



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Технология конструкционных материалов»

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

по изучению дисциплины

«Новые конструкционные материалы»

Автор
Колотиенко С.Д., д.т.н., профессор

Ростов-на-Дону, 2014





Оглавление

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА	4
ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС	32
Тема 1 классификация современных конструкционных материалов	35
Тема 2 проводниковые материалы и сплавы.....	43
Тема 3 сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами	51
Тема 4 жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы	56
Тема 5 суперсплавы	62
Тема 6 коррозионностойкие стали	73
Тема 7 цветные металлы и сплавы	85
Тема 8 порошковые материалы.....	104
Тема 9 композиционные материалы.....	121
Тема 10 полимерные материалы и пластмассы	137
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И КОНТРОЛЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	176
1.Цель, функции и виды самостоятельной работы студентов	177
2.Планирование самостоятельной работы студента.....	180
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ	189
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ.....	197
Определение и расчет прочностных свойств композиционных материалов, применяемых в	в



Новые конструкционные материалы

машиностроении	198
1. Общие сведения	199
2. Примеры выполнения расчетов	202
3. Задание для самостоятельной домашней работы.....	203
4. Контрольные вопросы.....	204
5. Литература	204
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	205
Технология получения материалов и изделий методами	
 порошковой металлургии.....	208
1. Общие сведения	209
2. Пример выполнения задания	214
3. Контрольные вопросы.....	217
4. Литература	217
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	218
Определение и расчет прочности композиционных	
 сэндвичевых (сотовых) материалов.....	220
1. Общие сведения	221
2. Последовательное проектирование сэндвичевых	
конструкций	225
3. Простейшие формулы, используемые при расчетах	227
4. Пример расчета сэндвичевой структуры материала	
плоской прямоугольной балки	228
5. Пример расчета сэндвичевых материалов на	
устойчивость.....	230
6. Контрольные вопросы.....	231
7. Литература	231
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	232
Расчет металлополимерных самосмазывающихся	
 подшипников скольжения.....	237
1. Общие положения.	238
2. Исходные данные.	239
3. Порядок расчета.....	241
4.Контрольные вопросы.....	245
5.Литература	245
ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ.....	246

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА





Новые конструкционные материалы

Лист согласования

Рабочая программа по дисциплине Новые конструкционные материалы составлена в соответствии с требованиями основной образовательной программы, сформированной на основе Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки 151000 Технологические машины и оборудование.

Профиль (для программ магистратуры):

Дисциплина относится к циклу М 2.

Рабочая программа составлена проф., д.т.н. С.Д. Колотиненко, рассмотрена на заседании кафедры «Технология конструкционных материалов».

Протокол № 2 от «06» сентября 2012 г.

Зав. кафедрой «ТКМ» _____ А.Ю. Кем
личная подпись

«__» _____ 201__ г.

Одобрена научно-методическим советом направления
151000 Технологические машины и оборудование

Председатель совета _____ Ю.А. Гордин
личная подпись

"__" _____ 201__ г.

Заведующая сектором ОП
ЦНМОиТОП _____ Е.Г. Скидан
личная подпись

"__" _____ 201__ г.



СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ

Раздел 1. Общие положения

1.1 Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

Цель дисциплины - дать студентам представления, знания и навыки по выбору и применению современных материалов и технологических методах их получения, обработки и упрочнения деталей машин, обеспечивающих высокое качество продукции, экономию материалов и высокую производительность труда. Сформировать знания об основах современного материаловедения и технологии производства новых конструкционных материалов: полимеров и пластмасс, композиционных материалов. Дисциплина посвящена способам получения новых конструкционных материалов, заготовок и деталей из них, а также технологиям обработки и улучшения эксплуатационных свойств. Дисциплина является основой для изучения технологических дисциплин при подготовке магистров по машиностроительным программам.

Задачи изучения дисциплины заключаются в следующем:

- освоить основные направления развития современного материаловедения с обеспечением технологичности изделий и процессов;
- получить представления о современных методах производства машиностроительных материалов, в том числе, использующих элементы нанотехнологий;
- изучить основы мероприятий по замене дефицитных материалов с учетом инженерной защиты окружающей среды.

Место дисциплины в учебном процессе обусловлено тем, что предметом курса «Новые конструкционные материалы» являются современные, рациональные, нашедшие широкое распространение в промышленности, прогрессивные новые машиностроительные материалы.

Метод дисциплины “ Новые конструкционные материалы ” заключается в логически последовательном применении основных положений технологии современных конструкционных материалов и материаловедения при изучении основных направлений развития технологии машиностроения.



1.2 Связь с предшествующими и последующими дисциплинами (модулями, практиками, научно-исследовательской работой (НИР))

Дисциплина "Новые конструкционные материалы" изучается после дисциплин: "Химия" (используются знания законов протекания химических реакций окисления и восстановления металлов), "Физика" (используются знания законов об агрегатном состоянии веществ и фазовых превращениях, о теплоте и теплопередаче, электричестве, растворах, основных физических свойствах металлов в твердом и жидком состояниях), "Механика материалов" (используются знания о процессах упругой и пластической деформации, понятия конструкционной прочности и долговечности, особенности механизма разрушения материалов под нагрузкой), «Материаловедение». Компетенции (знания, навыки, умения), приобретенные в результате изучения данной дисциплины, будут использоваться также при изучении специальных дисциплин профильного цикла, научно-исследовательской деятельности в рамках учебного процесса и выполнении выпускной квалификационной работы.

Раздел 2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины и планируемые результаты обучения

Студенты, завершившие изучение дисциплины «Новые конструкционные материалы», должны обладать следующими компетенциями и должны быть способны:

сбирать, обрабатывать с использованием современных информационных технологий и интерпретировать необходимые данные для формирования суждений по соответствующим проблемам (ОК-4);

самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля для приобретения новых знаний и умений, в том числе в новых областях (ОК-5);

разрабатывать технологические нормативы на расход материалов (ПК-2);

участвовать в постановке целей проекта (программы), его задач при заданных критериях, целевых функциях, ограничениях, разработке структуры их взаимосвязей, определении приоритетов решения задач с учётом правовых и нравственных аспектов профессиональной деятельности (ПК-6);



Новые конструкционные материалы

разрабатывать (на основе действующих стандартов) техническую документацию (в электронном виде) для регламентного эксплуатационного обслуживания средств и систем машиностроительных производств (ПК-13);

разрабатывать мероприятия по комплексному использованию сырья, по замене дефицитных материалов и изысканию способов утилизации отходов производства (ПК-15);

проводить работы по стандартизации материалов (ПК-19).

В результате обучения в рамках базовой части цикла студент должен

знать: структуру и свойства современных конструкционных материалов и области их применения, сущность процессов получения специальных металлов, сплавов, пластмасс, композиционных материалов, особенности формообразования заготовок различными способами, новых материалах для получения неразъемных соединений сваркой, пайкой, склеиванием. Знать принципы основных технологических процессов производства и обработки новых материалов и сплавов, оборудование и инструмент для их осуществления и закономерности обеспечения технологичности изделий и процессов при применении новых современных конструкционных материалов;

уметь: выбирать тип современного конструкционного материала, оптимальные способы и методики их применения в производстве, применять новые методики создания конструкционных материалов, рассчитывать режимы обработки и назначать инструмент, правильно применять композиционные материалы и методы упрочнения деталей в зависимости от конструктивных особенностей и условий работы деталей;

владеть: навыками выбора современных материалов и назначения технологий их обработки и разрабатывать технологические нормативы по расходу материалов.

