрузок. Во время разгрузки и вторичного увеличения нагрузки (рис. 8.75) система является упругой до достижения такой точки на графике, от которой начался процесс разгрузки. После достижения этой точки и продолжения нагрузки наступают дальнейшие микроскольжения при минимальном увеличении силы. Во время разгрузки и повторной нагрузки образуются небольшие петли упругого гистерезиса, которые чётко видны на рис. 8.75. **Примечание:** в вышеописанных экспериментах соединения не поддавались нагрузкам аж до «срыва стыка», имея в виду возможность разрушения дорогостоящих экстензометров.

В другом эксперименте было исследовано поведение системы при принятой программе относительных перемещений точек замера 1 и 2 (рис. 8.76), управляемых экстензометром 1 (рис. 8.71). Принятая программа относительных перемещений с синусоидальным ходом представлена на рис. 8.76.

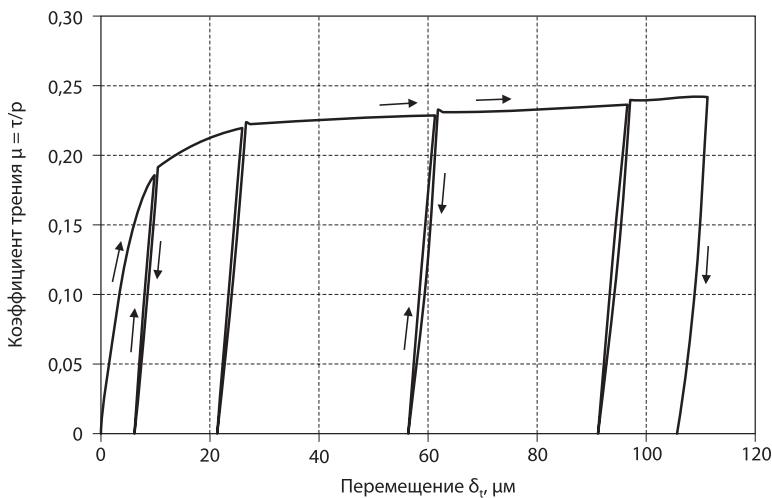


Рис. 8.75. Характеристика конструкционного трения и выступающих при этом упругих контактных касательных деформаций и микроскольжений в испытываемом винтовом соединении (при нагрузке $p = 8,69$ МПа)

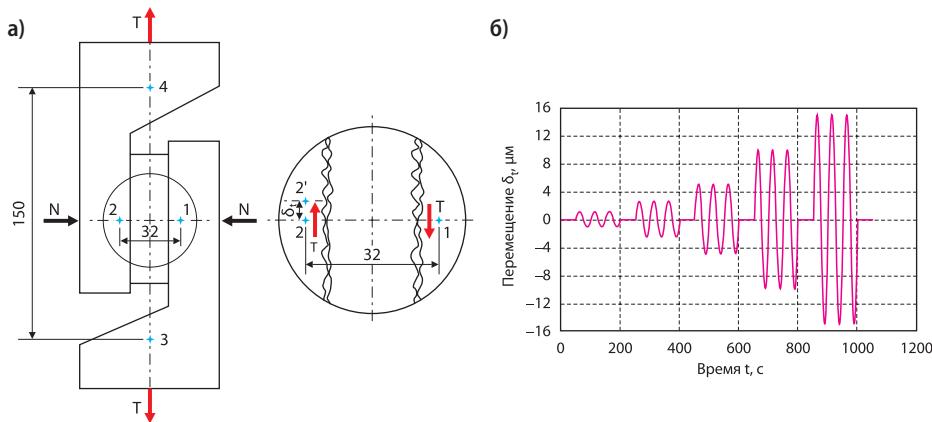


Рис. 8.76. Схема испытываемого соединения (а) и запрограммированный пробег относительных перемещений мерительных точек 1 и 2, с амплитудами $\delta_a = 1; 2,5; 5; 10$ и 15 мкм (б)

Имея принятую программу перемещений, испытательная машина, оборудованная программой для динамических исследований (Instron Wave Metrix), должна подобрать и реализовать соответствующие нагрузки, которые обеспечат выполнение определённых относительных перемещений точек 1 и 2. Результаты реализации этого задания были представлены на рис. 8.77.

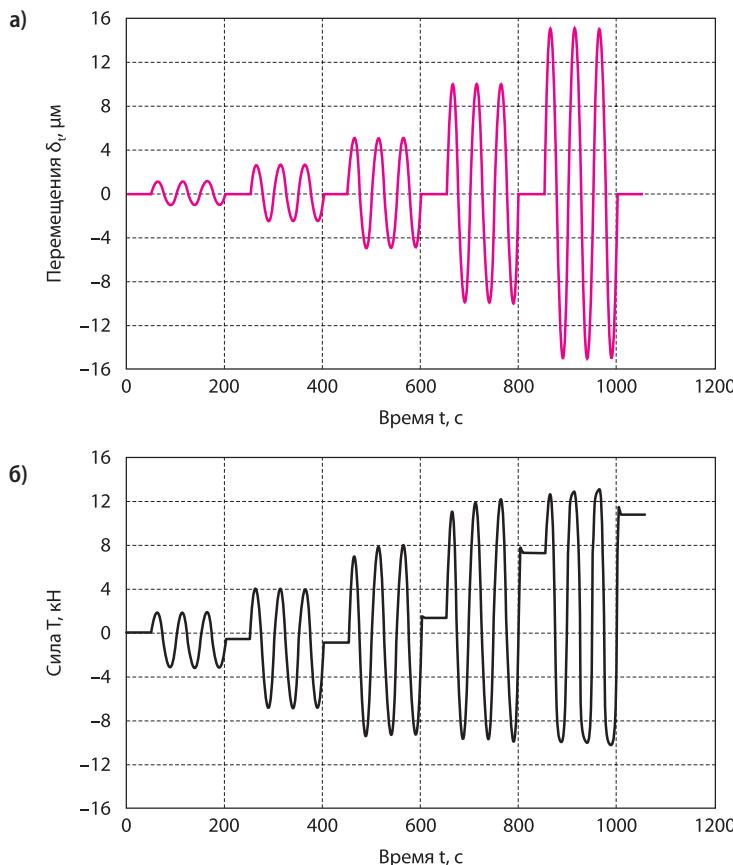


Рис. 8.77. Перемещения мерительных точек 1 и 2 (а) и величин сил, вызывающих эти перемещения (б), определённых испытательной машиной

Графики на этом рисунке показывают временный ход относительных перемещений δ_t точек 1 и 2, а также силы T , которая вызвала эти перемещения. Здесь отчётливо видно, что система является нелинейной и ход силы сильно отличается от регулярного синусоидального хода перемещений. Необходимо здесь обратить внимание на большую точность реализации перемещений (с амплитудами равными 1—15 $\mu\text{м}$), а также нерегулярный, сложный временный ход силы, вызвавшей эти перемещения.

На рис. 8.78 показаны те же самые результаты измерений, что и на рис. 8.77, в системе координат δ_t — τ , где $\tau = T/S$, где S — площадь поверхности стыка подкладки с соединяемым элементом). Видны здесь также петли гистерезиса, выступающие при реализации определённых относительных перемещений с синусоидальным ходом, как на рис. 8.77а.

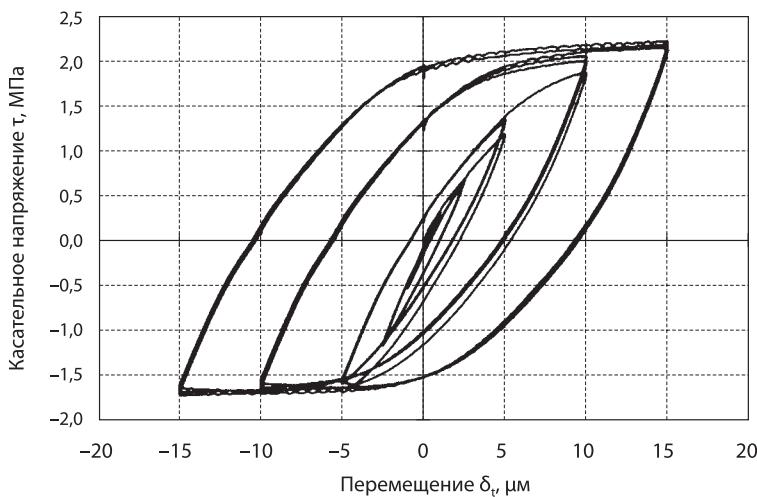


Рис. 8.78. Петли гистерезиса, появившиеся при синусоидальных принудительных перемещениях с амплитудами 1, 2, 5, 10 и 15 мкм, замеренных в точках 1 и 2 исследуемого соединения

Из этих исследований следует (рис. 8.78), что только при очень малых величинах относительных перемещений и касательных напряжений система является линейно-упругой. При больших перемещениях в исследуемой системе выступают микроскольжения, которые в результате дают большие петли гистерезиса, свидетельствующие о большом рассеянии энергии, вызванном конструкционным трением. Положительным эффектом этого является хорошее гашение вибраций, а отрицательным — интенсивное и быстрое разрушение соединения. Часто при этом выступает явление фреттинга (коррозии при трении).

8.10.4. Реализация и результаты исследований соединения с подкладкой из пластмассы ЕРУ

Схема исследуемого соединения с подкладкой, отлитой из пластмассы ЕРУ, показана на рис. 8.79. Подкладку из пластмассы изготовили, сохраняя условия, применяемые на практике, подробно описанные в работе [156]. Отлитая таким образом (на готово) подкладка характеризуется тем, что автоматически плотно прилегает к микро и макронеровностям поверхности соединяемых элементов.

После закладки и напряжения болта было выполнено несколько экспериментов при слегка модифицированных программах нагрузок. Применение тех же самых программ нагрузок было невозможным, т. к. это соединение с подкладкой из пластмассы вело себя совершенно иначе, чем раньше исследованное соединение со стальной подкладкой. Были приняты такие условия исследований, которые отчётливо показали качественные и количественные различия поведения двух исследуемых соединений.

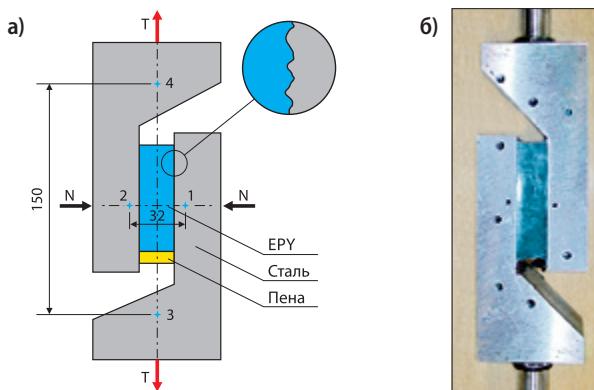


Рис. 8.79. Исследуемое соединение с подкладкой, отлитой из пластмассы EPY: а) схема; б) вид

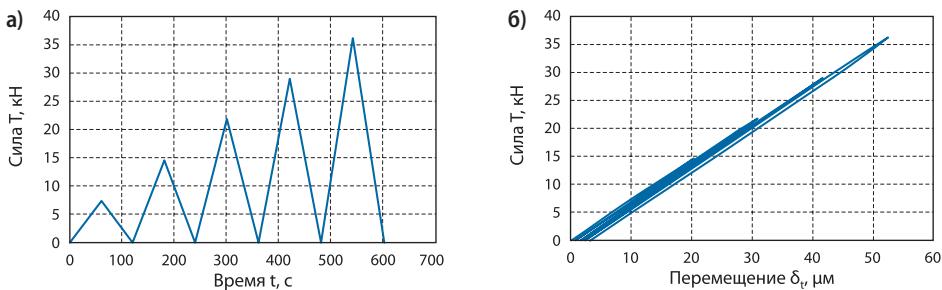


Рис. 8.80. Изменение силы T (а) и перемещения δ_t , вызванные этими силами (б)

Сначала увеличивали и уменьшали нагрузку на исследуемое соединение силой, линейно изменяющей свою величину в течение определённого времени по равнобедренным треугольникам, с постепенно увеличивающейся высотой, как на рис. 8.80а. При этом измерялись относительные перемещения точек 1 и 2 системы в направлении действия нагрузочной силы T . Результаты этого эксперимента в системе координат T — δ_t представлены на рис. 8.80б.

Из этих исследований следует (рис. 8.80), что здесь чётко выступает линейная зависимость между нагрузкой T и перемещением δ_t точек замера 1 и 2, причём при появлении небольшой петли гистерезиса эти перемещения имеют упругий характер. В этом случае также сопротивления трению, которые каждую минуту уравновешивают силу T , также являются линейно-упругой функцией относительных перемещений точек 1 и 2 без заметных микроскольжений в контакте.

В следующем эксперименте исследуемое соединение было поддано нагрузке с двух сторон силой с линейным ходом по времени, по треугольникам с рас- тущей высотой. Ход и результаты этого эксперимента показывает рис. 8.81.

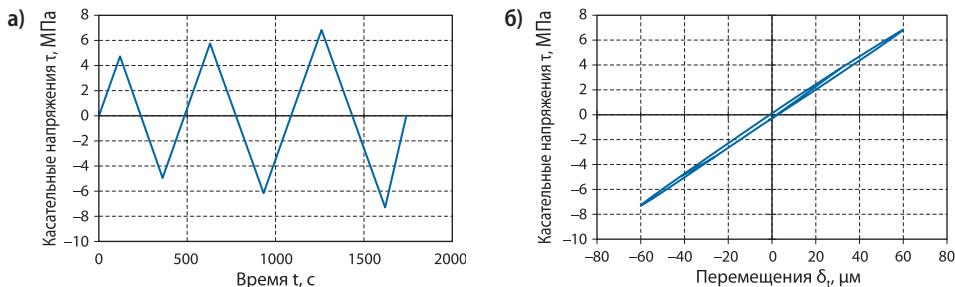


Рис. 8.81. Изменения заданных касательных напряжений τ (а) и зависимых от них, замеренных перемещений δ_t (б)

Рис. 8.81а показывает временный ход касательных напряжений (вызванных силой T), а рис. 8.81б — перемещения δ_t , вызванные принятой нагрузкой. Замечена очень хорошая линейная зависимость относительных перемещений от касательных напряжений при относительно небольших остро законченных петлях упругого гистерезиса.

Принятые для этой системы характеристики принципиальным образом отличаются от характеристик, ранее полученных для соединения со стальной подкладкой, как в отношении качества, так и количества. В этом случае относительные перемещения δ_t точек замера 1 и 2 полностью являются результатом деформаций без изменения объёма материала соединяемых элементов, а прежде всего подкладки из пластмассы. Подкладка тесно прилегает ко всем неровностям поверхности соединяемых элементов. Здесь не выступают контактные деформации и микроскольжения взаимодействующих поверхностей, характерные для контактных поверхностей, которые были механически обработаны. Необходимо подчеркнуть, что подкладка не была приклеена к соединяемым стальным элементам. Поверхностистыка этих элементов были покрыты тонким слоем антиадгезионного средства и можно их легко разделить. Приложенные касательные нагрузки полностью переносятся силами статического трения (без появления контактных деформаций и микроскольжения). Благодаря оченьющему взаимному прилеганию соединяемых поверхностей здесь получается большая эффективная величина коэффициента конструкционного (статического) трения. В рассматриваемом случае этот коэффициент достиг величины $\mu = 0,8$, причём это не была его предельная величина. При этой величине коэффициента трения, трёхкратно большей, чем предельная величина коэффициента трения, выступающего в исследуемом соединении со стальной подкладкой, система имеет линейно-упругий характер (рис. 8.81). Исследуемая система не подвергалась большой нагрузке из опасения перед возможностью повреждения экстензометров при внезапном срыве фрикционного соединения.

В этом случае механизм образования относительных перемещений δ_t точек 1 и 2, измеренных экстензометром 1, объясняет рис. 8.82. Здесь выступают существенные разницы по сравнению с рис. 8.74, объясняющим механизм образования относительных перемещений в болтовом соединении со стальной подкладкой. Решающее влияние на относительные перемещения точек 1 и 2 в рассматриваемом соединении имеют деформации без изменения объема (чистый сдвиг) подкладки из пластмассы. Благодаря очень хорошему взаимному прилеганию соединяемых поверхностей и большой эффективной величине коэффициента трения здесь не выступают контактные касательные деформации и микроскольжения. Эта система является стабильной и имеет линейно-упругий характер даже при более, чем трёхкратных нагрузках по сравнению с предельными нагрузками системы со стальной подкладкой.

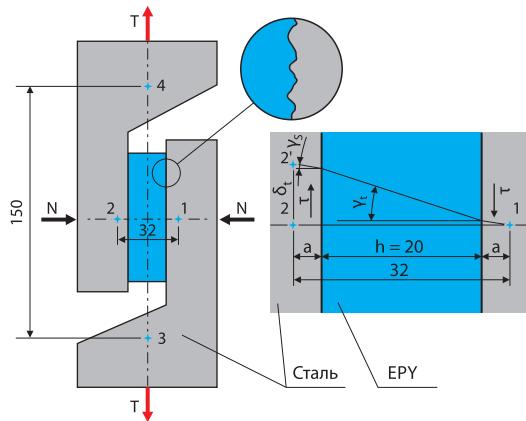


Рис. 8.82. Схема, поясняющая механизм появления относительных перемещений δ_t точек 1 и 2, вызванных силами T , в винтовом соединении с подкладкой из пластмассы

В следующем эксперименте было исследовано поведение системы при определённой программе относительных перемещений точек замера 1 и 2 с синусоидальным ходом, управляемых экстензометром 1 (рис. 8.71). Условия этого эксперимента были такими же, как при раньше выполненных исследованиях соединения со стальной подкладкой. Схема исследуемой системы и определённая программа относительных перемещений точек 1 и 2 представлены на рис. 8.84 и 8.85. Рисунок 8.84 показывает ход по времени реализованных испытательной машиной перемещений точек 1 и 2, а также средних касательных напряжений t , действующих на подкладку и вызывающих эти перемещения. Здесь видна простая линейно-упругая зависимость между этими величинами. Измерение перемещения точек замера 1 и 2 являются главным результатом статических деформаций материала подкладок и в гораздо меньшей степени также соединяемых элементов (рис. 8.83).