Студенты должны обладать следующими вузовскими (обобщёнными) компетенциями (**ВК**):

- общекультурные компетенции (**ВОК**) - способность и готовность приобретать с большой степенью самостоятельности новые знания в области современного материаловедения и технологии новых конструкционных материалов, используя современные образовательные и информационные технологии;

- профессиональные компетенции (**ВПК**) - способность применять знания в области современного материаловедения и технологий новых конструкционных материалов на уровне, необходимом для



Новые конструкционные материалы

решения задач, возникающих в сфере профессиональной деятельности (табл.1).

Таблица 1

Уровни освоения компетенций

ВОК	Знать	Уметь	Владеть
Уровень 1	<p>-основные этапы исторического развития материаловедения в машиностроении; историю появления современных новых конструкционных материалов</p> <p>-основные/базовые образовательные и информационные технологии для самостоятельного приобретения новых знаний в области новых конструкционных материалов.</p>	<p>-использовать знания об основных этапах и направлениях развития современного материаловедения в машиностроении в инженерном познании окружающего мира;</p> <p>-самостоятельно приобретать новые знания, используя базовые образовательные и информационные технологии.</p>	<p>-основными/базовыми образовательными и информационными технологиями для самостоятельного приобретения новых знаний;</p> <p>-методами восприятия, обобщения и анализа информации в области материаловедения в машиностроении.</p>
Уровень 2	<p>-основные этапы современного развития материаловедения в машиностроении;</p> <p>-профессиональную терминологию;</p> <p>-современные образовательные и информационные технологии для самостоятельного приобретения новых знаний в области применения новых конструкционных материалов в машиностроении.</p>	<p>-использовать знания об основных этапах и направлениях развития материаловедения в машиностроении в инженерном познании окружающего мира;</p> <p>-самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии.</p>	<p>-основами современных образовательных и информационных технологий для самостоятельного приобретения новых знаний;</p> <p>-методами восприятия, обобщения и анализа информации, постановки цели при выборе/разработке материала/технологического процесса в области нового материаловедения в машиностроении.</p>



Новые конструкционные материалы

<p>Уровень 3</p>	<p>-основные этапы исторического развития технологических процессов применения новых материалов в машиностроении; -профессиональную терминологию; -современные образовательные и информационные технологии для самостоятельного приобретения новых знаний в области современного материаловедения.</p>	<p>-использовать знания об основных этапах и направлениях современного развития материаловедения в машиностроении в инженерном познании окружающего мира; -самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии; -оформлять, представлять и докладывать результаты выполненной работы.</p>	<p>-основами современных образовательных и информационных технологий для самостоятельного приобретения новых знаний; -методами восприятия, обобщения и анализа информации, постановки цели и путей её достижения в области применения современного материаловедения в машиностроении.</p>
----------------------	--	--	---



Новые конструкционные материалы

<p>Уровень 1</p>	<p>-основные/базовые новые материалы и их технологии, применяемые в металлургии, машиностроении, материалобработке, отвечающие организационным основам безопасности;</p> <p>-базовые методики применения новых материалов при использовании технологий в машиностроении.</p>	<p>-осуществлять и корректировать технологические процессы получения новых современных конструкционных материалов и их обработки;</p> <p>-уметь осуществлять выбор перспективных материалов для изделий различного назначения с учетом современных эксплуатационных требований и охраны окружающей среды;</p> <p>-уметь обосновывать выбор оборудования для осуществления технологических процессов получения новых конструкционных материалов и их обработки.</p>	<p>-основными/базовыми производственными и эксплуатационно-техническими процессами в современном материаловедении для машиностроения и материалобработки;</p> <p>-методиками применения новых материалов при использовании современных технологий машиностроения.</p>
----------------------	--	--	---



Новые конструкционные материалы

<p>Уровень 2</p>	<p>-основные/базовые новые материалы и технологии, производственные, и эксплуатационно-технические процессы, применяемые в машиностроении и материалобработке, отвечающие организационным основам безопасности;</p> <p>-базовые методики применения новых материалов при использовании технологий машиностроения;</p> <p>-перспективы развития технологических процессов и современных конструкционных материалов в части защиты человека и природной среды от опасностей техногенного характера.</p>	<p>-уметь разработывать техническую документацию, осуществлять и корректировать технологические процессы получения конструкционных материалов и технологий их обработки;</p> <p>-уметь осуществлять выбор материалов для изделий различного назначения с учетом эксплуатационных требований и охраны окружающей среды;</p> <p>-уметь обосновывать выбор оборудования для осуществления технологических процессов получения новых конструкционных материалов и их обработки.</p>	<p>-основными/базовыми производственными, и эксплуатационно-техническими процессами в машиностроении и материалобработке при применении новых конструкционных материалов, техническом обслуживании и ремонте транспортных и технологических машин и оборудования;</p> <p>-методиками применения новых материалов при использовании современных технологий текущего ремонта и технического обслуживания наземных транспортных средств.</p>
----------------------	---	---	---



Новые конструкционные материалы

<p>Уровень 3</p>	<p>-современные материалы и технологии, производственные и эксплуатационно-технические процессы, применяемые в машиностроении, материалообработке, техническом обслуживании технологических машин и оборудования, отвечающие организационным основам безопасности;</p> <p>-современные методики применения новых материалов при использовании технологий машиностроения и технического обслуживания оборудования и технических средств;</p> <p>-перспективы развития технологических процессов в машиностроении в части защиты человека и природной среды от опасностей техногенного характера.</p>	<p>-уметь выявлять объекты (материалы, их свойства, технологические процессы) для улучшения;</p> <p>-уметь разрабатывать техническую документацию, осуществлять и корректировать технологические процессы получения современных конструкционных материалов и их обработки;</p> <p>-уметь осуществлять выбор материалов для изделий различного назначения с учетом экстремальных эксплуатационных требований и охраны окружающей среды;</p> <p>-уметь обосновывать выбор оборудования для осуществления технологических процессов получения современных конструкционных материалов и технологий их обработки.</p>	<p>-способностью принимать участие в инженерных разработках новых материалов и технологических процессов среднего уровня сложности в составе коллектива;</p> <p>-современными производственными, технологическими процессами в машиностроении и материалообработке при применении новых материалов, техническом обслуживании технологических машин и оборудования;</p> <p>-современными методиками применения новых материалов при использовании современных технологий в машиностроении.</p>
----------------------	---	--	---



Раздел 3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Тематический план дисциплины

В соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования к минимуму содержания и уровню подготовки магистров по направлению подготовки 151000 «Технологические машины и оборудование» по дисциплине «Новые конструкционные материалы» студент должен знать состав, свойства и назначение современных конструкционных материалов, применяемых в машиностроении. Понимать сущность процессов получения современных металлов, сплавов, композиционных материалов, особенности формообразования из этих материалов заготовок различными способами литья и пластическим деформированием, основы получения композиционных и порошковых материалов, методы изготовления деталей из металлических, порошковых и полимерных композиционных материалов.

Раздел (название)	Название темы, литература	Содержание
Введение. Классификация новых конструкционных материалов и их свойства	1.1 Классификация новых материалов [7.1.1] 1.2 Свойства материалов [7.1.1, 7.1.2]	Общая характеристика современных машиностроительных отраслей промышленности. Классификация современных конструкционных материалов. Свойства новых материалов, металлов и сплавов (физические и химические, механические, эксплуатационные и технологические). Понятие о конструкционной прочности и долговечности в экстремальных условиях эксплуатации современных машин и агрегатов.



Новые конструкционные материалы

<p>Порошковые материалы и способы изготовления изделий из порошков</p>	<p>2.1. Строение и свойства порошковых материалов [7.1.1, 7.1.2] 2.2. Современные технологии производства деталей из порошков [7.1.1, 7.1.2, 7.2.4]</p>	<p>Строение и свойства конструкционных материалов и современных металлических порошковых материалов. Порошковая металлургия. Методы получения порошков и изготовление из них изделий. Варианты получения готовых изделий по схеме «прессование-спекание». Сквозные технологические схемы гранульной металлургии высоколегированных сталей и сплавов с капсулированием и горячей деформацией капсул (изостатическая прессование, изостатическая штамповка, экструзия). Получение интегральных изделий. Антифрикционные и фрикционные материалы. Пористые фильтрующие элементы. Порошковые интерметаллиды. Интерметаллиды титана с алюминием и железа с алюминием. Механическое легирование. Понятие о наноматериалах и нанотехнологиях. Ультрадисперсные материалы. Области применения. Свойства. Получение ультрадисперсных порошков, нанокристаллов и нановолокон. Применение нанотехнологий для получения новых конструкционных материалов.</p>
--	--	---



Новые конструкционные материалы

<p>Современные неметаллические материалы. Полимеры и пластмассы</p>	<p>3.1 Полимеры и пластмассы [7.1.1, 7.1.3] 3.2. Новые неметаллические материалы [7.1.1, 7.1.3, 7.1.4] .</p>	<p>Виды полимеров. Их свойства. Технология получения полимеров и области применения. Понятие о термоактивных и термопластичных полимерах. Пластмассы – классификация, свойства и области применения. Особенности технологий производства изделий и деталей из пластмасс. Резины и резинотехнические изделия и уплотнения. Керамика, стекло и технологии производства изделия из таких материалов. Использование керамических материалов как заменителей традиционных материалов.</p>
<p>Композиционные материалы</p>	<p>4.1 Металлические композиционные материалы [7.1.1, 7.1.2, 7.1.4]. [7.1.1, 7.1.2] 4.2. Неметаллические композиционные материалы [7.1.1, 7.1.2, 7.1.4]</p>	<p>Дисперсноупрочненные искусственные и естественные композиты. Композиты на базе никеля, алюминия, титана. Керамические композиты. Волокнистые и слоистые композиты. Механизм упрочнения. Области применения. Технология получения конструкционных композитов. Слоистые металлоорганопластики. Углепластики. Композиты с керамической матрицей. Армированные стали. Волокнистые композиты со специальными свойствами. Использование композиционных материалов как заменителей традиционных металлов.</p>



Новые конструкционные материалы

<p>Сплавы специального назначения</p>	<p>5.1. Современные жаростойкие, жаропрочные, хладопроочные и коррозионностойкие сплавы [7.1.1, 7.2.1, 7.2.2] 5.2. Металлы и сплавы с особыми свойствами [7.2.2]</p>	<p>Критерии жаростойкости, жаропрочности и хладопроочности. Понятие коррозионной стойкости. Структура, свойства новых материалов и сплавов, предназначенных для работы в подобных условиях эксплуатации. Суперсплавы. Сплавы криогенной техники. Тугоплавкие металлы. Радиационностойкие материалы. Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами. Металлы с памятью формы. Аморфные и нанокристаллические сплавы.</p>
<p>Материалы для поверхностного упрочнения деталей и процессов соединения деталей</p>	<p>6.1. Материалы для поверхностного упрочнения деталей [7.1.1, 7.2.3] 6.2. Материалы для процессов соединения деталей [7.1.1, 7.2.3]</p>	<p>Современные технологии получения покрытий технологиями наплавки и напыления. Металлические и неметаллические покрытия. Осаждение в вакууме или из газовой фазы. Органические полимерные покрытия. Применение покрытия в современном машиностроении Материалы для пайки и склеивания. Современные припои, флюсы, клеи. Современные виды клеевых и паяных соединений и технологий пайки и склеивания.</p>



Новые конструкционные материалы

Распределение бюджета времени по видам занятий

3.2 Лекционные занятия

№ рейтингово- го блока	№ темы	Объем времени, час			
		Норм.		Сокр.	
		очная	заочная	очная	заочная
1	3	4	5	6	7
1	1.1	1			
	1.2	1			
	2.1	2			
	2.2	2			
	3.1	2			
	3.2	2			
2	4.1	2			
	4.2	2			
	5.1	2			
	5.2	2			
	6.1	1			
	6.2	1			
Итого		20			

3.3. Практические занятия

№ практи- ческого занятия	Тема практического занятия, литература из карты методического обеспечения	№ те- мы из разде- ла 2	Объем времени, час			
			Норм.		Сокр.	
			очная	заочная	очная	заочная
1	2	3	4	5	6	7
3.3.1	Классификация, мар- кировка и свойства современных кон- струкционных матери- алов	1.1.	4			
3.3.2	Технология получения материалов и изделий методами порошковой металлургией	2.1., 2.2.	4			



Новые конструкционные материалы

3.3.3.	Определение и расчет свойств композиционных материалов, применяемых в машиностроении	4.1., 4.2.	4			
3.3.4.	Расчет прочности и устойчивости конструкционных материалов на основе сэндвичевых структур	5.1., 5.2.	4			
3.3.5.	Особенности применения и расчет металлополимерных самосмазывающихся материалов в подшипниках скольжения	6.1.	4			
Итого			20			

3.5. Самостоятельная работа студентов

№ п.п.	Вид самостоятельной работы	Общий объем времени, час				Рекомендуемая литература
		Норм.		Сокр.		
		очная	заочная	очная	заочная	
1	2	3	4	5	6	7
1	Усвоение текущего учебного материала (работа с литературой и интерактивными материалами)	32				[7.1.1, 7.1.2, 7.1.3, 7.1.4, 7.2.1, 7.2.2, 7.2.3, 7.2.4]
2	Подготовка к практическим работам	16				7.4.1 – 7.4.12
3	Подготовка к экзамену	16				[7.1.1, 7.1.2, 7.1.3, 7.1.4, 7.2.1, 7.2.2]
Всего		64				



Раздел 4. Образовательные технологии

В процессе обучения большая роль отведена практическим занятиям. Все эти занятия полностью обеспечены методическими указаниями и справочными материалами. При чтении лекционного курса используются современные мультимедийные средства и интерактивная доска, подготовлены для этой цели графические материалы. В течение семестра дважды проводится контроль текущей успеваемости. Результаты учебного процесса непрерывно отражаются в системе «Электронный журнал», который доступен по Интернету каждому студенту. Задания на самостоятельную работу предусматривают систематическую работу в библиотеке и поиск информации по Интернету.