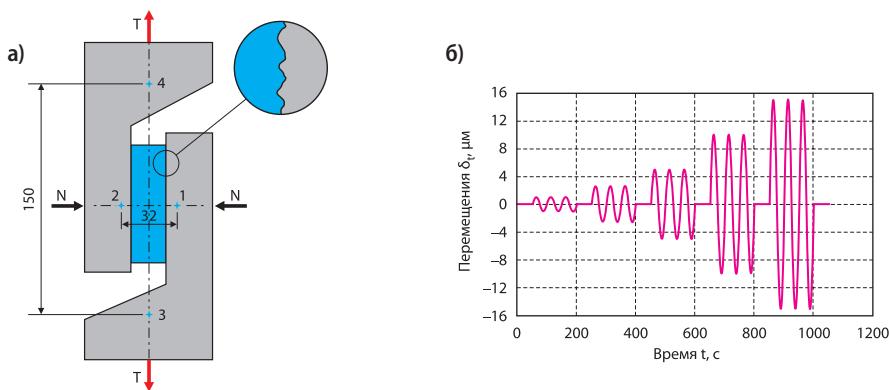


Рис. 8.83. Схема исследуемого соединения (а) и заданных относительных перемещений мерительных точек 1 и 2 (б)

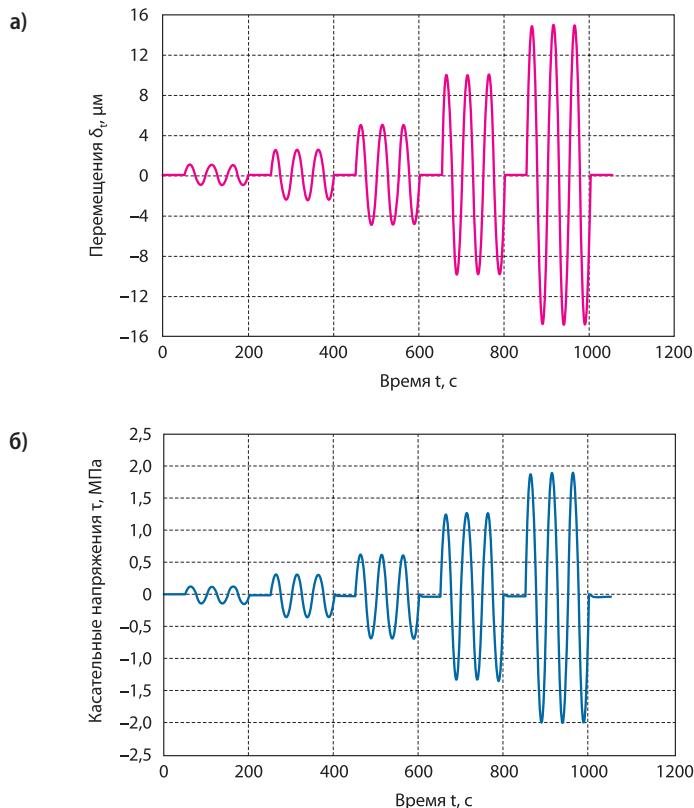


Рис. 8.84. Измеренные перемещения точек 1 и 2, а также средних касательных напряжений, действующих на подкладку и вызывающих эти перемещения

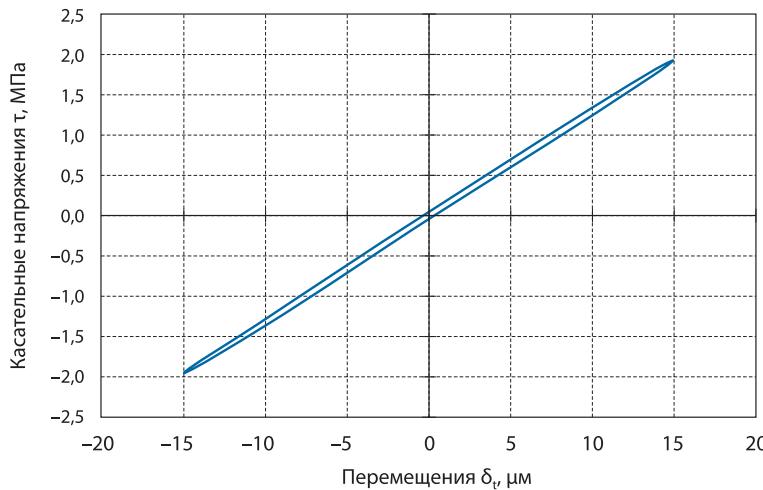


Рис. 8.85. Петли гистерезиса, определённые на основании измерений, представленных на рис. 8.84

На рисунке 8.85 показаны петли гистерезиса, определённые в этом эксперименте. Они являются небольшими и показывают результаты вискотического гашения, выступающего в материале подкладки. На основании этих петель легко можно определить величины модуля сдвига G , а также коэффициента потерь η для подкладки из пластмассы. Для условий, принятых для этого эксперимента, на основании надлежащих расчётов, выполненных в работе [156], получены следующие величины: $G_t = 2651$ МПа и $\eta = 0,032$ (для самой большой петли). Эти величины хорошо совпадают со значениями таких же величин, определённых другими методами [39].

8.10.5. Сравнительный анализ результатов исследований болтовых соединений со стальной подкладкой и с отлитой из пластмассы EPY

Для сравнений приняты только некоторые результаты исследований, которые были соответственно сопоставлены друг с другом на нижепредставленных рисунках. На рисунке 8.86 представлены характеристики конструкционного трения исследуемых болтовых соединений со стальной подкладкой и с отлитой из пластмассы EPY с выступающими при этом относительными перемещениями соединяемых элементов, измеренными в точках 1 и 2. Уже на первый взгляд здесь видны существенные качественные и количественные разницы полученных характеристик. Характеристика трения соединения со стальной подкладкой (рис. 8.86, кривая 1) с самого начала имеет нелинейный ход. Сопротивлениям конструкционного трения (статического), уравновешивающим внешнюю нагрузку, сопутствуют значительные микроперемещения упруго-пластического характера. Они являются только в небольшой степени результатом упругих деформаций,

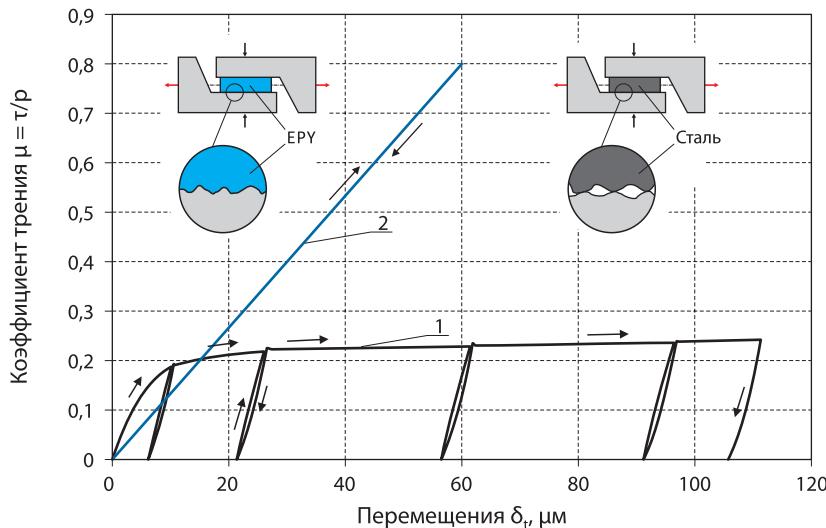


Рис. 8.86. Сравнение характеристик конструкционного трения и микроперемещений для винтовых соединений со стальной подкладкой (кривая 1) и отлитой из пластмассы (прямая 2)

выступающих в материале элементов и их контакте, заметных во время разгрузки и повторного увеличения нагрузки. В некоторой степени они являются результатом микроскольжений, выступающих в контакте взаимодействующих шероховатых поверхностей. Эти скольжения выступают при очень малых нарастаниях нагрузки и могут достигать значительных величин перед срывом стыка и появлением макроскольжения (кинетического трения).

Характеристика конструкционного трения для подкладки из пластмассы имеет линейный ход и упругий характер (рис. 8.86, прямая 2). Выступающие в этом случае микроперемещения, измеренные в точках 1 и 2, являются результатом упругих деформаций материала соединяемых элементов. В этом случае взаимодействующие поверхности подкладки и соединяемых элементов тщательно прилегают друг к другу. Благодаря этому здесь не выступают контактные касательные деформации и микроскольжения, даже тогда, когда сила нагрузки в три раза больше максимальной нагрузки силы соединения со стальной подкладкой.

Максимальная определённая величина коэффициента трения для стальной подкладки равна $\mu_s = 0,24$, а для подкладки из пластмассы — $\mu_t = 0,8$. Она больше в 3,3 раза, чем величина коэффициента трения в соединении со стальной подкладкой, причём это не максимальная предельная величина этого коэффициента стыка. Из опасения повреждения экстензометров было прекращено дальнейшее увеличение нагрузочной силы T .

На рисунках 8.87 и 8.88 сопоставлены динамические характеристики, определённые для болтовых соединений со стальной подкладкой и с подкладкой из

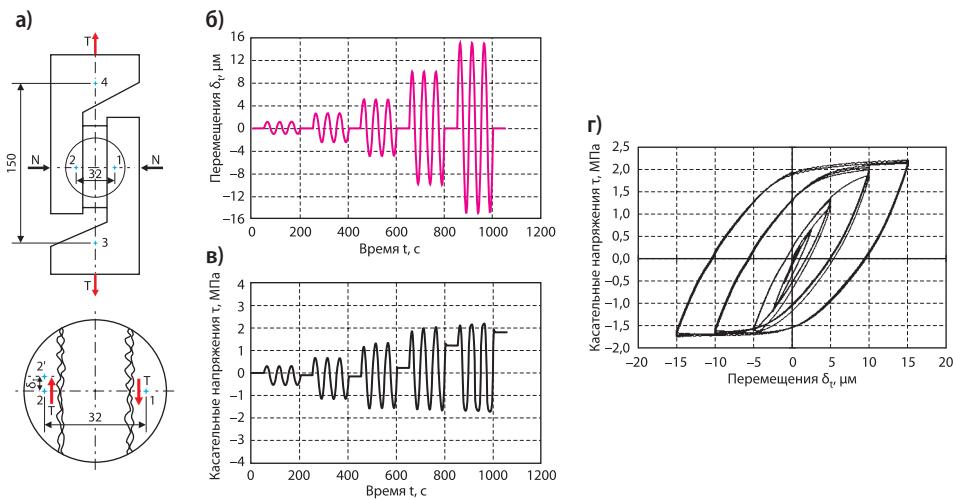


Рис. 8.87. Схема испытанного соединения со стальной подкладкой (а), изменения перемещений δ_t (б) и касательных напряжений τ (в), а также выступающие при этом петли гистерезиса (г)

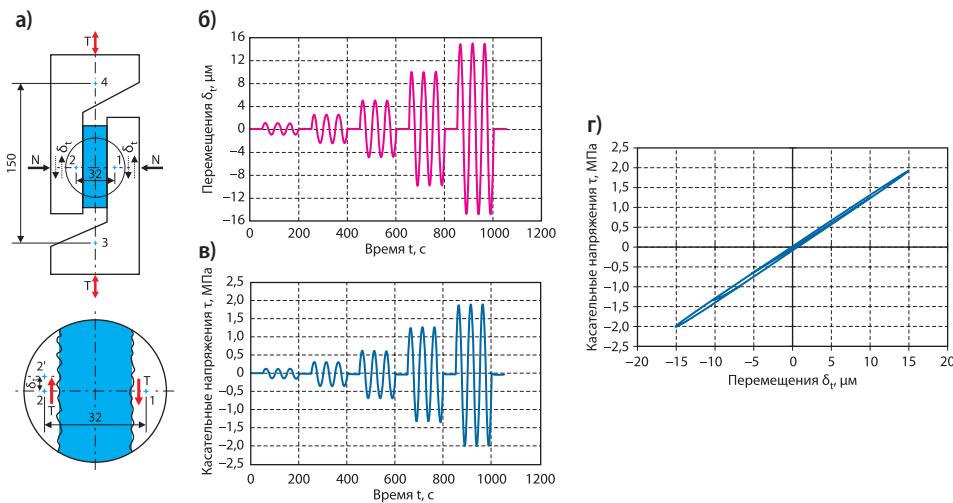


Рис. 8.88. Схема испытанного соединения с подкладкой, отлитой из пластмассы EPY (а), изменения перемещений δ_t (б) и касательных напряжений τ (в), а также выступающие при этом петли гистерезиса (г)

пластмассы, при тождественных кинематических воздействиях с синусоидальным ходом, измеренных в точках замера 1 и 2. Амплитуды этих воздействий равны: 1; 2,5; 5; 10 и 15 мкм (рис. 8.87б, 8.88б). Рисунки 8.87в и 8.88в представляют временный ход сил, реализующих определённые перемещения, а образовавшиеся при этом петли гистерезиса — рис. 8.87г и 8.88г.

В исследуемой системе со стальной подкладкой уже при относительно малых воздействиях выступают нелинейные зависимости, которые вызваны значительными микроскольжениями, появляющимися в контакте. Они чётко видны в больших петлях гистерезиса (рис. 8.87г). Здесь выступает большое действие сил конструкционного трения, которое хорошо гасит вибрации. Однако через некоторое время наступает стирание верхушек неровностей, часто выступает коррозия при трении, которая ведёт к деградации взаимодействующих поверхностей, травлению и разрушению соединения.

Совсем иначе при таких же самых воздействиях ведёт себя соединение с подкладкой из пластмассы. В целом диапазоне этих воздействий возникают простые линейные соединения между касательными и выступающими при этом относительными перемещениями. В этих случаях не выступают микроскольжения взаимодействующих поверхностей, а измеренные перемещения являются результатом линейно-упругих деформаций материала соединяемых элементов, а прежде всего подкладки из пластмассы. Петли гистерезиса являются небольшими и показывают гасящие свойства пластмассы. Они могут быть аппроксимированы остроконечными эллипсами. Это имеет большое теоретическое и практическое значение. Это облегчает моделирование и расчёт таких соединений, а также анализ их влияния на динамику всей сложной системы. Большая величина эффективного коэффициента трения (иногда приближающаяся к 1) без микроскольжений хорошо переносит большие касательные силы (поперечные к оси болта) через такого рода соединения. Здесь также не выступают явления коррозии. Это в результате обеспечивает им большую надёжность и прочность. Эти факты подтвердились на практике во многих объектах, эксплуатированных в чрезвычайно трудных условиях (напр. в судостроении).

Проведенные исследования объясняют научным способом, вне всякого сомнения, почему фундаментные подкладки, литые на готово из полимерной пластмассы, лучше выполняют свои технические задания, чем стальные подкладки.

Дополнительным преимуществом этих подкладок является простота их изготовления в любом месте, хорошая виброакустическая изоляция, а также устойчивость к атмосферным воздействиям и к агрессивным средам.

8.11. Определение состояния напряжения и деформации в болтовых соединениях с фундаментной подкладкой, изготовленной из пластмассы ЕРУ и из стали

8.11.1. Введение

Определение состояния напряжения и деформации в болтовом фундаментном соединении является очень сложным заданием механики контакта деформирующихся тел, почти невозможным для выполнения методами, известными в науке о сопротивлении материалов и основах конструкции машин, а также классическими

методами теории упругости без приёма многих упрощающих предпосылок. Такие предпосылки рекомендуются директивами VDI [159], но их применение даёт результаты расчётов, которые могут отличаться от действительного состояния.

Новые расчётные возможности для болтовых соединений создал метод конечных элементов вместе с применением электронной вычислительной техники. Этот метод был использован здесь для определения монтажных, экспериментальных и эксплуатационных состояний напряжений и деформаций в двух подобных моделях фундаментного болтового соединения судового двигателя, отличающихся только материалом подкладки. В одном случае фундаментная подкладка была изготовлена из пластмассы EPY, а в другом — из стали.

Целью этой работы были:

1. Исследование влияния упругих свойств (E и v) материала фундаментной подкладки (пластмасса EPY и сталь) на величину сферы контакта, на распределения и величины поверхностных нагрузок (действующих на подкладку), а также поверхности перемещений элементов соединения.
2. Определение напряжений и деформаций, а также характеристик эксплуатационных сил, выступающих в болте, при заданных внешних нагрузках — растягивающих и сдвигающих рассматриваемое соединение.
3. Исследование влияния изменения температуры на монтажное состояние напряжения и деформации в рассматриваемой модели болтового соединения с подкладкой из пластмассы.

8.11.2. Модель фундаментного болтового соединения

Для проектирования и расчётов была принята осесимметрическая модель болтового фундаментного соединения, представленная на рис. 8.89 [161]. Учитывая местный характер напряжений, такая модель повсеместно применяется в случае болтовых соединений. Она является достаточной для проведения сравнительного анализа достижения целей, определённых в этой работе.

Элементы рассматриваемой системы (рис. 8.89), в том числе подкладку из пластмассы EPY, необходимо считать упругими телами. Размеры (для численных расчётов) были приняты такими, чтобы отвечали средним величинам, выступающим на практике.

Дискретизованная модель этого соединения для численных расчётов по системе MES представлена на рис. 8.90. Так как в анализе и в расчётах главное внимание уделялось сфере контакта основания машины и плиты фундамента с подкладкой (изготовленной из пластмассы или из стали), то здесь были применены контактные элементы с двумя узлами, делающими возможным появление раскрытия и скольжения соединённых поверхностей. В контактном соединении были учтены силы трения Coulomba Ch. A. Зато были сокращены контактные соединения между головкой болта и основанием машины, принимая в этом случае контактные элементы с одним узлом.

Определение состояния напряжения и деформации в болтовых соединениях с фундаментной подкладкой

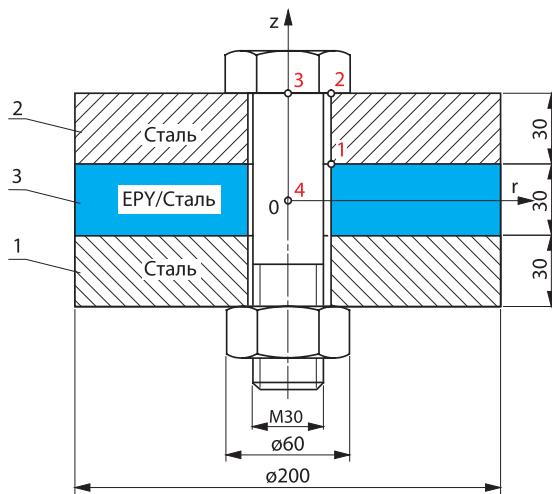


Рис. 8.89. Модель фундаментного болтового соединения: 1 — плита фундамента, 2 — основание машины, 3 — фундаментная подкладка (изготовлена из пластмассы ЕРУ или из стали)

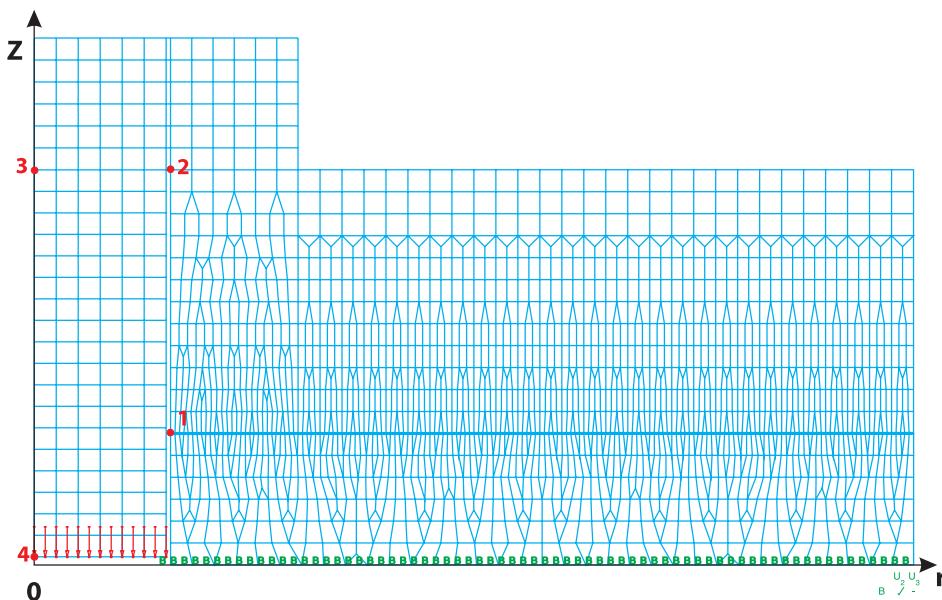


Рис. 8.90. Модель болтового соединения для расчётов по системе MES ADINA

Учитывая симметрию системы, для расчётов была подготовлена модель только одной отдельной части соединения (рис. 8.90). Были приняты конечные осесимметрические элементы (по отношению к оси Z), что значительно упростило расчёты.

8.11.3. Определение монтажного состояния напряжения и деформации

Для численных расчётов были приняты следующие данные: размеры как на рис. 8.89; постоянные величины материалов: $E_{st} = 2,1 \times 10^5$ МПа; $v_{st} = 0,3$; $E_{tw} = 6369$ МПа; $v_{tw} = 0,375$; коэффициенты трения: $\mu_{st} = 0,3$; $\mu_{tw} = 0,8$; монтажное напряжение болта: $P_0 = 150$ кН, которое вызывает средние поверхностные нагрузки на подкладку $\sigma_0 = 5$ МПа. Заданное монтажное напряжение болта в принятой модели (рис. 8.90) было осуществлено соответствующим перемещением вдоль оси Z (рис. 8.91).