В процессе обучения реализуется используются следующие образовательные технологии:

4.1 Предметно-ориентированные технологии обучения:

- 4.1.1 Технология постановки цели
- 4.1.2 Технология полного усвоения
- 4.1.3 Технология педагогического процесса
- 4.1.4 Технология концентрированного обучения
- 4.1.5 Технология разноуровневого обучения

4.2 Личностно-ориентированные технологии обучения:

- 1) Технология обучения, как учебного исследования

Условия реализации указанных технологий:

Широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (компьютерные симуляции, выполнение расчетных заданий и работ, разбор конкретных ситуаций) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.



Раздел 5. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации и самоконтроля по итогам освоения дисциплины.

Рабочая программа дисциплины обеспечена в учебно-методическом комплексе фондом оценочных средств для проведения текущего контроля, промежуточного контроля и экзаменов. Фонд включает:

- задания для текущего контроля;
- задания для выполнения практических работ;
- вопросы к экзаменам;
- критерии для оценки достижений результатов освоения дисциплины в целом и по каждому виду работ.

5.1 Перечень всех вопросов по дисциплине для подготовки к промежуточным аттестациям и экзаменам представлен ниже:

Общая характеристика современных машиностроительных отраслей промышленности. Классификация современных конструкционных материалов. Свойства новых материалов, металлов и сплавов (физические и химические, механические, эксплуатационные и технологические). Порошковая металлургия. Методы получения порошков и изготовление из них изделий. Варианты получения готовых изделий по схеме «прессование-спекание». Антифрикционные и фрикционные материалы. Пористые фильтрующие элементы. Порошковые интерметаллиды. Интерметаллиды титана с алюминием и железа с алюминием.. Понятие о наноматериалах и нанотехнологиях. Ультрадисперсные материалы. Получение ультрадисперсных порошков, нанокристаллов и нановолокон. Виды полимеров и их свойства. Технология получения полимеров и области применения. Понятие о терморезистивных и термопластичных полимерах. Пластмассы – классификация, свойства и области применения. Особенности технологий производства изделий и деталей из пластмасс. Резины и резинотехнические изделия и уплотнения. Керамика, стекло и технологии производства изделия из таких материалов. Волокнистые и слоистые композиты. Технология получения конструкционных композитов. Слоистые металлоорганопластики. Углепластики. Компози-



Новые конструкционные материалы

ты с керамической матрицей. Армированные стали. Волокнистые композиты со специальными свойствами. Критерии жаростойкости, жаропрочности и хладопрочности. Понятие коррозионной стойкости. Структура, свойства новых материалов и сплавов, предназначенных для работы в подобных условиях эксплуатации. Суперсплавы. Сплавы криогенной техники. Тугоплавкие металлы. Радиационностойкие материалы. Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами. Металлы с памятью формы. Аморфные и нанокристаллические сплавы. Современные технологии получения покрытий технологиями наплавки и напыления. Металлические и неметаллические покрытия. Осаждение в вакууме или из газовой фазы. Органические полимерные покрытия. Материалы для пайки и склеивания. Современные припои, флюсы, клеи. Современные виды клеевых и паяных соединений и технологий пайки и склеивания.

5.2 Технические средства обучения и контроля, использование ЭВМ:

- Система интерактивного обучения с доступом в Интернет;
- Сайт Центра дистанционного обучения <http://de.dstu.ru>

Раздел 6. Уровни и критерии итоговой оценки результатов освоения дисциплины

Уровни	Критерии выполнения заданий ОС	Итоговый семестровый балл ¹	Итоговая оценка
Недостаточный	Имеет представление о содержании дисциплины, но не знает основные положения курса по строению материалов и их свойствам. Не умеет выполнять основные задания, предусмотренные практическими работами по дисциплине.	Менее 41	Неудовлетворительно

¹ итоговый семестровый балл, определяемый в соответствии с «Положением о системе «Контроль успеваемости и рейтинг студентов» (КУРС)



Новые конструкционные материалы

Базовый	Знает и воспроизводит основные положения дисциплины в области классификации новых материалов и их свойств, знает существо технологических процессов их применения, умеет решать основные, но самые простые задачи, предусмотренные практическими работами по дисциплине.	41 -60	Удовлетворительно
Повышенный	ПУ 1 Знает и понимает основные положения дисциплины, демонстрирует умение применять их для выполнения практических заданий, в которых нет явно указанных способов решения. Умеет формулировать служебное назначение изделий машиностроения и условия их эксплуатации, определять требования к их свойствам и качеству, <u>выбирать современные материалы для</u> изготовления деталей машин, способы получения заготовок из новых материалов, средства технологического оснащения при разных методах обработки, технологии обработки новых конструкционных материалов. В том числе умеет применять мероприятия по замене дефицитных материалов.	61 -80	Хорошо
Продвинутый	ПУ 2 То же, что и в критериях уровня ПУ-1, а также знает вопросы технологической подготовки современного производства, разработки технологических нормативов по расходу материалов, задачи проектирования технологических процессов в области новых материалов, основные расчеты режимов техпроцессов, владеет навыками выбора новых материалов и назначения новых методов их создания. Умеет обеспечивать технологичность изделий и процессов при применении современных материалов.	81 - 100	Отлично



Раздел 7. Учебно-методическое и программно-информационное обеспечение.

Карта методического обеспечения дисциплины

№ п/п	Авторы	Название	Издательство	Гриф издания	Год издания	Кол-во в библиотеке	Ссылка на электронный ресурс	Доступность
1	2	3	4	5	6	7	8	9
7.1 Основная литература								
7.1.1.	Учебник под ред. А.М. Дальского	Технология конструкционных материалов	М.: Машиностроение		2004	185		
7.1.2.	Учебник под ред. Б.Н. Арзамасова	Материаловедение	М.: Изд-во МГТУ им. Баумана		2005	10		



Новые конструкционные материалы

7.1.3.	Рыжонков Д.И.	Наноматериалы	М.: Изд-во БИНОМ		2012	-	http://www.iprbookshop.ru/nanomaterialy-uchebnoe-posobie.html	С любой точки доступа для авторизованного пользователя
7.1.4.	Богодухов С.И.	Технологические процессы в машиностроении	М.: Машиностроение		2007	-	http://www.iprbookshop.ru/technologicheskie-procressyi-v-mashinostroenii-uchebnik.html	С любой точки доступа для авторизованного пользователя



Новые конструкционные материалы

7.2 Дополнительная литература

7.2.4.	Под редакцией Карабасова Ю.С.	Новые материалы	М.: Изд-во МИСИС		2002	3		
7.2.5	Б.Б.Бобович Учебное пособие	Неметаллические конструкционные материалы	М.: Изд-во МГИУ		2009	11		

7.3 Периодические издания

7.3.1		Порошковая металлургия			1995, № 1-12			
7.3.2		Материаловедение			2008 - 2012	-	http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7878	С любой точки доступа для авторизованного пользователя
7.3.3		Машиностроение и высшее образование			2010, № 1-4			
7.3.4		Металлообработка			2011, № 1,2			
7.3.5		Металлофизика и новейшие технологии			2000, № 1-12			



Новые конструкционные материалы

7.3.6		Нанотехника			2010, № 1,2			
7.4 Практические занятия								
7.4.1	Колотиенко С.Д. и др.	Определение и расчет прочностных свойств композиционных материалов. Методические указания по выполнению практической работы	ДГТУ, Ростов н/Д		2012	50		
7.4.2	Рубанов В.В. и др.	Классификация и маркировка машиностроительных материалов. Методические указания по выполнению практической работы	ДГТУ, Ростов н/Д		2010	50		
7.4.3	Кем А.Ю. и др.	Технология получения материалов и изделий методами порошковой металлургии. Методические указания по выполнению практической работы	ДГТУ, Ростов н/Д		2012	50		



7.4.4	Кохановский В.А. и др.	Расчет металлополимерных самосмазывающихся подшипников скольжения. Методические указания по выполнению практической работы	ДГТУ, Ростов н/Д		2006	50		
<p>7.5. Программно–информационные обучающие материалы</p> <p>7.5.1 Microsoft Word.</p> <p>7.5.2. Microsoft Excel.</p> <p>7.5.3. Компьютерные фрагменты: Способы получения сталей и сплавов с особыми свойствами. Современные технологии обработки новых конструкционных материалов. Формирование изделий из полимерных и композиционных материалов. Порошковая металлургия.</p>								



Раздел 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

8.1. Интерактивная информационная доска.

8.2. Доступ в Интернет.



Новые конструкционные материалы

Экспертное заключение

Совета направления 151000 Технологические машины и оборудование по рабочей программе дисциплины Новые конструкционные материалы предусмотренной учебным планом подготовки магистров по направлению 151000 Технологические машины и оборудование

Рассмотрев структуру, содержание и качество оформления рабочей программы по дисциплине совет отмечает:

- рабочая программа по содержанию соответствует Государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования в части выполнения требований, предъявляемых к уровню профессиональной квалификации выпускников, их знаний, умений и навыков по соответствующему циклу дисциплин и по самой дисциплине, а так же требованиям Стандарта ДГТУ;

- соотношение объемов основных разделов выбраны логично и в целесообразных пропорциях;

- бюджет времени, отводимый на различные виды аудиторных занятий, согласуется с бюджетом времени, выделяемого для выполнения самостоятельной работы;

- объем и количество видов СРС обоснованы и соответствуют фактическим трудозатратам на их выполнение;

- достаточную полноту информационно-методического обеспечения, разработаны методические материалы для проведения практических занятий и задания для проверки усвоения знаний по дисциплине.

Рекомендации Совета:

- подготовить заявку для издания учебного пособия через РИЦ университета.

На основании выше изложенного, совет специальности предлагает утвердить рабочую программу по дисциплине Новые конструкционные материалы, представленную на экспертизу.

Председатель совета направления

Ю.А.Гордин

Члены экспертной группы:

Ю.В.Полетаев



Новые конструкционные материалы

И.А.Хозяев

Б.С.Мороз

Г.В.Чумаченко

В.С.Сидоренко

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС





Новые конструкционные материалы

Появление новых конструкционных материалов и разработка технологий их получения являются объективной необходимостью технического и социального развития общества. Это видно из краткого перечня основных направлений использования новых перспективных материалов:

- для информационных технологий (оптические и магнитные запоминающие системы, электронные приборы, дисплеи);

- для транспортных средств (автомобилестроение, аэрокосмическая техника, железнодорожный и водный транспорт);

- для тепло- и электроэнергетики (электростанции, системы накопления и распределения энергии, системы хранения и транспортировки топлива, системы для возобновления энергии);

- для станкоинструментальной промышленности;

- для медицинской техники (хирургический инструмент, протезы, имплантаты);

- строительные материалы.

Возрастание требований потребителей к свойствам конструкционных материалов можно свести к следующим показателям:

- повышению удельных механических свойств (прочность, упругость и т.п. в расчете на единицу массы или удельного веса), что должно обеспечивать снижение массы изделий и затрат на их эксплуатацию;

- повышению сопротивляемости материала воздействию рабочей среды (температуры, агрессивности среды, радиационному и пучковому излучению и т.п.);

- повышению долговечности (ресурса службы) материала и его надежности в эксплуатации.

Одним из ведущих высокотехнологических потребителей новых металлических материалов является аэрокосмический комплекс. В этом комплексе новые материалы должны обеспечить повышение безопасности полетов, снижение эксплуатационных расходов, в том числе снижение расхода топлива и загрязнения окружающей среды в процессе эксплуатации летательных аппаратов.

Ответственные задачи стоят перед мировой энергетикой. В ближайшие 20 лет мировое производство электроэнергии должно возрасти в два раза при условии повышения экономичности ее производства и снижения вредного воздействия на окружающую среду, что требует использования новых металлических и неметаллических материалов. В си-



Новые конструкционные материалы

чи) и хранения энергии (накопители) большая роль отводится сверхпроводникам, работающим при температурах выше 20К и температурах равных 77К в сильных и слабых магнитных полях. Эти же сверхпроводники перспективны и для транспорта на магнитных подушках.

В автомобилестроении основным направлением развития является создание легких, безопасных, комфортабельных и экологически чистых в эксплуатации моделей. В США средняя масса легкового автомобиля в 1975 году составила 1800 кг, в 1990 г – 1350 кг. Специальной программой PNGV намечено довести эту величину до 750 кг, создав модели с расходом топлива 3,5 литра на 100 км. Аналогичные программы разрабатываются в Европе. Для достижения этих целей должны широко использоваться легкие металлы (Al, Mg, Be) и их сплавы, металлические и неметаллические композиты, металлопены, керамика, интерметаллиды. На железнодорожном и водном транспорте главными целями развития являются повышение экономичности и экологической безопасности при снижении массы транспортных средств и повышении их энерговооруженности.

Постоянно требуются новые материалы в области информационных технологий, например для компакт- и видеодисков для записи с помощью голубых и зеленых лазеров, что существенно увеличивает емкость дисков. Интенсивно (прирост в год более 50%) развивается производство магнитных запоминающих устройств и продолжается их миниатюризация.

Для достижения вышеуказанных целей разрабатываются новые виды металлических и неметаллических материалов.

Особое внимание уделяется легким цветным металлам и сплавам на их основе; материалам, имеющим мелкодисперсную и ультрамелкодисперсную структуру, монокристаллическим, аморфным и порошковым материалам.

Такие структуры обеспечивают прочностные характеристики иногда на порядок превышающие традиционные значения прочности и придают материалам особые технологические, физические и эксплуатационные свойства.

Материалы с такими структурами служат основой для создания различного рода композиционных материалов, деталей, полученных методами порошковой металлургии, и других деталей, обладающих специальными свойствами.



ТЕМА 1

КЛАССИФИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исходя из природы конструкционных и инструментальных материалов, их можно разделить на следующие основные группы:

1. Металлические материалы, к которым относятся:

сплавы на основе железа – чистое железо, стали, чугуны; стали и сплавы с особыми физическими свойствами (магнитные и немагнитные стали и сплавы, аморфные сплавы, сплавы с высоким электрическим сопротивлением, сплавы с эффектом памяти формы и т.д.);

цветные металлы и сплавы – алюминий и сплавы на его основе (деформирующиеся и литейные; упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой), медь и сплавы на ее основе (латуни, бронзы), титан и сплавы на его основе, подшипниковые сплавы и др.