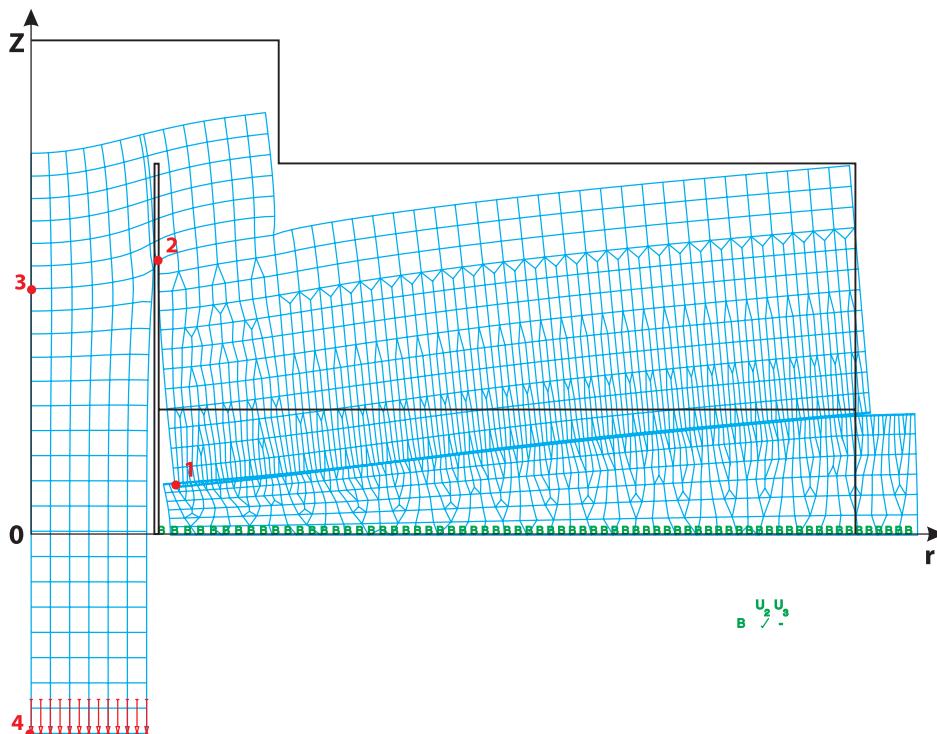


Рис. 8.91. Деформированная сетка конечных элементов при монтажном натяжении болта $P_0 = 140$ кН (масштаб 200 : 1)

На рис. 8.92 и 8.93 представлены поля перемещений в направлении оси Z и размещения контактных нагрузок в моделях болтового соединения из пластмассы и из стали.

На рис. 8.94 представлены распределения перемещений в направлении оси Z контактных поверхностей основания машины и подкладки, изготовленной из пластмассы и из стали, при монтажном напряжении $P_0 = 150$ кН. Радиусы R_0 на этом рисунке определяют зону контакта основания машины с фундаментной подкладкой. Видна большая разница этих зон в случае подкладки из пластмассы и подкладки из стали. Снаружи радиуса R_0 выступает раскрытие касательных

Определение состояния напряжения и деформации в болтовых соединениях с фундаментной подкладкой

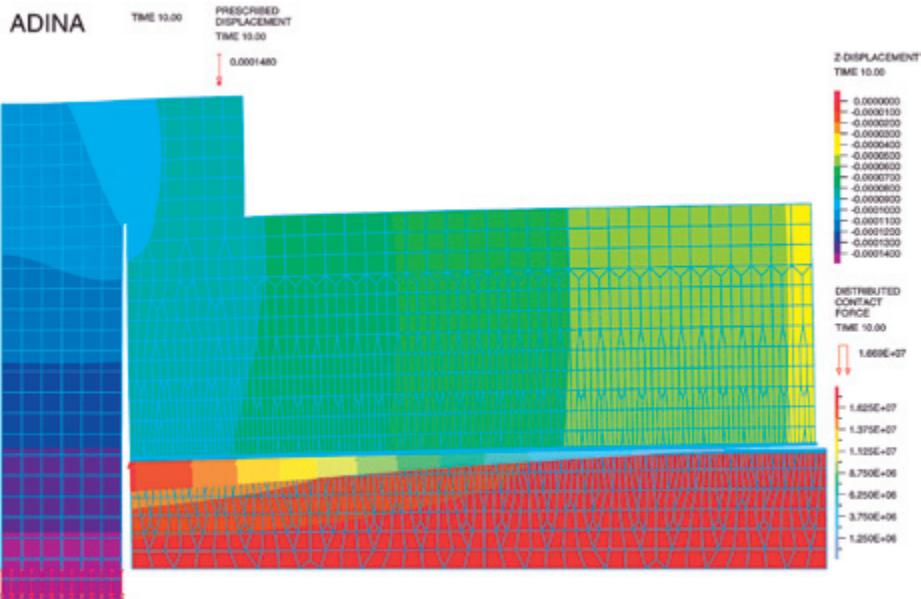


Рис. 8.92. Область перемещений в направлении оси Z и распределение контактных давлений в модели болтового соединения с подкладкой из пластмассы EPY

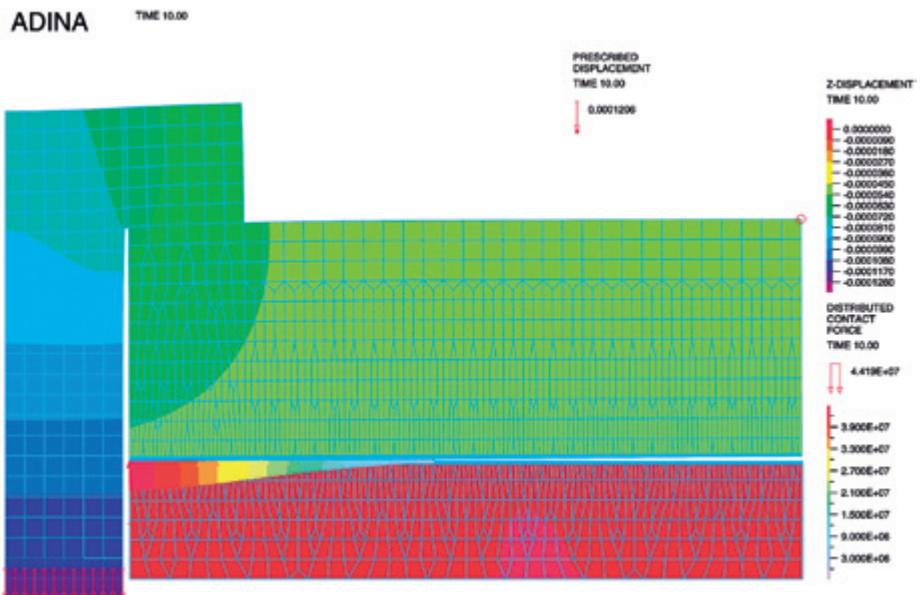


Рис. 8.93. Область перемещений и распределение контактных давлений в модели болтового соединения со стальной подкладкой, нагруженного внешней силой $F = -282,743$ кН

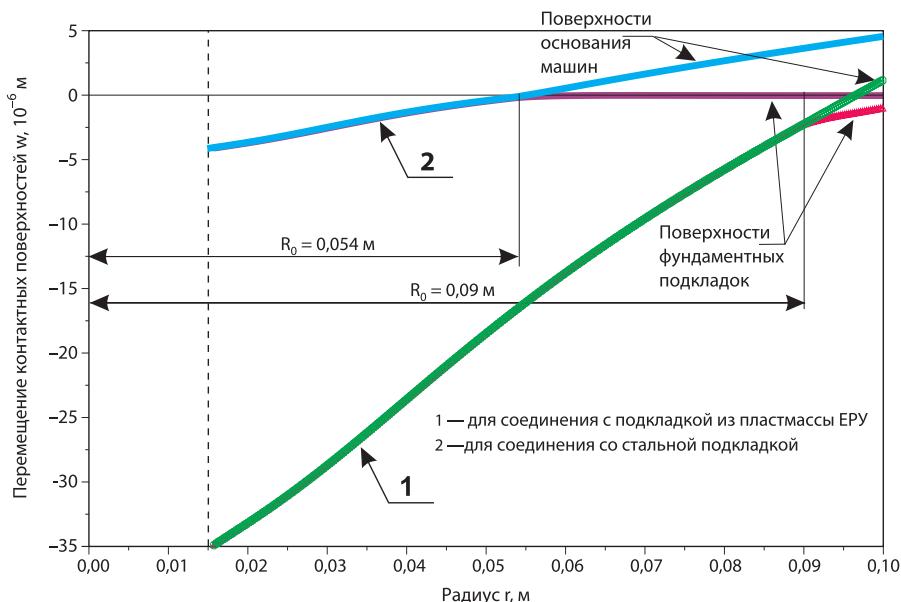


Рис. 8.94. Распределение перемещений (вдоль оси Z) контактных поверхностей основания машины и подкладки, изготовленной из пластмассы EPY и из стали для $P_0 = 150$ кН

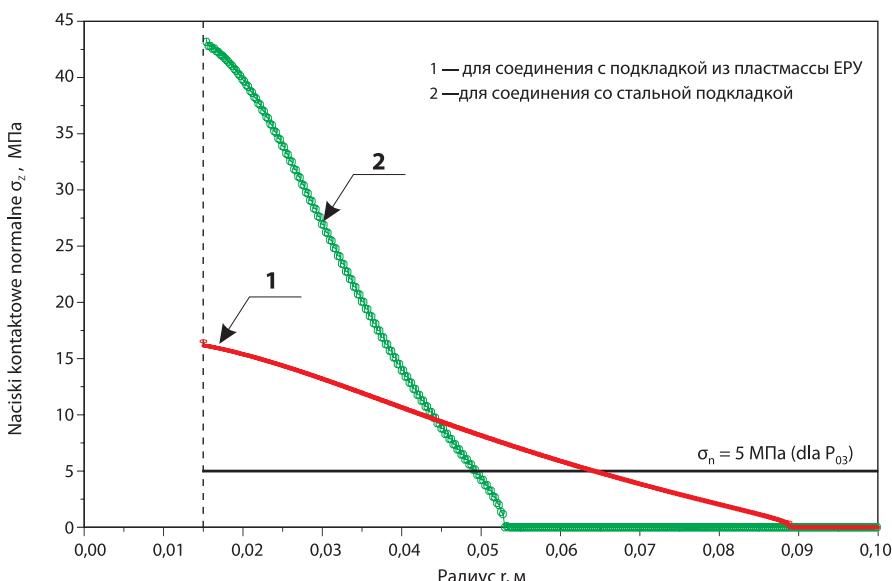


Рис. 8.95. Распределение нормальных давлений при контакте основы машины с подкладкой, изготовленной из пластмассы EPY и из стали для $P_0 = 150$ кН

поверхностей основания машины и фундаментной подкладки (рис. 8.94). И здесь видны большие разницы зон и диапазона раскрытия поверхности, зависящие от материала подкладки.

На рис. 8.95 показаны размещения нормальных нагрузок σ_z в контакте основания машины с подкладкой, а в случае болтовых соединений с подкладкой из пластмассы и из стали, при монтажном напряжении $P_0 = 150$ кН. Максимальные величины контактных напряжений в случае стальной подкладки почти в три раза больше, чем максимальные контактные напряжения, действующие на подкладку из пластмассы. Это результат размещения заданного монтажного напряжения на значительно большую поверхностьстыка. Горизонтальная линия на рис. 8.95 означает среднюю расчётную величину нормальных нагрузок ($\sigma_z = 5$ МПа) на всю номинальную поверхностьстыка подкладки с основанием машины. Применение подкладки из пластмассы даёт значительно лучшую аппроксимацию реального распределения нагрузок к номинальным нагрузкам (принятым в проектных расчётах фундаментных подкладок).

8.11.4. Определение эксплуатационного состояния напряжения и деформации, а также характеристики эксплуатационной нагрузки для болта

В настоящее время применяется основное положение, что начально напряжённое болтовое соединение нагружается внешними силами F , равномерно разложенными по окружности плит, представляющих отрезки основания машины и фундамента (рис. 8.96). Внешние силы могут растягивать или сжимать исследуемое соединение. Для численных расчётов принято, что внешние силы F изменяют свою величину от $-282,7$ кН до $+282,7$ кН в 400 шагах, причём знак минус означает сжатие, а знак плюс — растяжение соединения.

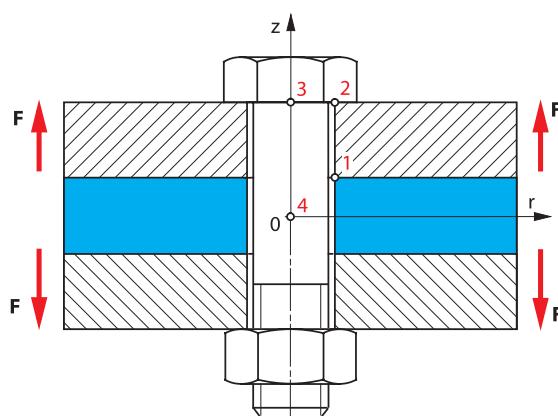


Рис. 8.96. Модель болтового соединения, нагруженного внешними силами

Распределения поверхностных нагрузок и перемещений элементов соединения, определённые для максимальных величин внешних сжимающих и растягивающих сил, представлены на рис. 8.97, 8.98 и 8.99. Из рис. 8.97 и 8.98 следует, что в случае сжатия болтового соединения с подкладкой из пластмассы получается более равномерная нагрузка всей подкладки, чем в соединении со стальной подкладкой. При растяжении соединения внешними силами F максимальной величины наступает полная разгрузка подкладки, и вся внешняя нагрузка переходит на болт. В этом случае род материала подкладки не играет никакой роли. Поверхности перемещений, касающиеся основания машины и болта, в случае двух моделей соединения являются одинаковыми (рис. 8.99).

На рис. 8.100 представлены эксплуатационные силы (P) в болте от внешней нагрузки (F) для обеих моделей болтового соединения. Расчёты были выполнены при внешней нагрузке, изменяющей свою величину от -300 кН до $+282,7$ кН. В модели с подкладкой из пластмассы (рис. 8.100, кривая 1) можно определить три периода внешней нагрузки. При достаточно больших сжимающих силах выступает полный контакт подкладки с основанием машины и с фундаментом.

При внешних силах F в диапазоне от около -4 кН до около $+25$ кН контакт подкладки с основанием машины и с фундаментом выступает только на части номинальной поверхностистыка. По мере увеличения внешних растягиваю-

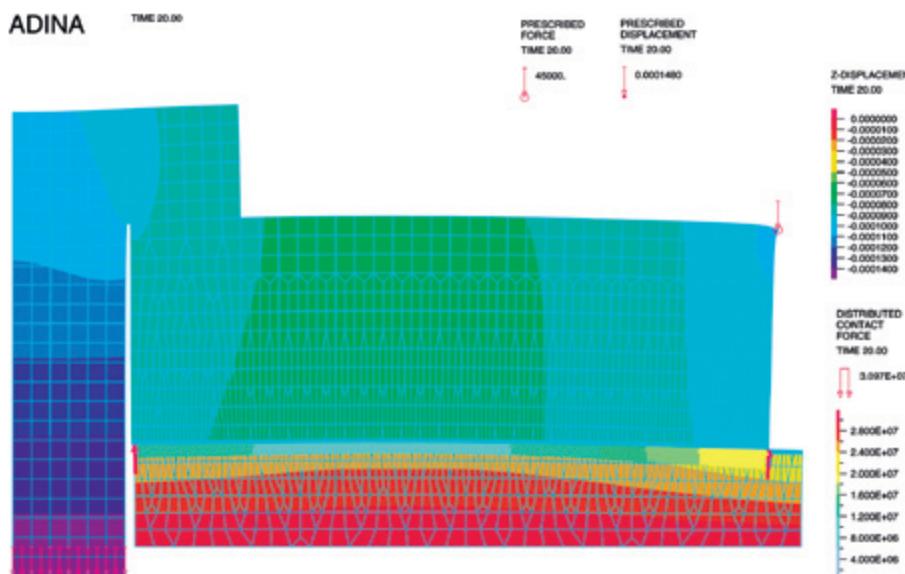


Рис. 8.97. Область поверхности перемещений и распределение контактных давлений в модели болтового соединения с подкладкой, изготовленной из пластмассы, нагруженного внешней силой $F = -282,7$ кН

Определение состояния напряжения и деформации в болтовых соединениях с фундаментной подкладкой

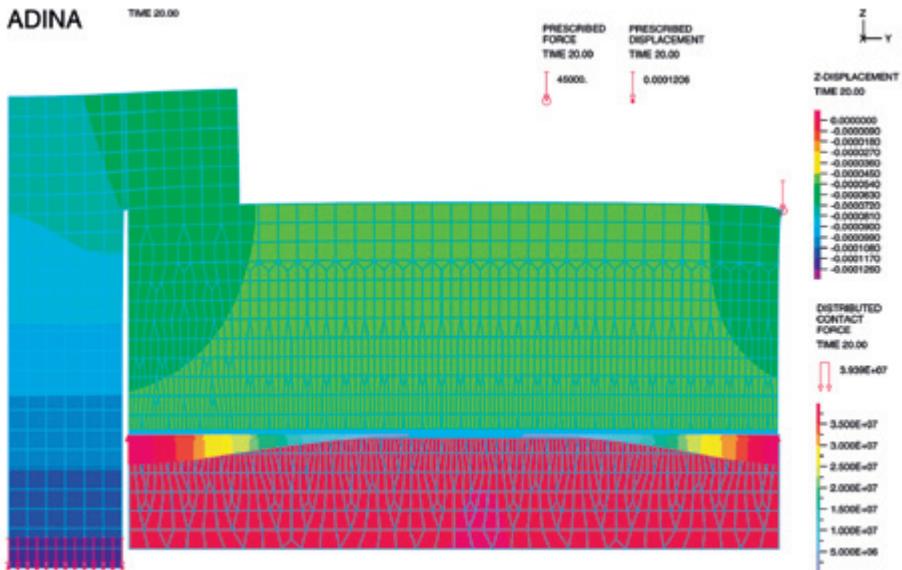


Рис. 8.98. Область поверхности перемещений и распределение контактных давлений в модели болтового соединения с подкладкой, изготовленной из стали, нагруженного внешней силой $F = -282,7 \text{ кН}$

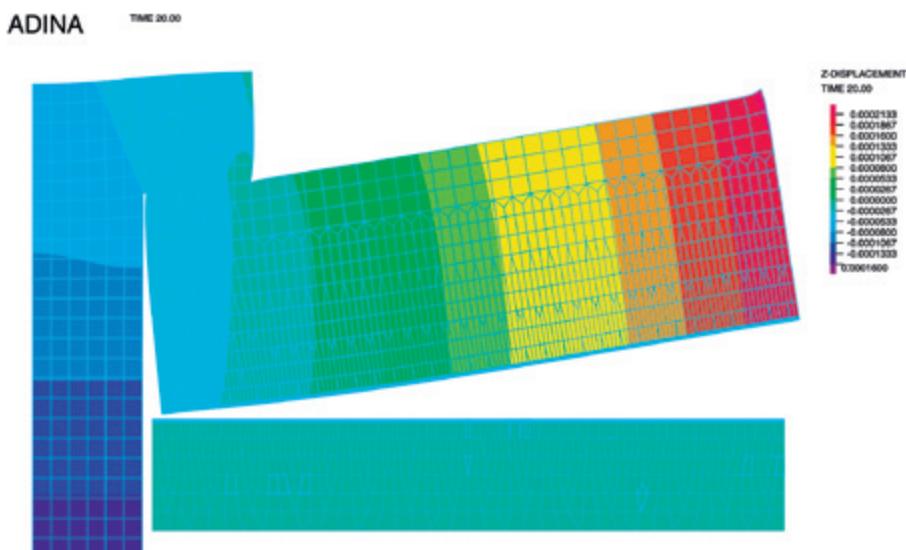


Рис. 8.99. Область поверхности перемещений и распределение контактных давлений в модели болтового соединения с подкладкой, изготовленной из пласти массы и стали, нагруженного внешней силой $F = +282,7 \text{ кН}$

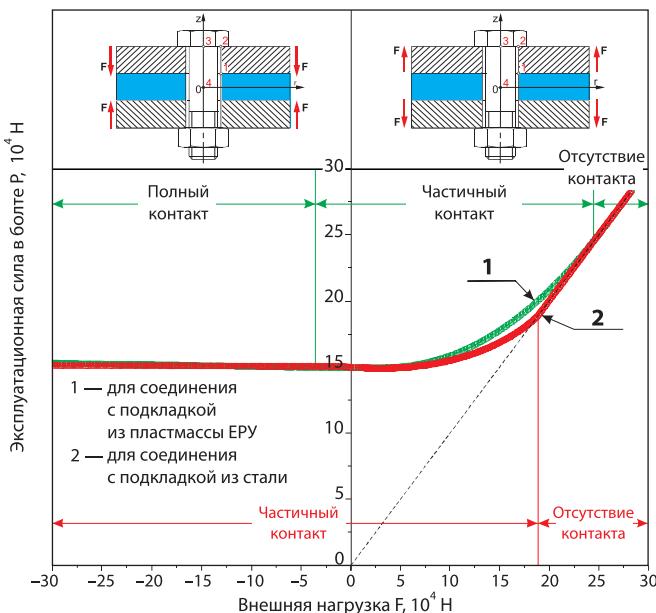


Рис. 8.100. Зависимость эксплуатационной силы P от внешней нагрузки F , приложенной на контуре соединяемых элементов (при $P_0 = 150$ кН)

щих сил зона реального контакта увеличивается. Когда внешние силы F примут величины больше, чем +25 кН, наступает полная потеря контакта основания машины с подкладкой (рис. 8.99).