композиционные материалы с металлической матрицей;

2. Неметаллические материалы:

полимерные органические материалы – пластмассы (термореактивные и термопластичные), резины;

композиционные материалы с неметаллической матрицей (стекло-пластики, углепластики, оргпластики и др.);

неорганические материалы (стекло, ситаллы, керамика);

3. Материалы со специальными свойствами – электронные материалы, материалы с особыми оптическими свойствами (волоконная оптика, люминофоры), проводниковые материалы.

Кроме того, возможна классификация конструкционных материалов по свойствам, определяющим выбор материала для конкретных деталей конструкций. Каждая группа материалов оценивается соответствующими критериями, обеспечивающими работоспособность в эксплуатации. Универсальные материалы рассматриваются в нескольких группах, если возможность их применения определяется различными критериями.

В соответствии с выбранным принципом классификации все конструкционные материалы подразделяют на следующие группы:

материалы, обеспечивающие жесткость, статическую и циклическую прочность (стали);

материалы с особыми технологическими свойствами;

износостойкие материалы;



Новые конструкционные материалы

материалы с высокими упругими свойствами;
материалы с малой плотностью;
материалы с высокой удельной прочностью;
материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды

Сплавы с особыми физическими свойствами

Ферриты

Ферриты – это ферромагнитная керамика, сочетающая в себе высокие магнитные свойства и высокое удельное электрическое сопротивление и, следовательно, низкие потери на вихревые токи. Это позволяет применять их в области высоких и СВЧ, т.е. там, где металлические магнитомягкие материалы применять уже нельзя.

Ферриты представляют собой сложные системы оксидов железа и двухвалентного (реже одновалентного) металла, имеющие общую формулу $MeO \cdot Fe_2O_3$. В качестве металла применяют Ni, Mn, Co, Fe, Zn, Cd, Li и др., которые и дают название ферриту. Например, $NiO \cdot Fe_2O_3$ – никелевый феррит, $ZnO \cdot Fe_2O_3$ – цинковый феррит. Применяющиеся в технике ферриты называют также оксиферами. В последнее время широко применяют ферриты с общей формулой $3Me_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$ (где Me – двух- или трехвалентный металл).

Свойства ферритов и соответственно изделий из них сильно зависят от их состава и технологии получения. В промышленности используют наиболее простую технологию, которая заключается в спекании оксидов при повышенной температуре: в подготовленный ферритовый порошок, состоящий из обожженных оксидов соответствующих металлов, тонко измельченных и тщательно перемешанных, добавляют пластификатор (обычно раствор поливинилового спирта), из полученной массы под большим давлением прессуют изделия требуемой формы и обжигают их при температуре 1100 – 1400оС. В процессе обжига и формируется феррит, представляющий собой твердый раствор оксидов. При этом происходит усадка, которая может составлять 10 – 20%. Очень важно, чтобы обжиг происходил в окислительной атмосфере (обычно в воздухе). Присутствие даже небольшого количества водорода может вызвать частичное восстановление оксидов, что приведет к увеличению магнитных потерь. Полученные ферритовые изделия являются твердыми, хрупкими и не позволяют производить какую-либо механическую обработку, кроме шлифования и полирования.



Новые конструкционные материалы

Ферриты имеют гранецентрированную плотно упакованную кристаллическую решетку, в которой ионы кислорода образуют тетраэдры и октаэдры. В центре тетраэдра располагается ион металла. Если этим ионом является Fe^{2+} , материал обладает магнитными свойствами. Примером таких материалов могут служить никелевый ($\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) и марганцевый ($\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) ферриты. Если этим ионом является Zn^{2+} или Cd^{2+} , образуется немагнитный цинковый ($\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) или кадмиевый ($\text{CdO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) феррит. Указанные явления объясняются тем, что в ферритах между магнитными моментами соседних атомов осуществляется косвенное обменное взаимодействие, которое приводит к их антипараллельной ориентации. В связи с этим в магнитном отношении кристаллическую решетку ферритов можно представить как состоящую из двух подрешеток, имеющих противоположные направления магнитных моментов ионов (атомов). В магнитном феррите намагниченность подрешеток не одинакова, в результате чего возникает суммарная спонтанная намагниченность, а в немагнитном феррите суммарная намагниченность равна нулю.

К магнитомягким ферритам в первую очередь относятся две группы ферритов: никель-цинковые и марганец-цинковые, представляющие собой трехкомпонентные системы $\text{NiO} - \text{ZnO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{MnO} - \text{ZnO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$.

В основу маркировки магнитомягких ферритов положена величина на-чальной магнитной проницаемости. Первое число в обозначении марки феррита указывает номинальное значение M_n . Следующая за ним буква Н или В обозначает низкочастотный или высокочастотный материал. Далее следует буква, указывающая на состав феррита: Н – никель-цинковый, М – марганец-цинковый. Например, марка 2000НМ означает низкочастотный марганец-цинковый феррит с $M_n = 2000$.

В ряде случаев в конце маркировки добавляют букву, которая указывает на область преимущественного использования данной марки феррита: С – в сильных полях, П – в контурах, перестраиваемых подмагничиванием, Т – для магнитных головок, РП – для радиопоглощающих устройств.

Специальные индексы в маркировке этих ферритов – цифры 1, 2 и 3, которые ставятся в конце обозначения, означают различия в свойствах.

Основные недостатки ферритов – трудность получения точных размеров изделий из-за большой усадки при обжиге (до 20%), недостаточно высокая воспроизводимость магнитных свойств, невысокие значения индукции насыщения и темпе-



ратуры Кюри, невысокая стабильность магнитных параметров во времени.

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов, используемых в различной аппаратуре, устройствах электромагнитной записи, фокусирующих устройствах телевизоров, микрофонах, электроизмерительных приборах, микроэлектронике, СВЧ-приборах и т.д.

Основными характеристиками магнитотвердых материалов являются коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r и максимальная удельная магнитная энергия W_m отдаваемая материалом в пространство. Магнитная энергия пропорциональна произведению B_r и H_c . Поскольку B_r ограничена магнитным насыщением ферромагнетика (железа), увеличение магнитной энергии достигается повышением коэрцитивной силы H_c .

Коэрцитивная сила магнитотвердых материалов на 1 – 4 десятичных порядка больше, чем у магнитомягких материалов, однако магнитная проницаемость M у них меньше. При этом чем больше H_c , тем меньше M .

Магнитный поток постоянного магнита с течением времени уменьшается. Это явление называют старением магнита. Старение магнитов может быть обратимым и необратимым.

Обратимое старение происходит под действием ударов, толчков, резких колебаний температуры, воздействия внешних постоянных полей. Оно приводит к снижению B_r на 1 – 3 %. Магнитные свойства при этом старении можно восстановить путем повторного намагничивания.

Необратимое старение связано с изменением структуры материала во времени и повторным намагничиванием не устраняется.

Высокая коэрцитивная сила у магнитотвердых материалов достигается созданием в кристаллической решетке большого количества внутренних напряжений, дислокаций и других дефектов путем легирования материала и последующей термической обработки. Кроме того, очень высокую H_c получают у материалов, состоящих из смеси магнитной и немагнитной фаз. При этом частицы магнитной фазы являются настолько мелкими, что не делятся на домены.

По составу и способу получения магнитотвердые материалы подразделяются на следующие группы: углеродистые и легированные стали мартенситной структуры; литые высококоэрцитивные сплавы; металлокерамические и металлопластиче-



ские магниты; магнитотвердые ферриты; сплавы на основе редкоземельных элементов; сплавы для магнитных носителей информации.

Углеродистые и легированные стали мартенситной структуры

Углеродистая сталь применяется для изготовления небольших по размеру магнитов. Обычно для этой цели используется сталь У10 – У12, которая после закалки имеет $H_c = 750 - 760$ А/м и $B_r = 0,8 - 0,85$ Тл.

Высокая коэрцитивная сила легированной стали достигается в результате максимального деформирования кристаллической решетки и создания тем самым большого количества внутренних напряжений, дислокаций и других дефектов путем легирования высокоуглеродистых сталей W, Mo, Cr или Co и последующей термической обработки для создания мартенситной структуры.

Хромистая сталь марок EX (0,95 – 1,1% C, 1,3 – 1,6% Cr) и EX3 (0,95 – 1,1% C, 2,8 – 3,6% Cr) имеет приблизительно такие же магнитные свойства, как и углеродистая сталь. Она обладает большей прокаливаемостью, поэтому ее можно использовать для изготовления магнитов больших размеров.

Стали марок EX5K5 и EX9K15M2, содержащие наряду с хромом 5 или 15% Co, обладают наиболее высокими магнитными свойствами ($H_c = 1250 - 2100$ А/м и $B_r = 0,8 - 0,85$ Тл) по сравнению с другими сталями.

Эти стали обладают низкими магнитными свойствами, сравнительно дешевы и допускают механическую обработку на металлорежущих станках. Величина B_r этих материалов не менее 0,8 – 1,0 Тл, H_c не менее 7,16 – 12 кА/м, W_m составляет 1 – 4 кДж/м³. Для получения гарантируемых магнитных свойств мартенситные стали подвергают термообработке, специфичной для каждой марки стали, и пятичасовой структурной стабилизации в кипящей воде. Применение мартенситных сталей вследствие их низких магнитных свойств в настоящее время ограничено. Их используют только в наименее ответственных изделиях.

Литые высококоэрцитивные сплавы

К этому классу материалов относятся тройные сплавы системы Fe – Al – Ni (старое название альни). Высококоэрцитивное состояние этих сплавов достигается при концентрации никеля 20 – 33% и алюминия 11 – 17%. Для улучшения магнитных и механических свойств и облегчения технологии изготовления изделий



эти сплавы легируют кремнием, кобальтом, медью, ниобием или титаном.

Литые высококоэрцитивные сплавы являются основными промышленными материалами для изготовления постоянных магнитов. Их магнитные характеристики: $B_r > 0,5 - 1,4$ Тл, $H_c > 36 - 110$ кА/м, $W_m > 3,6 - 32$ кДж/м³. У монокристаллических образцов $B_r > 0,7 - 1,05$ Тл, $H_c > 110 - 145$ кА/м, $W_m > 18 - 40$ кДж/м³.

Для улучшения магнитных свойств эти сплавы подвергают направленной кристаллизации, проводимой при особых условиях охлаждения. В результате образуется микроструктура в виде ориентированных столбчатых кристаллов. При этом улучшаются все магнитные характеристики, а магнитная энергия W_m повышается на 60 – 70% по сравнению с обычной кристаллизацией и достигает 40 кДж/м³.

Маркировка этих сплавов содержит буквы Ю и Н, которые соответственно означают алюминий и никель. Затем проставляются буквы легирующих элементов: Д – медь, К – кобальт, С – кремний, Т – титан, Б – ниобий. После буквы идет цифра, указывающая процентное содержание данного элемента. Буква А означает столбчатую кристаллическую структуру; АА — монокристаллическую структуру.

Сплавы альни с добавкой кремния раньше называли альниси, а сплав альни с кобальтом – альнико. Если сплав альнико содержал 24% кобальта – магнико.

Недостатком сплавов системы Fe – Al – Ni является их высокая твердость и хрупкость, поэтому они механически могут обрабатываться только шлифованием. Магнитные свойства этих сплавов существенно зависят от шихты, параметров процесса литья, режима термомагнитной обработки и др.

Металлокерамические и металлопластические магниты

Исходным сырьем для изготовления этих материалов является магнитный порошок, из которого получают детали, в том числе миниатюрные, достаточно точных размеров и не требующих дальнейшей механической обработки. Высококоэрцитивное состояние этих магнитов достигается за счет еще большего измельчения исходного материала, чем у магнитов из литых сплавов.

Металлокерамические магниты получают методом порошковой металлургии: из тонкодисперсных порошков сплавов системы Fe – Al – Ni, легированных Co, Si, Cu и др., прессуют изделия требуемой формы и размеров и при высокой температуре спекают. Полученные изделия содержат 3 – 5% по объему



пор, которые уменьшают остаточную индукцию B_r и магнитную энергию W_m на 10 – 20% по сравнению с магнитами из литых сплавов, но практически не влияют на коэрцитивную силу H_c . Механические свойства этих материалов лучше, чем у литых магнитов. Выпускаемые промышленностью металлокерамические магниты имеют $H_c = 24 - 128$ кА/м, $B_r = 0,48 - 1,1$ Тл, $W_m = 3 - 16$ кДж/м³.

Металлопластические магниты получают из тонкодисперсного порошка сплавов тех же систем, что и металлокерамические изделия, смешанного с порошком диэлектрика. Изделия получают методом прессования, аналогичным прессованию пластмасс. Из-за жесткого наполнителя для прессования необходимо высокое давление (до 500 МПа), температура полимеризации диэлектрика – до 180оС. В образовавшемся изделии связующим (фазой-матрицей) является диэлектрик, наполнителем – магнитным порошком. Механические свойства металлопластических магнитов лучше, чем у литых сплавов, но магнитные свойства хуже. Так как эти материалы содержат до 30% по объему неферромагнитную фазу из диэлектрика, их B_r меньше на 35 – 50%, W_m – на 40 – 60%.

К металлопластическим магнитам можно отнести эластичные магниты, в которых наполнителем, как правило, является феррит бария, а связующим – резина. Изделия из них можно изготавливать самой разнообразной формы; их можно резать ножницами, штамповать, скручивать. Эластичные магниты («магнитная резина») на основе феррита бария имеют следующие характеристики: $B_r = 0,145$ Тл, $H_c = 93$ кА/м, $W_m = 2$ кДж/м³, $\rho = 104$ Ом*м.

Магнитотвердые ферриты

Магнитотвердые ферриты (оксидные магниты) – это ферромагнетики с большой кристаллографической анизотропией. Технология их получения аналогична технологии приготовления керамики. При этом важным критерием являются степень и однородность измельчения шихты. Размер частиц шихты должен быть близок к критическому размеру однодоменности феррита (1 мкм).