В болтовом соединении со стальной подкладкой не выступает контакт основания машины с фундаментной подкладкой на всей номинальной поверхностистыка (рис. 8.100, кривая 2). Возможно является только контакт на части поверхности или полное отсутствие контакта (при достаточно больших величинах внешних растягивающих сил, более чем приблизительно +17,5 кН). При сжимающих нагрузках зазор между соединяемыми элементами полностью не исчезает. Это означает, что подкладка переносит сжимающую нагрузку только на некоторой части своей несущей поверхности.

Для сравнения на рис. 8.101 представлена зависимость силы P в болте от внешней нагрузки F , приложенной в оси болтового соединения. Приложенная таким образом внешняя нагрузка является решением, очень часто встречающимся в литературе в области основ конструирования машин [82].

Сравнивая графики, представленные на рис. 8.100 и 8.101, можно заметить существенную разницу. Графики на рис. 8.101 относятся к соединённым элементам, которые считаются жёсткими телами. В действительности эти элементы являются упруго деформированными телами. По этой причине графики, представленные

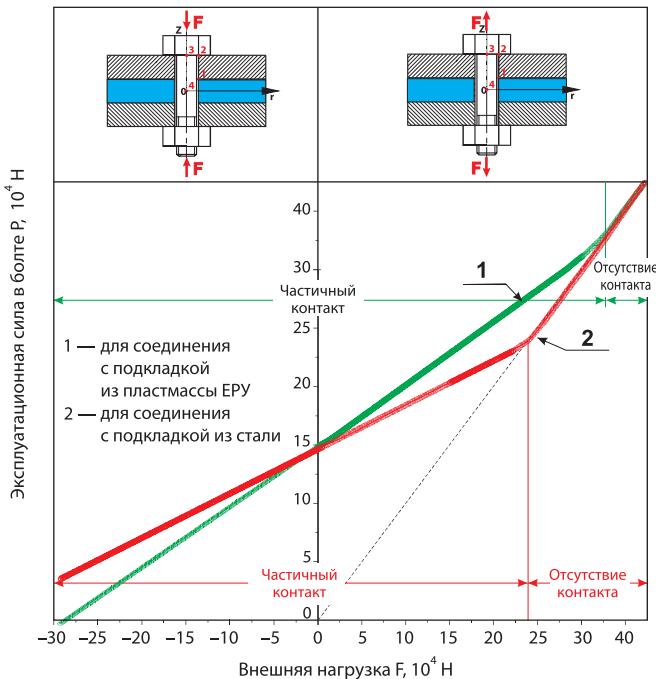


Рис. 8.101. Зависимость эксплуатационной силы P от внешней нагрузки F , приложенной в оси соединяемых элементов (при $P_0 = 150$ кН)

на рис. 8.100, являются более близкими к действительности, чем графики на рис. 8.101. Из них следует (рис. 8.100), что внешние силы (растягивающие до около +10 кН и сжимающие до около -30 кН), действующие на соединяемые элементы, существенным образом не изменяют величин монтажного напряжения болта. В особенности оно не уменьшается при сжимающих нагрузках так, как это следует из рис. 8.101 (для жёстких тел). Благодаря деформациям без изменения объёма соединяемых элементов внешние нагрузки переносятся на подкладку без нагрузки болта. Это является выгодным для болта, особенно при динамических нагрузках.

8.11.5. Влияние изменения температуры на монтажное состояние напряжения и деформации в болтовом соединении с подкладкой из пластмассы

Стальные элементы и подкладка из пластмассы ЕРУ, создающие болтовое соединение, как на рис. 8.89, имеют разную термическую расширяемость, причём величины коэффициента термической расширяемости и модуля упругости для пластмассы существенным образом зависят от температуры (в диапазоне от -20 до +80°C). Таким образом, если принять исходные данные, по которым

монтаж болтового соединения был проведен при температуре +20°C, то при изменении температуры окружающей среды наступят также изменения монтажного состояния напряжения и деформации в этом соединении.

Целью работы, рассматриваемой в этом пункте раздела, было определение при помощи системы MES ADINA изменения монтажного состояния напряжения и деформации в болтовом соединении с подкладкой из пластмассы, как на рис 8.89.

Принято, что внешний диаметр соединения был равен 240 мм, монтаж был выполнен при температуре +20°C, а монтажное напряжение болта равнялось $P_0 = 222500$ Н, после чего это соединение сначала целиком было охлаждено на 40 К (до –20°C), а затем подогрето (с начального состояния 20°C) на 60 К (до +80°C).

Монтажное натяжение болта было задано напряжением $\sigma_z = 315$ МПа, приложенным к сечению его стержня в плоскости $Z = 0$. Это вызвало перемещение этого сечения (рис. 8.102а). Затем была ограничена свобода перемещений этого сечения в направлении оси Z и были определены термические напряжения для пластмассы (на основании собственных исследований):

- при температуре +20°C: $E_{tw} = 6369$ МПа; $v_{tw} = 0,375$; $\alpha_{tw} = 30,0 \times 10^{-6}$ 1/K;
 - при температуре –20°C: $E_{tw} = 8000$ МПа; $v_{tw} = 0,375$; $\alpha_{tw} = 24,7 \times 10^{-6}$ 1/K;
 - при температуре +80°C: $E_{tw} = 5000$ МПа; $v_{tw} = 0,375$; $\alpha_{tw} = 40,4 \times 10^{-6}$ 1/K;
- для стали (постоянные величины): $E_s = 2,1 \times 10^5$ МПа; $v_{st} = 0,28$; $\alpha_{st} = 12,5 \times 10^{-6}$ 1/K.

Результаты расчётов представлены на рис. 8.102. Рис. 8.102а показывает распределение контактных нагрузок и площадь сокращённых напряжений в болтовом соединении после его монтажа при температуре +20°C. Рисунки 8.102б и 8.102в представляют те же самые величины после охлаждения соединения на 40 К (до –20°C) и его подогрева на 60 К (до +80°C).

Из проведенных исследований следует, что изменение температуры соединения в принятом диапазоне вызывает некоторые изменения контактных нагрузок, причём понижение температуры вызывает некоторое падение поверхностных нагрузок, а повышение температуры — их увеличение.

Монтажные напряжения в болте равны:

- при температуре +20°C: $P_0 = 222500$ Н (начальное состояние);
- при температуре –20°C: $P_0 = 217712$ Н (понижение на 2,15%);
- при температуре +80°C: $P_0 = 267193$ Н (повышение на 20,0%).

Увеличение напряжения болта и величин контактных нагрузок на подкладку при повышении температуры окружающей среды, появляющейся во время работы двигателя или иного устройства, является выгодным для фундаментных болтовых соединений. В реальных системах обычно не выступают такие изменения температуры, особенно охлаждение до –20°C. Таким образом колебания предварительного напряжения болта проходят в пределах значительно больших, чем вышеуказанные.

Определение состояния напряжения и деформации в болтовых соединениях с фундаментной подкладкой

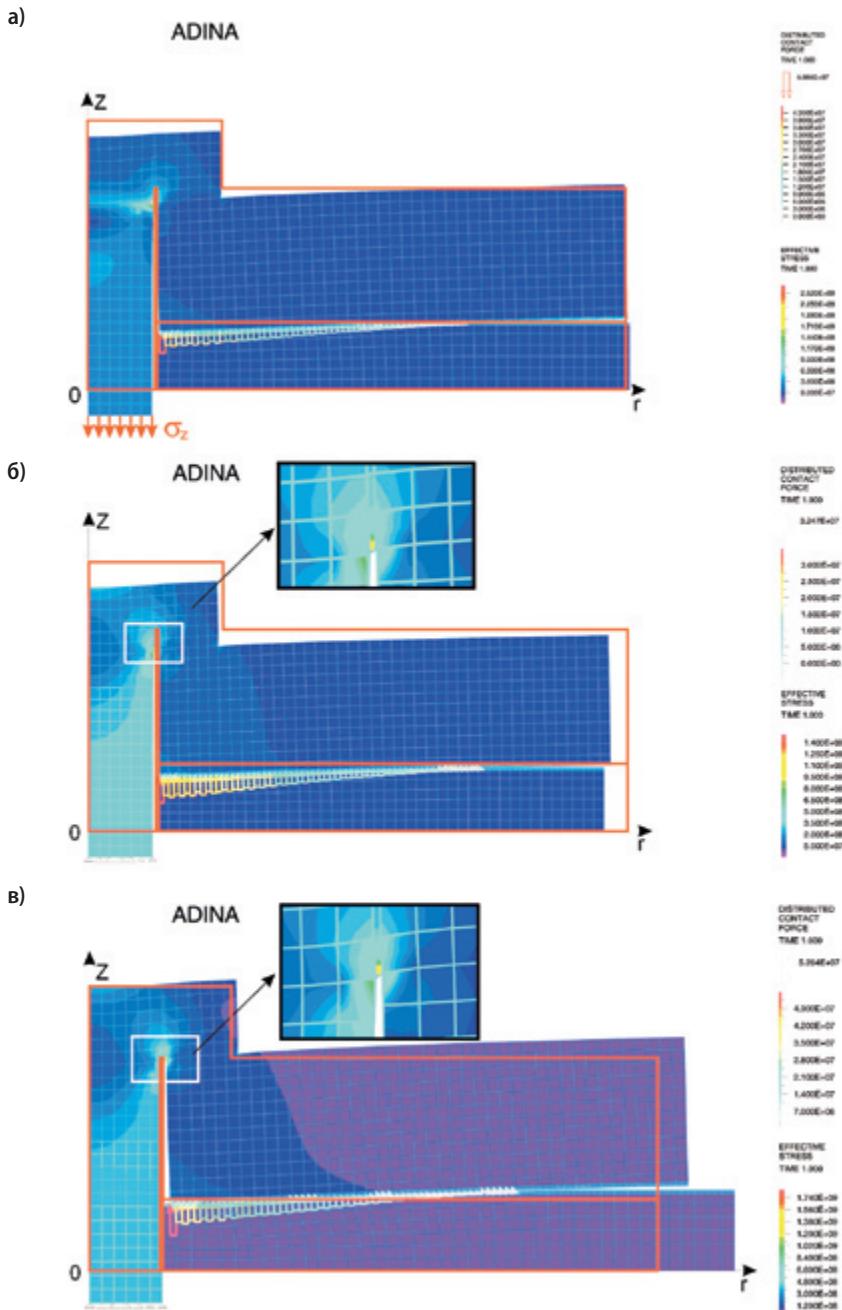


Рис. 8.102. Деформированные сетки конечных элементов, области приведенных напряжений и распределение нормальных нагрузок на фундаментную подкладку в состоянии монтажа (а), а также после охлаждения (б) и после подогрева (в) соединения

8.11.6. Итоги и выводы

Фундаментное болтовое соединение с подкладкой, отлитой из пластмассы (а также со стальной подкладкой), является сложной нелинейной системой неоднородных тел, трудной для моделирования и расчётов. Моделирование этой системы требует учёта многих сложных геометрических и материальных факторов, а также сложных контактных явлений. Такие системы нельзя решать известными аналитическими методами теории упругости. В настоящее время это стало возможным благодаря применению численных методов и продвинувшихся вперёд программ MES (напр. системы MES ADINA).

Принятая в этой работе немногого упрощённая модель фундаментного болтового соединения с подкладкой сделала возможным определение в ней монтажного и эксплуатационного состояния напряжений и деформации, а также анализ влияния разных факторов на величину зоны контакта, размещения и величины поверхностных нагрузок, поверхности перемещений элементов соединения, а также силы в болте в функции заданных условий монтажа, внешних нагрузок и изменений температуры системы.

Сравнительный анализ полученных результатов расчётов подтвердил, что применение пластмассы для фундаментных подкладок машин вместо традиционно применяемой стали обеспечивает большую зону реального контакта фундаментных подкладок с основанием машины, а также более равномерное размещение поверхностных нагрузок. Это касается как монтажного состояния, так и эксплуатационного. В результате это даёт большую надёжность и прочность фундаментным болтовым соединениям.

Повышение температуры болтового соединения с подкладкой из пластмассы, вызванное эксплуатацией машины или условиями окружающей среды, влечёт за собой некоторое небольшое (до 20%) увеличение напряжения фундаментного болта, что в результате является выгодным для машины. Некоторое небольшое уменьшение напряжения болта выступает при понижении температуры, что может иметь место тогда, когда устройство находится в открытом пространстве, например на палубе судна.

Фундаментные болтовые соединения реальных машин и устройств обычно являются более сложными, чем модели, рассмотренные в этой работе, как в физическом, так и в геометрическом отношении.

Анализ их статических и динамических состояний в настоящее время является возможным, однако требует применения более сложных моделей, соответственно расширенных программ, а также компьютеров с большой расчётной мощностью, что связано со значительными финансовыми расходами.

Литература

- [1] Wärtsilä 32 — Project guide, 15. Foundation, W 32-1/2008
- [2] Технологические рекомендации по пригонке стальных подкладок под главные двигатели, Stocznia Szczecińska, TT-01/432, Szczecin 1969 (непубликованное)
- [3] Gramashev D.L.: Монтаж судового механического оборудования. Leningrad, Izdat. „Судостроение” 1968
- [4] Конструкции для борьбы с вибрацией на судах. Biul.Informacyjny CBKO, 1965, Nr 7, s. 49
- [5] Biber W.: Упругая подвеска двигателей общей мощностью 19850 лс в машинном отделении „Koningin Julianan”. Biul. Informacyjny CBKSS, 1969, Nr 6, s. 10
- [6] Crede Ch.: Vibration and Shock Isolation. London, John Wiley and Sons 1962
- [7] Rivlin F. I.: Principles and criteria of vibration isolation of machinery. Trans. of the ASME, J. of Mechanical Desing, 1979, vol. 101, No. 4, s. 682—692
- [8] Установка двигателей внутреннего сгорания на пневматических подушках для предупреждения вибрационных колебаний, Marine Engineer, 1965, No. 1068, s. 138
- [9] Presz A.: Упругое крепление двигателей на судах и локомотивах, Silniki Spalinowe, 1963, Nr 2, s. 45—54
- [10] Gittert H.: Упругое крепление двигателей с малым количеством цилиндров. Biuletyn Informacyjny CBKSS, 1970, nr 10, s. 10
- [11] Waśko L.: Вибрация машин с упругим креплением на податливом фундаменте при негармоничном воздействии. Praca doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 1972 (непубликованное)
- [12] Wodzicki W.: Вибрация машин с деформируемыми корпусами, эластично подкрепленными податливой конструкцией, praca doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 1972 (непубликованное)
- [13] Упругое крепление судовых устройств, oprac. CTO, TWD-33/65, TWD-36/69, Gdańsk 1965, 1969 (непубликованное)
- [14] Инструкция сборки электроагрегатов на упругих амортизаторах рельсового типа, oprac. Stocznia Szczecińska, TT-01/404-„A”, Szczecin 1969 (непубликованное)
- [15] Pietras Z.: Вынужденные колебания судовых двигателей внутреннего сгорания, установленных на упругих подкладках. Budownictwo Okrętowe, 1973, Nr 3, s. 132
- [16] Kułakowski J.: Метод подбора элементов для упругой посадки двигателей. Silniki Spalinowe, 1969, Nr 4, s. 48
- [17] Rutkowski J.: Реальные возможности уменьшения шума на судах. Silniki Spalinowe, 1972, Nr 3, s. 27
- [18] Szmaleńberg Z., Gniewek-Węgrzyn M.: Упругое крепление главного двигателя на пассажирском пароме B490. Budownictwo Okrętowe, 1977, Nr 5
- [19] Łopatowa H.: Проблема подбора оптимальных параметров виброизоляции для механических систем. Wibroakustyka, Kraków, Wydawnictwo AGH 1976
- [20] Grabowski M.: Подбор виброизоляторов и определение эффективности виброизоляции. Przegląd Mechaniczny, 1976, Nr 7, s. 225
- [21] Tomaszewski K.: Проблема управляемости параметров виброизоляции. Виброакустика, Kraków, Wydawnictwo AGH 1976

- [22] Goliński J.A., Bulzak-Mrozowska L.: *Виброизоляция*. Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1976
- [23] Cempel Cz.: *Практическая виброакустика*. Warszawa—Poznań, PWN 1978
- [24] Pisarenko G.S., Jakowlew A.P., Matwiejew W. W.: *Свойства гашения колебаний конструкционных материалов*. Warszawa, WNT 1976
- [25] Grudziński K., Jaroszewicz W., Lorkiewicz J.: *Установка машин на пластмассовых подкладках*. Przegląd Mechaniczny, 1983, Nr 21, s. 9—15
- [26] Grudziński K., Jaroszewicz W., Lorkiewicz J.: *Chemohardened plastic chocks in ship machinery foundations*. Budownictwo Okrętowe, 1986, Nr 11, s. 479—484
- [27] Grudziński K.: *Развитие польских пластмасс и методы установки на них судовых машин и устройств*. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska, 1993, lipiec—sierpień, s. 11—13
- [28] Grudziński K., Jaroszewicz W.: *Сертификат ISO 9002 для польской пластмассы EPY и установки на ней судовых двигателей*. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska, 1995, Nr 1, s. 11—13
- [29] Grudziński K., Jaroszewicz W., Kołodziejski W., Klimczak R.: *Новый способ ремонта монтажа тяжелых машин и устройств на примере мотокомпрессоров GMVH-12*. Przegląd Mechaniczny, 1995, z. 21, s. 21—24
- [30] Grudziński K., Jaroszewicz W.: *Специальная пластмасса для фундаментных подкладок под судовые машины и устройства*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt.: „Nowe materiały — nowe technologie w przemyśle okrętowym i maszynowym” Szczecin—Świnoujście 10—13.09.1998, Tom I, s. XXIII—XXX
- [31] Grudziński K., Ratajczak J., Jaroszewicz W.: *Применение специальной полимерной пластмассы EPY для монтажа мостовых подшипников*. Międzynarodowa Konferencja EKO MOST 2006; Organizator: Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2006, Kielce, Referaty, s. 125—133
- [32] Grudziński K., Ratajczak J., Jaroszewicz W.: *Применение специальной полимерной пластмассы при монтаже машин и устройств, устанавливаемых в карьерах*. Górnictwo Odkrywkowe, 2008, nr 1, s. 51—56
- [33] Grudziński K., Grudziński P.: *Традиционный и современный способы монтажа тяжелых поршневых компрессоров на бетонных фундаментах*. Przegląd Mechaniczny, 2009, nr 5, s. 15—21
- [34] Grudziński K.: *Роль, моделирование и расчет соединений элементов в машинных конструкциях*. Materiały XIII Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin—Świnoujście 1987, Referaty Problemowe, s. 61—87
- [35] Kałuziński S.: *Уточненные способы расчета болтовых соединений*. Silniki Spalinowe, 1972, Nr 1, s. 20—30
- [36] Grudziński K., Jaroszewicz W., Konowalski K.: *Исследование влияния лакокрасочных покрытий на оседание машин и судовых устройств, установленных на подкладках из пластмассы EPY*. Budownictwo Okrętowe i Gospodarska Morska, 1997, Nr 10, s. 23—28
- [37] Ratajczak J.: *Виброизоляционные свойства пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок судовых машин и устройств*. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Szczecińska, Wydział Techniki Morskiej, Szczecin, 1995 (непубликованное)
- [38] Kawiak R., Grudziński K., Grudziński P., Jaroszewicz W.: *Research into strength and vibroinsulation properties of EPY plastic*. Polish Maritime Research, 1994, No. 1, pp. 17—21
- [39] Grudziński P.: *Моделирование и исследования упруго-демпфирующих свойств пластмасс, применяемых при установке машин*. Praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Szczecin 1998 (непубликованное)
- [40] Ratajczak J., Grudziński K.: *Исследования упругих и демпфирующих свойств пластмассы EPY при малых величинах сжимающих напряжений*. Materiały Konferencji Naukowo-

- Technicznej nt.: „Nowe materiały — nowe technologie materiałowe w przemyśle okrętowym i maszynowym, Szczecin—Świnoujście 1998, Tom II, s. 679—684
- [41] Polski Rejestr Statków: Требования к фундаментным подкладкам из пластмасс. Публикация nr 3/I, Gdańsk 1981
- [42] Smith W.: Resin chocks. Paper No. 2, Session, London, Lloyd's Register Technical Association 1984—85
- [43] Germanischer Lloyd: 5. Richtlinien über die Zulassung von Reaktionskunststoffen und Verbundwerkstoffen zur Fundamentierung und Instandsetzung von Bauteilen, 2006
- [44] Test on curing exotherm and selected mechanical and physical properties of the EPY compound carried out in order to update the Lloyd's Register of Shipping certificate for this material. Report No 4/2012, West Pomeranian University of Technology, Department of Mechanics and Machine Elements, Szczecin, February 2012
- [45] Regulation (EU) No 391/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on common rules and standards for ship inspection and survey organizations. Official Journal of the European Union, L131, 28.5.2009
- [46] EU mutual Recognition within ship classification. First Report of the European Commission and the Member State. Oct. 2012 (12.8, Resin chocks)
- [47] Kawiak R.: Определение и анализ напряжений и перемещений в болтовом соединении с учетом контактной податливости. Praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Szczecin 1984 (непубликованное)
- [48] Lorkiewicz J., Grudziński K., Jaroszewicz W.: Способ изготовления химически отвердевающих фундаментных подкладок, особенно для судостроения. Opis patentowy nr 134437 z 31.12.1980, Urząd Patentowy PRL Warszawa 1987
- [49] Jaroszewicz W., Kownacki S., Lorkiewicz J., Łabuć L.: Фундаментное болтовое соединение с призонными болтами в пластмассе EPY, преимущественно для установки судовых машин и устройств. Opis patentowy nr 141627 z 2.07.1984, Urząd Patentowy PRL, Warszawa 1988
- [50] Jaroszewicz W., Łuba A.: Способ изготовления химически отвердевающих фундаментных подкладок. Opis patentowy nr 274878 z 14.04.1989, Urząd Patentowy PRL, Warszawa 1993
- [51] Enns J. B. , Gillham J. K., Time-tempeature-transformation (TTT) cure diagram. Modelling of the cure behaviour of thermosets. J. Appl. Polym. Sci., 1983, vol. 28, pp. 2567—2591
- [52] Gillham J.K., Formation and properties of thermosetting and high T_g polymeric materials. Polym. Eng. Sci., 1986, 26, pp. 1429—1433
- [53] Prime R.B.: Thermosets. Thermal characterization of polymeric materials, ed. E. A. Turi, 2nd edition, Academic Press, London, vol. 2, 1997, pp. 1379—1766
- [54] Plazek D.J., Frund Z.N.: Epoxy resins (DDEBA): The curing and aging process. J. Polym. Phys., 1990, vol. 28, pp. 431—448
- [55] Oleinik E.F.: Epoxy-aromatic amine networks in the glassy state structure and properties. Adv. Polym. Sci., 1986, vol. 80, pp. 49—99
- [56] Ramis X., Cadenato A., Moráncho J. M., Salla J.M.: Curing of a thermosetting powder coating by means of DMTA, TMA and DSC. Polemer, 2003, vol. 44, pp. 2067—2079
- [57] Florjańczyk Z., Penczek S.: Химия полимеров. Макромолекулы и методы их получения, т. 1. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995
- [58] Aronhime M.T., Gillham J.K.: Time-temperature-transformation (TTT) cure diagram of thermosetting polymeric systems. Adv. Polym. Sci., 1986, vol. 78, pp. 83—113
- [59] Mark H.F., Bikales N.M., Overberger C.G., Menges G., Cross-linking, in: Encyclopedia of polymers science and engineering, vol. 4, 2nd edition. A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, New York, 1986, pp. 350—395

- [60] Dušek K.: *Network formation in curing of epoxy resins*, Adv. Polym. Sci., 1986, vol. 78, pp. 1—59
- [61] Dušek K., Dušková-Smrčková M.: *Network structure formation during crosslinking of organic coating system*. Prog. Polym. Sci., 2000, vol. 25, pp. 1215—1260
- [62] Vyazovkin S., Sbirrazzuoli N.: Kinetic analysis of isothermal cures performed below the limiting glass transition temperature. Macromol. Rapid Commun., 2000, vol. 21, pp. 85—90
- [63] Luňák S., Vladyka J., Dušek K.: Effect of diffusion control in the glass transition region on critical conversion at the gel point during curing of epoxy resins. Polymer, 1978, vol. 19, pp. 931—933
- [64] Guibe C., Francillette J.: Time-temperature-transformation (TTT) cure diagrams: relationships between T_g , cure temperature and time for DGEBA/DETA systems. J. Appl. Polym. Sci., 1996, vol. 62, pp. 1941—1951
- [65] Montserrat S.: Vitrification and further structural relaxation in the isothermal curing of an epoxy resin. J. Appl. Polym. Sci., 1992, vol. 44, pp. 545—554
- [66] Czub P., Bończa-Tomaszewski Z., Penczek P., Pielichowski J.: *Химия и технология эпоксидных смол*. Warszawa, WNT 2002
- [67] Žuchowska D.: *Конструкционные полимеры*. Warszawa, WNT 2000
- [68] Gillham J.K.: Torsional Braid Analysis (TBA) of polymers, in: *Developments in polymer characterization*, vol. 3, ed. J.V. Dawkins, London, Applied Science, 1982, pp. 159—227
- [69] Theriault R.P., Wolfrum J., Ehrenstein G.W.: *Härtungsverlauf von Harzsystemen. Charakterisierung mittels TTT-Diagramm*. Kunststoffe, 1999, vol. 89, S. 112—116
- [70] Bryant E., Chartoff R.: *Crosslink density and the glass transition in thermosetting polymers*. CME 509 Introduction to polymers, paper, University of Dayton 1998, http://www.udri.udayton.edu/rpd1/Paper_CROSdens/Paper.htm
- [71] Mark H.F., Bikales N.M., Overberger C.G., Menges G.: *Curing*, in: *Encyclopedia of polymers science and engineering*, vol. 4, 2nd edition. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York 1986, pp. 519—524
- [72] Mark H.F., Bikales N.M., Overberger C.G., Menges G.: *Epoxy resins*, in *Encyclopedia of polymers science and engineering*, vol. 6, 2nd edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York 1986, pp. 322—382
- [73] Flory P.L.: *Principles of polymer chemistry*, 15th edition. New York, Cornell University Press 1992
- [74] Simon S.L., Gillham J.K.: Reaction kinetics and TTT cure diagrams for off-stoichiometric ratios of a high- T_g epoxy /amine system. J. Appl. Polym. Sci., 1992, vol. 46, pp. 1245—1270
- [75] Pang K.P., Gillham J.K.: Competition between cure and thermal degradation in a high T_g epoxy system: effect of time and temperature of isothermal cure on the glass transition temperature. J. Appl. Polym. Sci., 1990, vol. 39, pp. 909—933
- [76] Núñez L., Fraga F., Núñez M.R., Villanueva M.: Thermogravimetric study of the decomposition process of the system diglycidyl ether of bisphenol A/1,2 diamine cyclohexane. Polymer, 2000, vol. 41, pp. 4635—4641
- [77] Chan L.C., Naé H.N., Gillham J.K.: Time-temperature-transformation (TTT) diagrams of high T_g epoxy systems: competition between cure and thermal degradation. J. Appl. Polym. Sci., 1984, vol. 29, pp. 3307—3327
- [78] Adabbo H.E., Williams R.J.: *The evolution of thermosetting polymers in a conversion-temperature phase diagram*. J. Appl. Polym. Sci., 1982, vol. 27, pp. 1327—1334
- [79] Pascault J.P., Sautereau H., Verdu J., Williams R.J.J.: *Thermosetting Polymers*. New York, Marcel Dekker 2002, pp. 119—145
- [80] Williams R.J.J.: *Curing of Thermosets*, in: *Developments in Plastics Technology*, ed. A. Whelan, J.L Craft, vol. 2, London, Elsevier Applied Science 1985, pp. 339—379
- [81] Nielsen L.E.: *Cross-linking. Effect on physical properties of polymers*. J. Macromol. Sci. Rev. Macromol. Chem., vol. C3, 1969, pp. 69—103

- [82] Velázquez P., González-Alvarez A., González-Romero V.M., Arellano M.: *Rheological monitoring of curing reaction of an epoxy system: effect of heating rate*. Polym. Bulletin, 2000, vol. 43, pp. 519—526
- [83] Wang X., Gillham J.K.: *T_g-Temperature - Property (T_gTP) diagram for thermosetting systems: Anomalous behavior of physical properties vs. extent of cure*. J. Appl. Polym. Sci., 1993, vol. 47, pp. 425—446
- [84] Gillham J.K., Enns J.B.: On the cure and properties of thermosetting polymers using torsional braid analysis. Trends Polym. Sci. 1994, vol. 2, pp. 406—419
- [85] Wisanrakkit G., Gillham J.K.: The glass transition temperature (T_g) as an index of chemical conversion for a high-T_g amine/epoxy system: chemical and diffusion-controlled reaction kinetics. J. Appl. Polym. Sci., 1990, vol. 41, pp. 2885—2929
- [86] Pascault J.P., Williams R.J.: Glass transition temperature versus conversion relationships for thermosetting polymers. J. Polym. Sci. Polym. Phys., 1990, vol. 28, pp. 85—95
- [87] Urbaniak M.: Исследования процесса упрочнения и его влияние на механические свойства эпоксидной пластмассы ЕРУ, применяемой для фундаментных подкладок машин. Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, praca doktorska 2005 (непубликованное)
- [88] Urbaniak M., Grudziński K.: Time-Temperature-transformation (TTT) cure diagram for EPY epoxy system. Polimery, 2007, vol. 52, pp. 117—126
- [89] Núñez L., Taboada J., Fraga F., Núñez M.R.: *Kinetics study and TTT cure diagram for an epoxy—diamine system*. J. Appl. Polym. Sci., 1997, vol. 66, pp. 1377—1388
- [90] Urbaniak M.: Гелеобразование и физическое старение во время структурирования эпоксидной пластмассы ЕРУ. Tworzywa Sztuczne i Chemia, 2007, vol. 2, s. 38—42
- [91] Urbaniak M., Grudziński K.: Conversion – Temperature – Transformation (CTT) cure diagram for EPY epoxy system, Polimery, 2007, vol. 52, pp. 255—258
- [92] Urbaniak M.: A relationship between the glass transition temperature and the conversion degree in the curing reaction of the EPY epoxy System. Polimery, 2011, vol. 56, s. 240—243
- [93] Urbaniak M.: The effect of conversion degree on the dynamic and static mechanical properties of the EPY epoxy material. Inżynieria Materiałowa, 2010, vol. 6, s. 1146—1152
- [94] Urbaniak M.: Прогнозирование прогресса процесса структурирования эпоксидной пластмассы ЕРУ. Tworzywa Sztuczne w Przemyśle, 2010, 6, s. 37—40
- [95] Urbaniak M.: Glass transition temperature – temperature – property (T_gTP) diagram for EPY epoxy system. Polimery, 2008, vol. 53, s. 537—543
- [96] Germanischer Lloyd: *Richtlinien für die maschinenbauliche Fundamentierung von Antriebs- und Hilfsmaschinenanlagen*. Hamburg 2010; Internet: www.gl-group.com/infoServices/rule/pdfs/gl_vi-4-3_d.pdf
- [97] Germanischer Lloyd: Richtlinien für die maschinenbauliche Fundamentierung von Antriebsanlagen. Anhang C, Hamburg 1995
- [98] Marine Service Jaroszewicz: Монтаж главных двигателей и передач. Procedura P-08/4.9/V z dnia 05.02.2000, Szczecin 2000 (непубликованное)
- [99] Jaroszewicz W., Łuba A.: Патент № 15855 1 на изобретение п. н. "Способ изготовления химически отвердевающих фундаментных подкладок". Warszawa 1993
- [100] Barber Colman Company: *A Hand-Held Portable Hardness Tester*. Product Information 1260/DB 10-2, Loves Park, August 1989
- [101] Marine Service Jaroszewicz: Карта характеристики опасного химического вещества, пластмасса ЕРУ. Szczecin 2001 (непубликованное)
- [102] Zakłady Chemiczne „Organika-Sarzyna” w Nowej Sarzynie: Карта характеристики опасного химического вещества, Отвердитель Z-1. Nowa Sarzyna 2000 (непубликованное)
- [103] Doerffer J.: Технология оборудования судов. Gdańsk, Wydawnictwo Morskie 1975
- [104] Pohl K.: Щецинские суда для перевозки химикалий. Szczecin, Wyd. Stoczni Szczecińska Nowa Sp. z o.o., 2007

- [105] Smally A.J., Mandke J.S., Pantermuehl P.J., Drummond R.D.: *Reciprocating Compressor Foundations: Loading, Design, Analysis, Monitoring & Repair*. Gas Machinery Research Council (USA), Report No. TA 93
- [106] Mandke J.S., Smally A.J.: Parameter Studies for Enhanced Integrity of Reciprocating Compressor Foundation Blocks. Gas Machinery Research Council (USA), Report No. TA 94-1
- [107] Smally A.J.: Crankshaft Protection: Guidelines for Operators of Slow Speed Integral Engine/Compressors. Gas Machinery Research Council (USA), Report TR 97-1
- [108] Smally A.J., Pantermuehl P.J.: *Foundation Guidelines*. Gas Machinery Research Council (USA), Report No. TR 97-2
- [109] Pantermuehl P.J. and Smally A.J.: *Compressor Anchor Bolt Design*. Gas Machinery Research Council (USA), Report No. TR 97-6
- [110] *Guidelines for Vibrations in Reciprocating Compressor*. First Edition. European Forum Reciprocating Compressors (EFRC), Nov. 2009
- [111] Grudziński K.: Сравнительный анализ монтажа поршневых машин на бетонных фундаментах и на стальных конструкциях. Przygotowany dla: Spółki Operator Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A. w Warszawie, raport nr 1/08, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2008 (непубликованное)
- [112] Polski Rejestr Statków: Правила классификации и постройки морских судов, часть 11. Материалы, Gdańsk 1974
- [113] DiBenedetto A.T.: Prediction of the glass transition temperature of polymers: A model based on the principle of corresponding states. *J. Polym. Sci. Part B, Polym. Phys.* 1987, vol. 25, pp. 1949—1969
- [114] Cauchman P.R.: Thermodynamics and the compositional variation of glass transition temperatures. *Macromolecules* 1987, vol. 20, pp. 1712—1717
- [115] Karkanas P.I., Partridge I.K.: Cure modeling and monitoring of epoxy/amine resin systems. II. Network formation and chemoviscosity modeling. *J. Appl. Polym. Sci.* 2000, vol. 77, pp. 2178—2188
- [116] Karkanas P.I., Partridge I.K.: Cure modeling and monitoring of epoxy/amine resin systems. II. Network formation and chemoviscosity modeling. *J. Appl. Polym. Sci.* 77 (2000), pp. 2178—2188
- [117] Núñez L., Fraga F., Castro A., Núñez M.R., Villanueva M.: TTT cure diagram for an epoxy system diglycidyl ether of bisphenol A/1,2 diamine cyclohexane/calcium carbonate filler. *Polymer* 2001, vol. 42, pp. 3581—3587
- [118] Ashby M.F., Jones D.R.: Инженерские материалы. Формирование структуры и свойств, подбор материалов, т.2 Warszawa WNT 1996
- [119] Lesser A.J., Kody R.S.: A generalized model for the yield behavior of epoxy networks in multiaxial stress states, *J. Polym. Sci. Polym. Phys.* 1997, vol. 35, pp. 1611—1619
- [120] Urbaniak M., Grudziński K.: Влияние температуры на механические характеристики эпоксидной пластмассы EPY, подвергнутой сжимающим нагрузкам. *Kompozyty* 2006, R. 6, nr 1, s. 20—25
- [121] Urbaniak M., Grudziński K.: Влияние скорости деформации на механические характеристики эпоксидной пластмассы EPY, подвергнутой сжимающим нагрузкам. *Kompozyty* 2006, R. 6, nr 4, s. 24—28
- [122] Urbaniak M., Grudziński K.: Исследование термомеханических свойств эпоксидной пластмассы EPY. *Tworzywa Sztuczne i Chemia* 2005, nr 6, s. 30—33
- [123] Urbaniak M.: Использование модели пластиичности Argon'a для прогнозирования прочностных свойств эпоксидной пластмассы EPY. *Inżynieria Materiałowa*, 2007, vol.155, s. 26—30
- [124] Urbaniak M.: Использование модели Bowden'a для прогнозирования границы пластиичности эпоксидной пластмассы EPY. *Inżynieria Materiałowa*, 2008, vol. 161, s. 37—41

- [125] Urbaniak M.: Модели пластичности Eyring'a и Robertson'a, касающиеся эпоксидной пластмассы EPY. Polimery, 2008, vol.53, nr 1, s. 40—46
- [126] Germanischer Lloyd: Richtlinien über die Zulassung und Werkstoffen (Reaktionsharze) zur Installierung und Fundamentierung von Bauteilen, Hamburg 1992
- [127] Urbaniak M.: Термические характеристики эпоксидной пластмассы EPY, существенные для её применения для фундаментных подкладок машин. Tworzywa Sztuczne i Chemia, 2008, nr 3 (40), s. 60—65
- [128] Urbaniak M., Markiewicz J.: *Determination of coefficient of linear thermal expansion for EPY material*, Report No. 1/2004, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2004 (непубликованное)
- [129] ASTM D 696; Standard test method for coefficient of linear thermal expansion of plastics between -30°C and 30°C
- [130] *Panorm об исследованиях ползучести и теплового прогиба пластмассы EPY*. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1994 (непубликованное)
- [131] Krukowski A., Tutaj J.: Деформационные соединения. Warszawa, PWN 1987
- [132] Konowalski K., Ratajczak J., Tuczyński L.: Исследования влияния охлаждения пластмассы EPY в жидким азоте на её прочность на сжатие и ударную вязкость. Raport nr 1/96, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1996 (непубликованное)
- [133] Отчёт об исследованиях влияния WGS на диэлектрические свойства пластмассы EPY. Politechnika Szczecińska, Instytut Elektrotechniki, Szczecin 1995 (непубликованное)
- [134] Stühler W.: Dämpfung — Entstehung, Beschreibungsformen, Auswirkung und Abhängigkeiten; Grundreferat, VDI-Berichte Nr 1082, Düsseldorf 1993, S. 85—105
- [135] Goliński J.A.: Виброзоляция машин и устойств. Warszawa, WNT 1979
- [136] Cremer L., Heckl M.: Körperschall. Berlin, Springer Verlag 1982
- [137] Исследования динамических свойств пластмасс, применяемых для фундаментных подкладок при монтаже машин и устройств. Sprawozdanie merytoryczne z wykonania projektu badawczego KBN nr 7 T07C0 16 11, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1995 (непубликованное)
- [138] Demkin N.B.: Контактирование шероховатых поверхностей. Moskva, Izdat. Nauka 1970
- [139] Johnson K.L.: Contact mechanics. Cambridge University, Cambridge, Press 1987
- [140] Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: Сопротивление материалов. wyd. XIII, Warszawa, PWN 1984
- [141] Kawiak R., Grudziński K., Grudziński P., Jaroszewicz W.: Research into strength and vibroinsulation properties of EPY plastic. Polish Maritime Research, 1994, nr 1, pp. 17—21
- [142] Kawiak R.: Характеристики болтовых соединений с выравнивающими подкладками, изготовленными из химически отвердевающей пластмассы. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 1995, z. 14, s. 245—254
- [143] Kawiak R.: Применение полимерных компонентов для модификации свойств болтовых соединений. Mat. VIII Seminarium: Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn, Kraków 1997, s. 169—173
- [144] Grudziński K., Skierkowski A., Jaroszewicz W. i in.: Panorm об анализе конструкции и модельных испытаниях монтажа дейдвудной трубы при применении пластмассы EPY. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1994 (непубликованное)
- [145] DREWEL J.: Протокол измерений коэффициента теплопроводности химически отвердевающей пластмассы EPY. Politechnika Szczecińska, Katedra Techniki Cieplnej, Szczecin 1990 (непубликованное)

- [146] Grudziński K., Kawiak R., Tuczyński L.: *Коэффициент линейного термического расширения пластмассы EPY для подкладок.* Wyniki badań nr 17/1991, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1991 (непубликованное)
- [147] Cudny K.: *Линии судовых валов.* Gdańsk, Wydawnictwo Morskie 1976
- [148] Grudziński K., Jaroszewicz W., Parosa R., Reszke E.: *Микроволновое отверждение фундаментных подкладок судовых двигателей, литых из химически отвердевающей пластмассы EPY.* Materiały Konferencyjne „Postępy w Elektronice”, Szklarska Poręba 1994
- [149] Grudziński K., Jaroszewicz W.: *Microwave curing of chocks cast in EPY compound for use in ship machinery seating.* Marine Technology and Transportation, Southampton, Boston, Computational Mechanics Publications 1995, pp. 309—315
- [150] Ratajczak D.: *Микроволновое отверждение пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок судовых машин и устройств.* Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Szczecińska, Wydział Techniki Morskiej, Szczecin 1995 (непубликованное)
- [151] Ratajczak J.: *Применение микроволн в процессе изготовления фундаментных подкладок, литых из эпоксидной пластмассы EPY®.* Rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Szczecin 2006 (непубликованное)
- [152] Kawiak R.: *Исследование предельной нагрузки анкеровок болтов в бетоне, изготовленных с использованием пластмассы EPY.* Raport nr 1/98, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1998 (непубликованное)
- [153] Kawiak R.: *Осаживание фундаментных болтов при помощи полимерных компонентов.* Mat. XIX Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, Zielona Góra—Świnoujście, wrzesień 1999, Materiały, s. 481—486
- [154] Техника креплений. Katalog HILTI, Schaan 1996
- [155] Wałach D.: *Адгезия бетонов высокого качества к арматурной стали.* Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu: XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki 2004, s. 1—9
- [156] Исследования виброакустических свойств пластмассы EPY, а также возможности ее использования для редукции вибраций и изоляции ударных шумов. Sprawozdanie merytoryczne z wykonania projektu badawczego nr N N502 194938, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2013
- [157] Grudziński P.: *Моделирование и анализ прочности фундаментного болта, заанкерованного в бетонном блоке при помощи полимерной пластмассы.* Modelowanie Inżynierskie, t. 11, nr 42, grudzień 2011, s. 147—154
- [158] Энциклопедия техники. Budowa Maszyn, Warszawa, WNT 1968
- [159] Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen, Richtlinien VDI 2230, Blat 1, VDI-Verlag 2003
- [160] Dietrych M. (red.): *Основы конструкции машин.* T. 2, Warszawa, PWN 1988
- [161] Grudziński K., Sobczak Ł.: *Моделирование и расчёт при помощи MES болтового соединения со слоем полимерного компонента.* Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska 2001, nr 15, s. 125—130
- [162] Urbaniak M., Mieczkowski W., Markiewicz J.: *Исследование влияния низких температур на механические свойства пластмассы.* Raport nr 37/2008, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2008 (непубликованное)
- [163] Sindt O., Perez J., Gerard J.F.: *Molecular architecture-mechanical behaviour relationships in epoxy networks.* Polymer, 1996, vol.37, № 114, s. 2989—2997
- [164] Koperski R.: Неспокойный океан ("Нетихий" океан), ч.1. Gdańsk, Grafix, 2014

Хронологический перечень научно-исследовательских работ, относящихся к польским пластмассам, предназначенным для фундаментных подкладок и их практического использования для установки машин и устройств

1. Склейвание в судовых конструкциях. Отчет об итогах научно-исследовательских работ. Politechnika Szczecińska, Instytut Budowy Maszyn, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1971 (непубликованное)
2. Склейвание в судовых конструкциях. Отчет об итогах научно-исследовательских работ. Politechnika Szczecińska, Instytut Budowy Maszyn, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1972 (непубликованное)
3. Jaroszewicz W.: Основные проблемы упругого крепления судовых машин и устройств. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Szczecińska, Wydział Budowy Maszyn i Okrętów, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1973 (непубликованное)
4. Склейвание в судовых конструкциях. Отчет об итогах научно-исследовательских работ. Politechnika Szczecińska, Instytut Budowy Maszyn, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1974 (непубликованное)
5. Исследования фундаментных подкладок из пластмасс на судне *m/s Kapitan Ledóchowski*. Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, Szczecin 1975 (непубликованное)
6. Подкладки из пластмассы под машины и судовые устройства. Отчет об итогах научно-исследовательских работ. Politechnika Szczecińska, Instytut Budowy Maszyn, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1976 (непубликованное)
7. Методы испытаний и критерии оценки пригодности пластмасс для подкладок. Отчет об итогах научно-исследовательских работ. Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1977 (непубликованное)
8. Характеристика пластмасс, применяемых для фундаментных подкладок для установки главных двигателей и судовых вспомогательных устройств. Отчет об итогах научно-исследовательских работ. Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Szczecin 1977 (непубликованное)
9. Технология выполнения установок главных двигателей и судовых вспомогательных механизмов на подкладках из химически отвердевающих пластмас. Отчет об итогах научно-исследовательских работ. Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Szczecin 1977 (непубликованное)
10. Работы по внедрению, выполненные в 1977 г. в рамках темы: „Фундаментные подкладки из химически отвердевающих пластмасс для установки главных двигателей и судовых вспомогательных механизмов. Отчет об итогах научно-исследовательских работ. Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Szczecin 1977 (непубликованное)
11. Проектные рекомендации для конструкции установки главных двигателей и вспомогательных механизмов на подкладках из химически отвердевающих пластмасс. Отчет об итогах научно-исследовательских работ, Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Szczecin 1977 (непубликованное)

12. Инструкция по эксплуатации установок главных двигателей и судовых вспомогательных механизмов на подкладках из химически отвердевающих пластмасс. Отчет об итогах научно-исследовательских работ, Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Szczecin 1977 (непубликованное)
13. Исследования вибрации и шумов на паромах B-491/I и II в Свиноустье. Отчет об итогах научно-исследовательских работ. Wyższa Szkoła Morska, INPT, Szczecin 1977 (непубликованное)
14. Исследования вибрации и шумов на судне m/s „Kapitan Ledóchowski”. Отчет об итогах научно-исследовательских работ. Wyższa Szkoła Morska, Instytut Nauk Podstawowych Technicznych, Szczecin 1977 (непубликованное)
15. Работы по внедрению, выполненные в 1978 г. в рамках темы: „Фундаментные подкладки из химически отвердевающих пластмасс для установки главных двигателей и судовых вспомогательных механизмов”. Отчет об итогах научно-исследовательских работ, Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1978 (непубликованное)
16. Лабораторные работы, выполненные в 1978 г. в рамках темы: „Фундаментные подкладки из химически отвердевающих пластмасс для установки главных двигателей и судовых вспомогательных механизмов”. Отчет об итогах научно-исследовательских работ, Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1978 (непубликованное)
17. Grudziński K., Jaroszewicz W., Lorkiewicz J.: Исследования фундаментных болтовых соединений с химически отвердевающей подкладкой для установки главных двигателей и судовых вспомогательных механизмов. Materiały VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978, Referaty cz. 1, s. 176—187
18. Лабораторные работы, выполненные в 1979 г. в рамках темы: „Фундаментные подкладки из химически отвердевающих пластмасс для установки главных двигателей и судовых вспомогательных механизмов”. Отчет об итогах научно-исследовательских работ, Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1979 (непубликованное)
19. Работы по внедрению, выполненные в 1979 г. в рамках темы: „Фундаментные подкладки из химически отвердевающих пластмасс для установки главных двигателей и судовых вспомогательных механизмов”. Отчет об итогах научно-исследовательских работ, Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1979 (непубликованное)
20. Jaroszewicz W.: Фундаментные подкладки из химически отвердевающей пластмассы под главные двигатели и вспомогательные устройства. Praca doktorska. Politechnika Szczecińska 1980 (непубликованное)
21. Lorkiewicz J., Grudziński K., Jaroszewicz W.: Способ изготовления химически отвердевающих подкладок, особенно в судостроении. Opis patentowy No 134437 z 31.12.1980, Urząd Patentowy PRL, Warszawa 1987
22. Przedsiębiorstwo Połowów Dalekomorskich i Usług Rybackich ODRA w Świnoujściu: Письмо: TT/1452/81 от 12.12.81 „Установка двигателей внутреннего сгорания на подкладках из пластмассы”, Świnoujście 1981 (непубликованное)
23. Работы по внедрению, выполненные в 1981 г. в рамках темы: „Фундаментные подкладки из химически отвердевающих пластмасс для установки главных двигателей и судовых вспомогательных механизмов”. Отчет об итогах научно-исследовательских работ с 1981

- года, Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zakład Mechaniki Technicznej, Szczecin 1981 (непубликованное)
24. Grudziński K., Lorkiewicz J.: Влияние фундаментных подкладок из химически отвердевающих пластмасс на вибрацию и распространение ударных шумов. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1982 (непубликованное)
25. Grudziński K., Jaroszewicz W., Lorkiewicz J.: Установка машин на подкладках из пластмассы. Przegląd Mechaniczny, 1983, nr 21, s. 9—15
26. Jaroszewicz W., Kownacki S., Lorkiewicz J., Łabuć L.: Фундаментное болтовое соединение для установки машин и судовых устройств. Opis patentowy № 141627 z 2.07.1984, Urząd Patentowy PRL, Warszawa 1988
27. Lorkiewicz J.: Отчет о пробе технологического сдвига призонного болта в пластмассе EPAX в модели фундаментного соединения. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1984 (непубликованное)
28. Lorkiewicz J.: Отчет о прочностной пробе сжатия модели фундаментного болта, закрепленного влитой, тонкостенной втулке из пластмассы EPAX. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1984 (непубликованное)
29. Grudziński K., Lorkiewicz J.: Результаты пробы сжатия тонкостенных втулок из пластмассы EPAX. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1984 (непубликованное)
30. Lorkiewicz J.: Результаты дополнительных испытаний моделей с призонными болтами в пластмассе EPAX. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1985 (непубликованное)
31. Grudziński K., Jaroszewicz W., Lorkiewicz J.: Химически отвердевающие пластмассовые подкладки для установки судовых машин. Budownictwo Okrętowe, 1986, nr 11, s. 479—484
32. Adamkiewicz A.: Применение химически отвердевающих пластмасс для установки главных двигателей и вспомогательных устройств, а также установок на суше. Budownictwo Okrętowe, 1988, nr 8, s. 33—34
33. Jaroszewicz W., Łuba A.: Способ изготовления химически отвердевающих фундаментных подкладок. Opis patentowy № 158551 z 14.04.1989, Urząd Patentowy RP, Warszawa 1993
34. Howson J.C., Tech B., Lane P.H.R.: EPY LR approval of a chocking compound for applications where alignment is critical, technical report nr 88/9621. Lloyd's Register, Materials Department, London 1990 (непубликованное)
35. Grudziński K., Lorkiewicz J., Tuczyński L.: Результаты испытаний № 46/90 при растягивании химически отвердевающей пластмассы. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1990 (непубликованное)
36. Grudziński K., Lorkiewicz J.: Результаты испытаний № 47/90 при сдвиге химически отвердевающей пластмассы. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1990 (непубликованное)
37. Grudziński K., Lorkiewicz J., Tuczyński L.: Результаты испытаний № 48/90 модуля Young'a химически отвердевающей пластмассы. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1990 (непубликованное)
38. Grudziński K., Lorkiewicz J., Tuczyński L.: Результаты испытаний № 49/90 ползучести химически отвердевающей пластмассы. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1990 (непубликованное)

39. DREWEK J.: Протокол измерений коэффициента тепловой проводимости химически отвердевающей пластмассы EPY. Politechnika Szczecińska, Katedra Techniki Cieplnej, Szczecin 1990 (непубликованное)
40. GRUDZIŃSKI K., KAWIAK R., TUCZYŃSKI: Влияние воды и смазочного масла на прочность при сжатии подкладочной пластмассы EPY. Результаты испытаний № 14/91. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1991 (непубликованное)
41. GRUDZIŃSKI K., KAWIAK R., TUCZYŃSKI: Ползучесть подкладочной пластмассы EPY. Результаты испытаний № 15/1991, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1991 (непубликованное)
42. GRUDZIŃSKI K., KAWIAK R., TUCZYŃSKI: Ползучесть подкладочной пластмассы EPY. Результаты испытаний № 16/1991, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1991 (непубликованное)
43. GRUDZIŃSKI K., KAWIAK R., TUCZYŃSKI: Коэффициент линейной тепловой расширяемости подкладочной пластмассы EPY. Результаты испытаний № 17/1991, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1991 (непубликованное)
44. GRUDZIŃSKI K., KAWIAK R., TUCZYŃSKI: Сопротивление сжатию подкладочной пластмассы EPY. Результаты испытаний № 18/1991, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1991 (непубликованное)
45. GRUDZIŃSKI K., KAWIAK R., TUCZYŃSKI: Коэффициент трения подкладочной пластмассы EPY по стали. Результаты испытаний № 19/1991, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1991 (непубликованное)
46. GRUDZIŃSKI K., KAWIAK R.: Результаты испытаний № 20/91 модели фундаментного болтового соединения. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1991 (непубликованное)
47. GRUDZIŃSKI K., KAWIAK R.: Результаты испытаний № 22/91 модели фундаментного болтового соединения. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1991 (непубликованное)
48. GRUDZIŃSKI P.: Анализ экспериментальных методов определения жесткости и демпфирующих свойств пластмасс. Sprawozdanie merytoryczne z prac doświadczalnych wykonanych w działalności statutowej w latach 1991—1992, zadanie nr 027-0113/15-02 DzS, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1992 (непубликованное)
49. GRUDZIŃSKI K., KAWIAK R.: Исследования выбранных свойств подкладочной пластмассы EPY. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1992 (непубликованное)
50. KAWIAK R.: Некоторые причины снижения величины предварительного натяжения болтов. Przegląd Mechaniczny, 1992, nr 5 — 6, s. 21—22
51. GRUDZIŃSKI K.: Развитие польских пластмасс и технологии установки на них машин и судовых устройств. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska, 1993, lipiec — sierpień, s. 11—13
52. GRUDZIŃSKI P.: Исследования динамических свойств пластмасс, применяемых при установке машин. Отчет об итогах научно-исследовательских работ с 1992 по 1993. Zadanie nr 027-0213/018-05-01, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1993 (непубликованное)

53. Grudziński P.: Исследование демпфирующих свойств пластмасс, применяемых при установке машин. Materiały XVI Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczyrk 1993, Komunikaty, s. 63—64
54. Zakład Odazotowywania Gazu „KRIO”: Pismo DT/129/93 z dnia 16.12.93, Оценка эффективности установки мотокомпрессоров GMVH-12 методом, предложенным фирмой Techmarin, с точки зрения возможности гашения виброизоляции в полном диапазоне частот 1-500 Гц, вредных для персонала. Odolanów 1993 (непубликованное)
55. Guido B., Lukowiak L., Parosa R., Reszke E.: Проект микроволнового отверждения химически отвердевающей пластмассы EPY. Przedsiębiorstwo Wdrażania Postępu Naukowo-Technicznego, Wrocław 1993 (непубликованное)
56. Kawiak R.: Способы снижения ползучести фундаментных подкладок, литых из химически отвердевающих пластмасс. Materiały VI Konferencji: „Metody nieżelazne w przemyśle okrętowym”, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, Szczecin — Świnoujście 1993, s. 201—207
57. Jaroszewicz W.: Способ отверждения химически отвердевающей композиции, особенно фундаментных подкладок из этой композиции, особенно при низких температурах. Opis patentowy №169265 z 3.02.1993, Urząd Patentowy RP, Warszawa 1996
58. Kawiak R.: Протокол № 27/93 пробы крепления кольца из пластмассы Thordon в подкладочной пластмассе EPY. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1993 (непубликованное)
59. Grudziński K., Jaroszewicz W., Grudziński P.: Исследования виброизоляционных свойств пластмассы EPY. Materiały XVI Sesji Naukowej Okrętowców, Szczecin—Dziwnówek 1994, Materiały, s. 159—165
60. Kawiak R., Grudziński K., Grudziński P., Jaroszewicz W.: Research into strength and vibroinsulation properties of EPY plastic, Polish Maritime Research, 1994, nr 1, s. 17—21
61. Grudziński K., Jaroszewicz W., Parosa R., Reszke E.: Микроволновое отверждение фундаментных подкладок судовых двигателей, литых из химически отвердевающей пластмассы EPY. Materiały Konferencyjne „Postępy w Elektrotechnice”, Szklarska Poręba 1994, s. 81—87
62. Kawiak R.: Химически отвердевающие пластмассы в болтовых соединениях. Materiały VII Seminarium Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn, Kraków 1994
63. Grudziński K., Kawiak R., Tuczyński L.: Panorm o ползучести и тепловом изгибе пластмассы EPY. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin, 1994 (непубликованное)
64. Malinowski L., Jaroszewicz W.: Panorm о определении поля температуры в кормовом подшипнике гребного вала, установленного при использовании пластмассы EPY. Szczecin 1994 (непубликованное)
65. Grudziński K., Skierkowski A., Jaroszewicz W., i in.: Panorm об анализе конструкции и модельных испытаниях монтажа дейдвудной трубы с использованием пластмассы EPY. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1994 (непубликованное)
66. Kawiak R.: Протокол исследований № 23/94 вязкости пластмассы EPY. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1994 (непубликованное)

67. Wypychowski K., Ratajczak D., Jaroszewicz W.: *Книги качества. Система управления качеством по норме ISO 9002*. Marine Service Jaroszewicz, Szczecin 1994—1997 (непубликованное)
68. Grudziński K., Jaroszewicz W.: *Microwave curing of chocks cast in EPY compound for use in shipboard machinery settings*. Marine Technology and Transportation, Southampton UK, Boston, Computational Mechanics Publications 1995, s. 309—315
69. Grudziński K., Jaroszewicz W.: *Сертификат ISO 9002 для польской пластмассы EPY и установки на ней судовых двигателей*. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska, 1995, nr 1, s. 14—15
70. Grudziński K., Jaroszewicz W., Kołodziejski W., Klimczak R.: *Новый способ ремонта установки тяжелых машин и устройств на примере мотокомпрессоров GMVH-12*. Przegląd Mechaniczny, 1995, z. 21, s. 21—24
71. Контрольные исследования параметров колебаний после перестройки фундаментной установки компрессорного комплекса. Zakład Przemysłu Gazu w m. Rembelszczyzna k. Warszawy. Wykonał zespół pod kierownictwem prof. dr. hab. inż. G. Bąka, Warszawa 1995 (непубликованное)
72. Ratajczak J.: *Виброизоляционные свойства пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок машин и судовых устройств*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Szczecińska, Wydział Techniki Morskiej, Szczecin 1995 (непубликованное)
73. Ratajczak D.: *Микроволновое отверждение пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок машин и судовых устройств*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Szczecińska, Wydział Techniki Morskiej, Szczecin 1995 (непубликованное)
74. Grudziński K., Konowalski K.: *Panopt o исследованиях усталостной прочности при сжатии пластмассы EPY*. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1995 (непубликованное)
75. Grudziński K., Kawiak R., Konowalski K., Tuczyński L.: *Экспериментально-теоретические основы монтажа втулки рулевого комплекса с использованием пластмассы EPY*. Opracowanie na zamówienie Stoczni Szczecińskiej S.A, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1995 (непубликованное)
76. Grudziński K., Kawiak R., Jaroszewicz W.: *Вопросы контакта элементов машин при использовании тонкого слоя химически отвердевшей пластмассы*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Współczesne Problemy w Budowie i Eksplotacji Maszyn”, Wydział Mechaniczny Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1996, s. 83—92
77. Grudziński K., Ratajczak J.: *Определение коэффициента потерь и динамической жесткости пластмассы EPY*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Współczesne Problemy w Budowie i Eksplotacji Maszyn”, Wydział Mechaniczny Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1996, s. 93—102
78. Grudziński K., Jaroszewicz W., Orzechowski S.: *Установка тяжелых машин и горных устройств на фундаментных подкладках из пластмассы EPY*. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej Transport Szybowy'96, Gliwice 1996, Tom 2, s. 151—155
79. Grudziński K., Ratajczak J.: *Исследование демпфирующих свойств пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок для тяжелых машин*. Materiały II Konferencji Naukowo-Technicznej „Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne”, Politechnika Śląska, Katedra Budowy Maszyn, Ustroń 1996, s. 279—286

80. *Отчет об измерениях колебаний мотокомпрессоров в насосном отделе Мацковице.* Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Technicznej Eksplotacji Okrętów, Gdynia 1996 (непубликованное)
81. Witek A., Grudziński P.: *Идентификация упруго демпфирующих параметров подкладок из пластмасс в условиях вынужденных колебаний.* Referat wygłoszony na posiedzeniu Komitetu Budowy Maszyn PAN, Szczecin 1996 (непубликованное)
82. Grudziński K., Konowalski K., Ratajczak J., Tuczyński L.: *Исследования пластмассы EPY в аспекте ее применения для фундаментных подкладок под якорные и швартовые лебедки.* Raport nr 3/96, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1996 (непубликованное)
83. Konowalski K., Ratajczak J., Tuczyński L.: *Исследования влияния охлаждения пластмассы EPY в жидком азоте на ее прочность при сжатии и ударное сопротивление.* Raport nr 2/96, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin, 1996 (непубликованное)
84. Grudziński K.: *Механические характеристики стыковых соединений без и с тонким слоем пластмассы.* Materiały z III Warsztatów Profesorskich, Komitet Budowy Maszyn PAN, Koszalin 1997
85. Grudziński K., Konowalski K., Kawiak R.: *Raport 1/97 об итогах исследований влияния лакокрасочных покрытий на оседание главного двигателя и других механизмов на фундаментах.* Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin, 1997 (непубликованное)
86. Grudziński K., Jaroszewicz W., Konowalski K.: *Исследования влияния лакокрасочных покрытий на оседание машин и судовых устройств, установленных на подкладках из пластмассы EPY.* Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska, 1997, nr 10, Październik, s. 23—28
87. Witek A., Grudziński P.: *Идентификация упруго демпфирующих свойств подкладок из пластмасс при совместной установке механических комплексов.* Materiały XVIII Sympozjonu PKM Kielce—Ameliówka 1997, Część III, s. 293—298
88. Grudziński K., Jaroszewicz W.: *Специальная пластмасса для фундаментных подкладок для машин и судовых устройств.* Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt.: „Nowe materiały — nowe technologie w przemyśle okrętowym i maszynowym”. Szczecin—Świnoujście 1998, Tom I, s. XXII—XXX
89. Grudziński K., Konowalski K., Jaroszewicz W.: *Установка палубных механизмов на подкладках, литых из химически отвердевающей пластмассы.* Materiały IV Konferencji „Okrętownictwo i Oceanotechnika”, Międzyzdroje 3—5.06.1998, Wydawnictwa Politechniki Szczecińskiej 1998, s. 123—132
90. Grudziński P., Ratajczak J.: *Исследования реологических свойств пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок для машин.* Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Nowe materiały — nowe technologie materiałowe w przemyśle okrętowym i maszynowym”, Szczecin—Świnoujście 1998, Tom II, s. 661—666
91. Ratajczak J., Grudziński K.: *Исследования упругих и демпфирующих свойств пластмассы EPY при небольших величинах сжимающих напряжений.* Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Nowe materiały — nowe technologie materiałowe w przemyśle okrętowym i maszynowym”, Szczecin — Świnoujście 1998, Tom II, s. 679—684
92. Kawiak R.: *Исследование прочности анкеровок болтов в бетоне с использованием пластмассы EPY.* Raport nr 1/98, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin, 1998 (непубликованное)

93. Grudziński K., Konowalski K., Tuczyński L.: Experimental determination of the creep characteristics of chocking resins, raport nr 2/98, Politechnika Szczecińska 1998 (непубликованное)
94. Witek A., Grudziński P.: Experimental examination of spring — damping properties plastic materials in forced vibrations conditions. Proc. of the Conference Computational Methods and Experimental Measurements'99, Sorrento, Włochy 1999 s. 483—491
95. Witek A., Grudziński P.: Accuracy analysis of a identification method of plastic pads parameters used in machine foundations (Анализ точности метода идентификации параметров подкладок, применяемых при установке машин), in: Proc. of the 4th International Conference on Computational Methods in Contact Mechanics, Stuttgart, Germany, September 1999, UK, WIT Press 1999, s. 401—410
96. Kawiak R.: Установка фундаментных болтов с использованием полимерных компонентов. Materiały XIX Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, Zielona Góra—Świnoujście, wrzesień 1999, materiały Tom I, s. 481—486
97. Grudziński K., Kawiak R.: Полимерные композиты в болтовых соединениях. Materiały XIX Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, Zielona Góra—Świnoujście, wrzesień 1999, materiały, Tom I, s. 55—60
98. Grudziński K., Kawiak R.: Отчет № 17/99 об итогах исследований крепления каната в конических соединениях, залитых пластмассой EPY. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1999 (непубликованное)
99. Grudziński K., Witek A. i in.: Исследования динамических свойств пластмасс, применяемых для фундаментных подкладок при установке машин и устройств. Sprawozdanie merytoryczne z wykonania projektu badawczego nr 7T07C01611, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 1999 (непубликованное)
100. Kawiak R.: Полимерные композиты для крепления анкерных фундаментных болтов. Technologia i Automatyzacja Montażu, Kwartalnik Naukowo-Techniczny, 1999, nr 3, s. 48—50
101. Kawiak R., Konowalski K.: Экспериментальные исследования упругости и гашения стыков, нагруженных в касательном направлении. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej pt.: „Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej — WW '99”, Politechnika Poznańska, Komisja Budowy Maszyn PAN, O/Poznań, Studia i Materiały, Tom XVII, s. 261—266
102. Grudziński K., Urbaniak M.: Исследования механических характеристик эпоксидных композитов со стеклянным волокном под сжимающей нагрузкой. Materiały Konferencji: „Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Ustroń 2000”, Politechnika Śląska, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, 2000, nr 1, s. 245—250
103. Grudziński P., Ratajczak J.: Реологическая модель пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок машин. Materiały Konferencji: „Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Ustroń 2000”, Politechnika Śląska, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, 2000, nr 1, s. 251—256
104. Grudziński K., Konowalski K., Jaroszewicz W.: Усталостные и статические исследования пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок машин. Materiały Konferencji: „Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Ustroń 2000”, Politechnika Śląska, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, 2000, nr 1, s. 245—250
105. Grudziński K., Ratajczak J.: Исследования динамических свойств пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок машин. Materiały XIX Sesji Naukowej Okrętowców „Marine Technology 2000”, Szczecin—Dziwnówek 2000, s. 127—136

106. Grudziński K., Konowalski K., Ratajczak J.: Сравнительные исследования механических свойств пластмасс, применяемых для фундаментных подкладок машин. Материалы XIX Sesji Naukowej Okrętowców Marine Technology 2000, Szczecin—Dziwnówek, maj 2000, s. 117—126
107. Kawiak R.: Identification of model parameters of fundation pad made of polymer composite. Proceedings of the International Scientific Conference Rzeszów University of Technology, MECHANICS 2000, Rzeszów, June 2000, Scientific Bulletins of Rzeszów University of Technology, No. 179, Mechanics 54, s. 153—156
108. Kawiak R.: Сравнительные деформации подкладок из полимерных композитов. Композиты, Wybór prac Zachodniopomorskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Materiałów Kompozytowych, Komisja Nauki o Materiałach PAN O/Poznań, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, Szczecin 2000, s. 89—94
109. Urbaniak M., Grudziński K.: Использование раздробленных отходов эпоксидной пластмассы для повторного использования при изготовлении фундаментных подкладок машин. Politechnika Śląska, Prace Naukowe Katedry Przetwórstwa Materiałów Metalowych i Polimerowych, w: Материалы II Конференции Нaukowo-Technicznej, Ustroń Zdrój 2001, s. 141—146
110. Grudziński K., Urbaniak M.: Модификация летучим пеплом эпоксидной пластмассы, пред назначенной для фундаментных подкладок тяжелых машин и устройств. Материалы XV Konferencji Naukowej „Modyfikacje polimerów” Świeradów Zdrój 2001, Politechnika Wrocławskiego, Prace Naukowe Instytutu Technologii Organicznej i Tworzyw Sztucznych, s. 203—206
111. Grudziński K., Ratajczak J., Jaroszewicz W.: Применение химически отвердевшей пластмассы при постройке и модернизации машин и горных устройств. Материалы II Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Efektywne bezpieczne systemy transportowe w zakładach górniczych”, Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG, Gliwice 2001, Tom I, s. 247—259
112. Grudziński K., Jaroszewicz W., Orzechowski S., Ratajczak J.: Установка горных подъёмных машин на фундаментных подкладках, литых из пластмассы EPY. Материалы IV Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej, Kraków 2001, AGH, Zeszyty Naukowo-Techniczne 2001, nr 22, s. 52—64
113. Grudziński P., Witek A.: Анализ точности идентификации динамических параметров подкладок из пластмасс. Материалы XX Sympozjonu PKM, Polanica-Zdrój 2001, Politechnika Opolska, Zeszyty Naukowe, Mechanika, 2001, nr 270, z. 68, s. 361—368
114. Kawiak R.: Влияние коэффициента формы на деформации выравнивающих подкладок. Материалы XX Sympozjonu PKM, Polanica-Zdrój 2001, Politechnika Opolska, Zeszyty Naukowe, Mechanika, 2001, nr 270, z. 68, s. 361—368
115. Kawiak R.: Экспериментальные исследования болтовых соединений. Материалы V Konferencji Naukowej „Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn”, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław—Szklarska Poręba 2001, Tom II, s. 31—38
116. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования влияния времени отверждения пластмассы EPY при комнатной температуре на ее прочностные свойства, определенные при статической пробе сжатия. Raport nr 1/2000, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
117. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования влияния количества отвердителя Z-1 на прочностные свойства пластмассы EPY, определенного при статической пробе сжатия. Raport nr 2/2000, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)

118. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования влияния количества стеклянного волокна на прочностные свойства пластмассы EPY, определенного при статической пробе сжатия. Raport nr 3/2000, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
119. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования влияния количества кварцевой муки на прочностные свойства пластмассы EPY, определенного при статической пробе сжатия. Raport nr 4/2000. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
120. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования влияния вида сырьевой базы эпоксидной пластмассы EPY на прочностные свойства, определенного при статической пробе сжатия. Raport nr 5/2000, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
121. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования влияния скорости нагрева эпоксидных пластмасс EPY, Chockfast Orange и Epo cast 36 на температуру перехода из гелеобразного состояния в состояние большой эластичности. Raport nr 6/2000. Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
122. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования влияния модифицирующих средств на прочностные свойства пластмассы EPY со стеклянным волокном, определенного при статической пробе сжатия. Raport nr 7/2000, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
123. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования влияния вида отвердителя на прочностные свойства пластмассы EPY, определенного при статической пробе сжатия. Raport nr 8/2000, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
124. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования количественного влияния стеклянных шариков на прочностные свойства пластмассы EPY, определенного при статической пробе сжатия. Raport nr 9/2000, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
125. Grudziński K., Kawiak R., Ratajczak J., Tuczyński L.: Tests of hardening exotherm end creep of the EPY compound for the purpose of updating the Lloyd's Register of Shipping Certificate for this material. Raport nr 10/2000, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
126. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования влияния присутствия и грануляции дымной пыли из электростанции „Dolina Odra“ на прочностные свойства пластмассы EPY, определенные при статической пробе сжатия. Raport nr 11/2000, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
127. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Обозначение линейной усадки во время отверждения пластмасс: EPY, Chockfast Orange и Epo cast 36. Raport nr 12/2000, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
128. Grudziński K., Konowalski K., Urbaniak M., Tuczyński L.: On testing mechanical properties of resins distinguished by FR1, FR2 and EPY symbols, raport nr 1/2001, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2000 (непубликованное)
129. Grudziński K., Urbaniak M., Tuczyński L.: Исследования влияния повышенной температуры на прочностные свойства пластмассы EPY. Raport nr 2/2001, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2001 (непубликованное)

130. Grudziński K., Urbaniak M.: Исследования длительного влияния разных сред на сопротивление при сжатии подкладочной пластмассы. Raport nr 2/2001, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2002 (непубликованное)
131. Grudziński K., Ratajczak J., Sobczak Ł., Jaroszewicz W.: Использование химически отвердевающей пластмассы для установки дейдвудных труб.: Materiały XX Sesji Naukowej Okrętowców, Towarzystwo Okrętowców Polskich „KORAB”, Gdańsk 2002, Materiały Konferencyjne, s. 215—225
132. Urbaniak M., Fabrycy E., Grudziński K.: Исследование сетевого процесса эпоксидной пластмассы EPY методом сканирующей калориметрии (DSC) и её некоторых механических свойств. Materiały V Konferencji Naukowo-Technicznej „Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne”, Ustroń 2002, s. 221—226
133. Urbaniak M.: Исследования седиментации наполнителей в смолистых композициях. Politechnika Szczecińska, Raport nr 2/2003, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2003 (непубликованное)
134. Urbaniak M.: Определение коэффициента линейного термического расширения пластмассы EPY при температуре от 20 до 130°C. Raport nr 3/2003, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2003 (непубликованное).
135. Grudziński K., Ratajczak J., Urbaniak M.: Bestimmung von E-modul und Druckfestigkeit für das Formstoff EPOCAST 36-P bei Raum- und Tieftemperatur, Raport 5/2003, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2003 (niepublikowana)
136. Grudziński K., Jaroszewicz W.: Установка машин и устройств на фундаментных подкладках, литых из пластмассы EPY. Wydawca ZAPOL Spółka Jawna, Szczecin 2003
137. Urbaniak M., Grudziński K.: Исследование методом динамического термомеханического анализа упругих свойств эпоксидной пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок. Materiały XVI Konferencji Naukowej „Modyfikacja polimerów», Polonica Zdrój 2003, Prace Naukowe Instytutu Technologii Organicznej i Tworzyw Sztucznych Politechniki Wrocławskiej, Konferencje Nr 52, 2003, s. 424—427
138. Urbaniak M., Grudziński K.: Термические исследования структурирования эпоксидной пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок машин. X Seminariusz „Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn”, Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Stosowanej, Kraków 2003, s. 397—401
139. Gruziński P.: Анализ напряжений в тонком слое полимерной пластмассы и исследования его прочности. XXI Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, Ustroń 2003, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003 Tom I, s. 289—294
140. Grudziński K., Ratajczak J., Jaroszewicz W.: Современный метод монтажа машин и устройств при помощи специальных химически отвердевающих пластмасс. Referat zamówiony, wygłoszony na sesji plenarnej XXI Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn (Ustroń, wrzesień 2003), Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003, Tom I, s. 79—88
141. Urbaniak M.: Определение коэффициента линейного термического расширения пластмассы EPY при температуре от 25 до 60°C. Raport nr 1/2004, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2004 (непубликованное)
142. Grudziński K., Jaroszewicz W.: “Seating of machines and devices on foundation chocks cast of EPY resin compound”, ZAPOL, Szczecin 2004

143. Urbaniak M., Grudziński K.: Thermal investigation of curing process of EPY epoxy system. Polimery 2004, Vol 49, No. 2, s. 89—93
144. Urbaniak M.: Исследования влияния веществ, замедляющих процесс седиментации наполнителей в композиции EPY. Raport nr 2/2004, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2004 (непубликованное).
145. Urbaniak M.: Исследование процесса отверждения и его влияния на механические свойства эпоксидной пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок машин. Rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Szczecin 2004
146. Ratajczak J., Markiewicz J.: Техническая проба адгезии пластмассы EPY к металлической поверхности, покрытой эпоксидной краской для грунтовки. Protokół nr 42/2004, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2004 (непубликованное)
147. Grudziński K., Urbaniak M., Markiewicz J.: Comparative investigations on EPOCAST 36 epoxy resin connected with a change of the binder. Report No. 53/2004, Szczecin University of Technology, Department of Mechanics and Machine Elements, Szczecin 2004 (непубликованное)
148. Grudziński K., Jaroszewicz W.: Монтаж машин и устройств на фундаментных подкладках, литых из пластмассы EPY. Wydawca ZAPOL Dmochowski, Sobczyk, Spółka Jawna, Wydanie II, Szczecin 2005
149. Urbaniak M., Grudziński K.: Исследования термомеханических свойств эпоксидной пластмассы EPY. Tworzywa Sztuczne i Chemia, 2005, nr 6(25), s. 30—33
150. Urbaniak M., Grudziński K.: Термические и механические свойства эпоксидной пластмассы EPY, применяемой для фундаментных подкладок машин. Modyfikacja polimerów, pod red. Danuty Żuchowskiej i Ryszarda Stellera, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2005, s. 646—651
151. Grudziński K., Urbaniak M., Ratajczak J., Markiewicz J.: Tests on cure exotherm and creep of the EPY compound carried out in order to update the Lloyd's Register of Shipping Certificate for this material. Report No. 59/2005, Szczecin University of Technology, Department of Mechanics and Machine Elements, Szczecin 2005 (unpublished)
152. Grudziński K., Ratajczak J., Jaroszewicz W.: Применение специальной полимерной пластмассы EPY для монтажа мостовых подшипников. Międzynarodowa Konferencja EKO MOST 2006, Kielce, Organizator: Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2006. Referaty, s. 125—133
153. Gudziński K., Ratajczak J., Jaroszewicz W.: Специальная полимерная пластмасса EPY® и её применение для монтажа машин, а также судовых и наземных устройств. Inżynieria Materiałowa, Nr 3(151), Rok XXVII, maj—czerwiec 2006, s. 597—600
154. Urbaniak M., Grudziński K.: Исследования и прогнозирование термомеханических свойств эпоксидной пластмассы. Применение специальной полимерной пластмассы EPY®. VII Konferencja Naukowo-Techniczna: POLIMERY I KOMPOZYTY KONSTRUKCYJNE, Iłstebna-Gliwice, 12—14 IX 2006, Organizator: Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny, Instytut Materiałów Polimerowych i Metali, Materiały, s. 161—166
155. Urbaniak M., Grudziński K.: Исследование вязко-эластичных свойств эпоксидной пластмассы EPY. Tworzywa Sztuczne i Chemia, Nr 2, Marzec/Kwiecień 2006, s. 32—35
156. Urbaniak M., Grudziński K.: Исследования реологических свойств эпоксидной пластмассы EPY®. Tworzywa Sztuczne i Chemia, Nr 3, Maj/Czerwiec, 2006, s. 48—51

157. Грудзиньски К., Ярошевич В., Линкан Т.: Современная технология монтажа судовых машин и устройств с применением специальных полимерных материалов. Судостроение и судоремонт, № 15—16, 2006, с. 40—43
158. Urbaniak M., Grudziński K.: Влияние скорости деформации на механические характеристики эпоксидной пластмассы EPY, подвергнутой сжимающим нагрузкам. Kompozyty, 2006, nr 4, s. 24—28
159. Urbaniak M., Grudziński K.: Влияние температуры на механические характеристики эпоксидной пластмассы EPY, подвергнутой сжимающим нагрузкам. Kompozyty, 2006, nr 1, s. 20—25
160. Ratajczak J.: Применение микроволн в процессе изготовления фундаментных подкладок, литых из эпоксидной пластмассы EPY. Rozprawa doktorska, Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Szczecin 2006
161. Urbaniak M.: Исследования влияния низких температур хранения пластмассы EPY, Epoxycast 36 i Chockfast Orange на их механические свойства. Raport nr 1/2006, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2006 (непубликованное)
162. Urbaniak M., Markiewicz J.: Исследования ползучести пластмасс EPY, Epoxycast 36 и Chockfast Orange. Raport nr 2/2006, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2006 (непубликованное)
163. Urbaniak M., Grudziński K.: Time–Temperature–Transformation (TTT) cure diagram for EPY epoxy system. Polimery, 2007, vol. 52, No. 2, s. 117—126
164. Urbaniak M.: Гелеобразование и физическое старение во время структурирования эпоксидной пластмассы EPY. Tworzywa Sztuczne i Chemia, 2007, nr 2 (33), s. 38—43
165. Urbaniak M., Grudziński K.: Conversion–Temperature–Transformation (CTT) cure diagram for EPY epoxy system. Polimery, 2007, vol. 52, No. 4, s. 255—258
166. Urbaniak M.: Использование модели пластичности Argon'a для прогнозирования прочностных свойств эпоксидной пластмассы EPY. Inżynieria Materiałowa, 2007, vol. 28, nr 1, s. 26—30
167. Urbaniak M., Markiewicz J.: Исследования влияния нанокремнозёмов на процесс седиментации наполнителей в смолистой композиции и на механические свойства пластмассы EPY. Raport nr 1/2007, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2007 (непубликованное)
168. Grudziński K.: Сравнительный анализ монтажа поршневых машин на бетонных фундаментах и стальных конструкциях. Wykonana dla Spółki Operator Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A. w Warszawie, Raport Nr1/08, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2008 (непубликованное)
169. Grudziński K., Ratajczak J., Jaroszewicz W.: Применение специальной полимерной пластмассы для монтажа машин и устройств в угольных карьерах. Górnictwo odkrywkowe nr 1/2008, s. 51—56
170. Urbaniak M.: Glass transition temperature–temperature–property (TgTP) diagram for EPY epoxy system. Polimery, 2008, vol. 53, No. 7—8, s. 537—543
171. Urbaniak M.: Термические характеристики эпоксидной пластмассы EPY, существенные для её использования для фундаментных подкладок машин. Tworzywa Sztuczne i Chemia, 2008, nr 3 (40), s. 60—65

172. Urbaniak M.: Модели пластичности Eyring'a и Robertson'a, касающиеся эпоксидной пластмассы EPY. Polimery, 2008, vol. 53, No. 1, s. 40—46
173. Urbaniak M.: Использование модели Bowden'a для прогнозирования границы пластичности эпоксидной пластмассы EPY. Inżynieria Materiałowa, 2008, vol. 29, nr 1, s. 37—41
174. Urbaniak M., Mieczkowski W., Markiewicz J.: Исследования влияния низких температур на механические свойства пластмассы. Raport nr 37/2008, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2008 (непубликованное)
175. Urbaniak M., Mieczkowski W., Markiewicz J.: Investigations of low temperature (-120°C) effect on EPY material mechanical properties. Raport nr 38/2008, Politechnika Szczecińska, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2008 (непубликованное).
176. Grudziński K., Grudziński P.: Традиционный и современный способы монтажа тяжёлых поршневых компрессоров на бетонных фундаментах. Przegląd Mechaniczny, 5/09, s. 15—21
177. Grudziński K., Grudziński P.: Анализ и оценка модернизации постройки фундаментов и крепления трубопроводов на компрессорах синтез-газа на азотном заводе Zakłady Azotowe Puławy S.A. Praca wykonana dla ZKiE TEHMARIN w Świnoujściu, Techpunkt, Szczecin 2009 (непубликованное)
178. Grudziński K., Kawiak R.: Pulling-out tests on holding down bolts anchored in concrete blocks using Epcast Industrie compound. Test Report No. 96/09, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Department of Mechanics and Machine Elements. Szczecin 2009 (непубликованное)
179. Urbaniak M., Markiewicz J.: Исследования влияния сорта кварцевой муки на прочностные свойства пластмассы EPY. Raport nr 4/MSJ/2009, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2009 (непубликованное)
180. Urbaniak M., Markiewicz J.: Исследования выбранных прочностных свойств отвердевших эпоксидных смол Epidian 57 и Epidian 6. Raport nr 5/MSJ/2009, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2009 (непубликованное)
181. Urbaniak M., Markiewicz J.: Investigation of selected mechanical properties for EPY material. Report No. 12/2009, West Pomeranian University of Technology, Department of Mechanics and Machine Elements, Szczecin 2009 (непубликованное)
182. Urbaniak M., Markiewicz J.: Исследование некоторых выбранных прочностных свойств пластмасс, приготовленных на основе смоляной композиции EPY, отвердевшей при помощи отвердителей Chockfast Orange, Epcast 36 и EPY. Raport nr 6/MSJ/2009, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2009 (непубликованное)
183. Grudziński K., Grudziński P.: Анализ и оценка ремонта монтажей компрессорных агрегатов № 1 и № 2, расположенных на одном ленточном фундаменте на газокомпрессорной станции Hołowczyce. Praca wykonana dla Operatora Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A. w Warszawie. Techpunkt, Szczecin 2010 (непубликованное)
184. Urbaniak M.: The effect of conversion degree on the dynamic and static mechanical properties of the EPY epoxy material. Inżynieria materiałowa, 2010, vol. 31, nr 6, s. 1446—1452

185. Urbaniak M.: Прогнозирование прогресса процесса структурирования эпоксидной пластмассы EPY. Tworzywa Sztuczne w Przemyśle, 2010, nr 6, s. 37—40
186. Urbaniak M., Markiewicz J.: Исследования влияния увлажнительно-диспергирующего средства BYK-W969 на механические свойства модифицированной пластмассы EPY. Raport nr 1/2010, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2010 (непубликованное)
187. Grudziński K., Grudziński P., Jaroszewicz W., Ratajczak J.: Технические, экономические и эксплуатационные выгоды при применении полимерных пластмасс для монтажа машин и устройств. Technologia i Automatyzacja Montażu 4/2011, 19—24
188. Grudziński P.: Моделирование и анализ прочности фундаментного болта, заанкерованного в бетонном блоке при помощи полимерной пластмассы. Modelowanie Inżynierskie, Tom 11, Nr 42 , Grudzień 2011, s. 147—154
189. Urbaniak M.: A relationship between the glass transition temperature and the conversion degree in the curing reaction of the EPY epoxy system. Polimery, 2011, vol. 56, nr 3, s. 240—243
190. Urbaniak M.: Исследование некоторых выбранных механических свойств пластмассы EPY (No партии 403). Raport nr 7/2011, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2011 (непубликованное)
191. Grudziński P.: Анализ жёсткости и прочности фундаментных болтов, осаженных в бетонном блоке. Kierunki badań i rozwoju, tom 3, Politechnika Gdańsk, Gdańsk 2011, s. 546—555
192. Urbaniak M.: Определение температуры гелеобразования пластмассы EPY методом DSC. Raport nr 8/MSJ/2011, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2011 (непубликованное)
193. Urbaniak M.: Возможность прогнозирования термических свойств полимерных материалов на примере эпоксидной пластмассы EPY, применяемой для монтажа тяжелых машин, а также наземных и морских устройств. II Międzynarodowe Targi Tworzyw Sztucznych i Gumy — EPLA, Konferencja, Poznań, 13 marca 2012
194. Grudziński K., Grudziński P., Jaroszewicz W., Ratajczak J.: Практическое применение пластмассы EPY для монтажа машин и устройств. Technologia i Automatyzacja Montażu 1/2012, s. 18—23
195. Grudziński K., Grudziński P., Jaroszewicz W., Ratajczak J.: Assembling of bearing sleeve on ship propulsion shaft by using EPY resin compound. Polish Maritime Research, Vol: 19 , No. 2 / 2012, pp. 49—55
196. Grudziński P., Konowalski K.: Исследования адгезии пластмассы EPY к стали в фундаментных болтах, заанкерованных в этой пластмассе. Modelowanie Inżynierskie T.13, z. 44, wrzesień 2012, s. 101—108
197. Grudziński P.:Determination of joint diagrams for a foundation bolted joint with the bolt anchored in a polymer plastic, Part I, Joint diagram for the assembly state. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Vol. 32 , Nr 3/2012, s. 35—47
198. Grudziński P.: Determination of joint diagrams for a foundation bolted joint with the bolt anchored in a polymer plastic, Part II, Joint diagram for the operational state. Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Vol. 32 , Nr 3/2012, s. 49—57
199. Grudziński P., Konowalski K.: Studies of flexibility of a steel adjustable fundation chock. Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 36, No. 2/2012, pp. 79—90

200. Urbaniak M., Kostrubiec H.: Исследования некоторых выбранных термомеханических свойств образцов, вырезанных из пластмассы Chockfast Orange. Raport nr 24/2012, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2012 (непубликованное)
201. Urbaniak M., Kostrubiec H.: Tests on curing exotherm and selected mechanical and physical properties of the EPY compound carried out in order to update the Lloyd's Register of Shipping Certificate for this material. Report No. 4/2012, West Pomeranian University of Technology, Department of Mechanics and Machine Elements, Szczecin 2012 (непубликованное)
202. Urbaniak M.: Определение свойств пластмассы EPY при сгибании. Raport nr 5/MSJ/2013, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2013 (непубликованное)
203. Urbaniak M.: Определение плотности пластмассы EPY. Raport nr 6/MSJ/2013, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2013 (непубликованное)
204. Urbaniak M.: Определение полной объёмной усадки пластмассы EPY. Raport nr 7/MSJ/2013, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2013 (непубликованное)
205. Urbaniak M., Kostrubiec H.: Исследования сопротивления сжатию и твёрдости Barcol'a образцов, вырезанных из фрагмента фундаментной подкладки из пластмассы Chockfast Orange. Raport nr 26/2013, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2013 (непубликованное)
206. Urbaniak M.: Исследование вязкости в литейном состоянии, а также пункта гелеобразования пластмассы EPY. Raport nr 56/2013, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2013 (непубликованное)
207. Grudziński P.: Исследование виброзоляционных свойств пластмассы EPY, а также возможности её применения для редукции колебаний и изоляции ударных шумов. Sprawozdanie merytoryczne z wykonania projektu badawczego nr N N502 194938, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2013 (непубликованное)
208. Dobrzańska R.: Исследования скорости горения материалов в горизонтальном положении. Sprawozdanie nr TZ/ASTM D 635/025/014, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Laboratorium Badań Cech Pożarowych Materiałów, Szczecin 2014 (непубликованное)
209. Urbaniak M., Kostrubiec H.: Исследования сопротивления сжатию, а также твёрдости Barcol'a и ползучести образцов пластмассы EPY с модифицированным составом. Raport nr 1/MSJ/2014, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Szczecin 2014 (непубликованное)
210. Grudziński P., Konowalski K.: Experimental Investigations of normal deformation characteristics of foundation chocks used in the seating of heavy machines and devices. Part I. Theoretical fundamentals and investigations of a steel chock. Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 38, No. 1, 2014, pp. 63—76
211. Grudziński P., Konowalski K.: Experimental Investigations of normal deformation characteristics of foundation chocks used in the seating of heavy machines and devices. Part II. Experimental investigations of a chock cast off EPY resin. Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 38, No. 2, 2014, pp. 51—61.

Mounting of machines and devices using EPY resin. Abstract

This book presents a modern method for the mounting of marine and land-based machines and devices on foundations using chocks cast of EPY resin compound specially developed for this purpose. General requirements referring to the seating of machinery on foundations (especially those used in shipbuilding) are proved, together with relevant evaluation criteria. Specificity of resin compounds used for foundation chocks, the background of chocking arrangement design and the techniques used for casting the chocks in place are also outlined. Many examples are presented, illustrating various possible applications of the developed EPY compound in the seating of new machines and devices, as well as in the repair and modernization of the already existing installations.

Descriptions and results of specialist investigations of the EPY compound were given and an influence of its participation in various constructional connections on their behavior in operating conditions was examined and characterized. This was performed to broaden and deepen the understanding of the issue and our research efforts were aimed at meeting the needs of engineering practice. The results of these studies constitute a scientific base for the developed method of machine assembling by using the EPY resin compound. The book shows in a scientific and practical manner that the application of foundation chocks cast with thermosetting compound EPY instead of traditional chocks made of metal not only simplifies assembly but ensures better anchoring of machines. This guarantees better resistance to wear and tear, better operational reliability and longer service life. Ultimately, it provides cost, vibration and noise reduction.

The book is addressed to designers and shipbuilding specialists as well as engineers and technicians dealing with the design of heavy machinery and its land installations. It may also be of use for scientific workers and students of higher technical colleges and faculties specializing in shipbuilding and off shore technology, machinery design and maintenance, deep-sea, underground and surface mining, power engineering, industrial constructions and civil engineering.

Об авторах:

КАРОЛЬ ГРУДЗИНЬСКИ*, профессор, работал в Щецинском политехническом институте (PS) с 1955 года, в настоящее время на пенсии. В течение 20 лет (1981—2001) заведовал Кафедрой механики и основ конструкции машин (KM i PKM) этого института, преобразованного в 2009 году в Западнопоморский технологический университет (ZUT) в Щецине. Его научная деятельность сосредоточилась на проблемах механики конструкции машин, а особенно на экспериментальных исследованиях, моделировании и расчётах конструкционных соединений (направляющих, свинчивающихся, натяжных, клеевых) с учётом контактных явлений и действий динамических нагрузок. В этих областях профессор сотрудничал с многими польскими и заграничными научными центрами. Особое место в его работах занимают исследования специальных эпоксидных пластмасс и их практические применения при монтаже машин и устройств. Автор и соавтор 6 научных книг и более 200 работ, опубликованных в Польше и заграницей, а также многочисленных исследовательских работ и экспертиз, выполненных для промышленности. Профессор был научным руководителем 10 докторских диссертаций и многих рецензий таких же диссертаций. Был автором около 250 рецензий научных публикаций и исследовательских работ, финансированных Министерством науки и высшего образования Польши. Многократно участвовал также в оценке предложений для признания научного звания профессора.

ВЕСЛАВ ЯРОШЕВИЧ**, доктор технических наук, основатель и совладелец фирмы Marine Service Jaroszewicz (MSJ), профессионально занимающейся изготовлением пластмассы ЕРУ и монтажом машин и устройств с её применением. MSJ является одной из трёх фирм в мире, занимающихся этой деятельностью. В 1973 году он окончил Щецинский политехнический институт (факультет машиностроения и судостроения) и с 1973 по 1982 год работал на Кафедре технической механики. В 1981 году, в том же институте защитил докторскую диссертацию «Фундаментные подкладки под судовые двигатели и вспомогательные устройства из химтөрдевших пластмасс». С 1982 года занимается практической деятельностью: сначала руководит «Сервисом монтажа машин» в рамках заграничной фирмы «KITI» в Польше, а затем в 1991 году основывает частную фирму MSJ. Одновременно тесно сотрудничает с PS/ZUT. Является автором и соавтором многих научно-исследовательских работ, патентов и научных публикаций, в том числе двух книг. С 1974 года по 2014 год, под его руководством и при его личном участии был выполнен монтаж 11221 судовых и наземных машин и устройств, в том числе 2.215 главных судовых двигателей.

ЕНДЖЕЙ РАТАЙЧАК**, доктор технических наук, директор, управляющий фирмой MSJ. Окончил в 1995 году Щецинский политехнический институт, Факультет морской техники с направлением «Океанотехника». Затем работал ассистентом на KM i PKM Щецинского политехнического института. Его научно-исследовательская деятельность сосредоточивалась на исследованиях эпоксидных пластмасс, а также на их практическом применении при монтаже машин и устройств. Значительные научно-исследовательские достижения и их практические применения стали основой его докторской диссертации, которую защитил в 2006 году, на Кафедре механики ZUT. С 2008 года работает в фирме MSJ.

МАГДАЛЕНА УРБАНИЯК*, доктор технических наук, является заведующей Кафедрой технической механики на KM i PKM ZUT в Щецине. В 1999 году окончила Щецинский политехнический институт, Механический факультет с направлением на инженерное материаловедение, а затем поступила в аспирантуру. В научной деятельности сосредоточилась на исследованиях влияния разных факторов на процессы структурирования, а также на термомеханических свойствах эпоксидных композитов, предназначенных для фундаментных подкладок машин. В 2005 году защитила докторскую диссертацию на KM i PKM. Специализируется в работах по внедрению новых эпоксидных материалов на основе сырья из возобновляемых источников. Является автором и соавтором более 70 научных работ, опубликованных в Польше и заграницей, а также более 40 исследовательских работ для промышленности.

ПАВЕЛ ГРУДЗИНЬСКИ* является сотрудником KM i PKM в Щецине. В 1988 году окончил Механический факультет Щецинского политехнического института с направлением «Транспорт». В том же году начал работать в фирме PPURM „Transocean” в Щецине. С 1989 года работает (на должности ассистента, а позднее адъюнкта) в ZPKM PS/ZUT. Его научно-исследовательская работа концентрируется на моделировании и расчётах MES фундаментных болтовых соединений машин и на исследованиях влияния применяемых в них фундаментных подкладок из пластмассы ЕРУ на их динамические характеристики, надёжность и прочность. В этой области имеет значительные научно-исследовательские и публикационные достижения, а также практический опыт.

Контактные адреса:

* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, al. Piastów 19, 70-310 Szczecin; tel.: +48 91 449 42 57;
e-mail: karol.grudzinski@zut.edu.pl; pawel.grudzinski@zut.edu.pl; magdalena.urbaniak@zut.edu.pl

** Marine Service Jaroszewicz s.c., ul. Bielańska 23, 70-703 Szczecin, tel.: +48 91 460 66 24;
e-mail: msj@epyresin.eu; http://www.epyresin.eu



ISBN 978-83-7518-740-3