Практическое применение получили ферриты бария, стронция и кобальта. Ферриты бария и стронция имеют гексагональную структуру с общей химической формулой $MeO \cdot nFe_2O_3$, где Me – барий или стронций, n – коэффициент, изменяющийся в зависимости от марки феррита от 4,7 до 6,0. Для получения определенного сочетания магнитных свойств в материал вводят оксиды Al, Si, В и Вi в количестве 0,1 – 3,0 % и редкозе-



Новые конструкционные материалы

мельные элементы – 0,1 – 1,0 %. Ферриты бария и стронция в сравнении с литыми магнитами обладают меньшими значениями B_r . Однако большая кристаллографическая анизотропия существенно увеличивает их H_c , что позволяет получать удовлетворительную W_m и придает им повышенную стабильность при воздействии внешних магнитных полей, ударов и толчков. Их плотность примерно в 1,5 раза ниже, чем у литых магнитов, а удельное сопротивление в миллион раз выше, что позволяет применять их в цепях, подвергающихся действию высокочастотных полей. Благодаря своим преимуществам магнитотвердые ферриты постепенно вытесняют магнитотвердые материалы других групп. Недостатком этих материалов является большая величина температурного коэффициента B_r , чем у литых магнитов.

Магниты на основе феррита бария выпускают изотропными (БИ) и анизотропными (БА), а ферриты стронция – анизотропными (СА). Производство магнитов марок (БА) и (СА) включает в себя прессование в постоянном магнитном поле ($H > 240 - 400$ кА/м) для улучшения свойств в направлении действия поля. Ферриты кобальта имеют кубическую структуру с общей химической формулой $CoO \cdot Fe_2O_3$. Их получают их по той же технологии, что и ферриты бария и стронция. Основное отличие заключается в термомагнитной обработке спеченных магнитов для придания им улучшенных свойств. Магнитные свойства феррита кобальта анизотропного (КА) заметно хуже, чем анизотропных ферритов бария и стронция. Однако в диапазоне температур $-70^\circ\text{C} - +80^\circ\text{C}$ КА имеет температурный коэффициент B_r в 3 – 4 раза меньше, чем у ферритов бария и стронция.

Сплавы на основе редкоземельных элементов

Сплавы металлов группы железа с редкоземельными элементами образуют интерметаллические соединения, обладающие наивысшими магнитными свойствами, полученными в настоящее время. Они имеют очень высокие значения H_c и W_m . Например, соединения типа RCo_5 (где R – редкоземельный элемент: самарий Sm, празеодим Pr, церий Ce и др., а кобальт может быть частично замещен Си или Fe), имеют $B_r = 0,77 - 0,90$ Тл, H_c до 800 кА/м, $W_m = 55,0 - 72,5$ кДж/м³ (лабораторные образцы имеют W_m до 128 кДж/м³), температуру Кюри 375 – 725°C. Магниты из этих соединений должны быть защищены от окисления оболочками из металла или оксидных пленок. Перспективы использования этих сплавов очень велики. Основным их недостатком являются низкие механические свойства (высокая хрупкость) и высокая стоимость.

Сплавы для магнитных носителей информации



Материалы этой группы должны иметь высокую остаточную индукцию для повышения уровня считываемого сигнала, а коэрцитивная сила H_c должна иметь оптимальное. Это требование объясняется тем, что при низких значениях H_c облегчается процесс стирания записи, но увеличивается эффект саморазмагничивания, что приводит к потере записанной информации, и наоборот. Опыт показал, что хорошие результаты дают материалы, у которых соотношение $H_c/B_r > 8$ кА/(м*Тл).

Для записи и воспроизведения информации используют металлические ленты (толщиной 0,005 – 0,01 мм) и проволоку (диаметром до 0,1 мм) из специальной нержавеющей стали ($H_c = 32$ кА/м, $B_r = 0,7$ Тл) и викаллия ($H_c = 36$ кА/м, $B_r = 1$ Тл). Недостатком этих сплавов является высокая стоимость и быстрый износ записывающих и воспроизводящих устройств.

В качестве магнитного носителя информации широко используют магнитотвердые порошковые покрытия, нанесенные на различные основания: металлические или пластмассовые ленты, металлические диски и барабаны. В качестве магнитного порошка используют оксиды железа Fe_2O_3 и Fe_3O_4 , имеющие соответственно светло-коричневый и черный цвета, магнитотвердые ферриты (феррит кобальта), сплавы типа альнико ($Fe - Ni - Al$).

Магнитные свойства лент, дисков и других устройств существенно зависят от размера частиц порошка, их ориентации и объемной плотности в рабочем слое. Размер частиц колеблется от долей микрометра до нескольких микрометров. Наиболее широкое применение в качестве основы магнитных лент нашли ацетилцеллюлозные или лавсановые ленты толщиной 20 – 50 мкм, на которые нанесен слой лака, содержащий магнитный порошок. Магнитные параметры пленки: $H_c = 6,4 - 20$ кА/м и $B_r = 0,8 - 0,4$ Тл. Качество поверхности ленты влияет на ее частотные показатели. Шумы при записи и воспроизведении являются следствием шероховатости поверхности, которая зависит от размера частиц порошка. При мелком помоле порошка шумы получаются незначительными. Поэтому для улучшения качества лент их рабочие поверхности полируют.

ТЕМА 2

ПРОВОДНИКОВЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Проводниковые металлы и сплавы должны обладать высокой электропроводностью, достаточно высокими механическими



Новые конструкционные материалы

свойствами, сопротивляемостью к атмосферной коррозии, способностью поддаваться обработке давлением в горячем и холодном состоянии.

После серебра наиболее высокой электропроводностью обладают медь и алюминий. Они и являются наиболее распространенными проводниковыми материалами. Проводимость отожженного проводникового алюминия составляет приблизительно 62% проводимости стандартной меди. Но плотность алюминия мала, поэтому проводимость 1 кг алюминия составляет 214% проводимости 1 кг меди. Следовательно, алюминий экономически более выгоден для использования в качестве проводникового материала.

Применяемые в настоящее время проводниковые материалы можно разделить на следующие группы: проводниковая медь, проводниковый алюминий, проводниковые сплавы, проводниковое железо, сверхпроводники..

Проводниковая медь. При наличии в меди даже небольшого количества примесей ее электропроводность быстро уменьшается

Для изготовления электрических проводов применяют электролитическую (катодную) медь, с суммарным содержанием примесей не более 0,05%. Катоды переплавляются в слитки, при этом содержание примесей в меди повышается. Проводниковая медь марки М1 должна содержать не более 0,1% примесей, в том числе не более, %: 0,001 Bi; 0,002 Sb; 0,002 As; 0,005 Fe; 0,002 Ni; 0,005 Pb; 0,002 Sn; 0,005 S; 0,05 O; 0,003 Ag. Фосфор для раскисления меди марки М1 не применяется.

Проводниковая медь имеет в отожженном состоянии имеет предел прочности 270 МПа. Предел прочности меди может быть повышен до 480 МПа путем холодной деформации, но при этом ее удельное сопротивление увеличивается

Проводниковый алюминий. Недостатком алюминия является его сравнительно низкая прочность. Отожженный алюминий почти в три раза менее прочен на разрыв, чем медь. Поэтому при изготовлении проводов его упрочняют путем холодной деформации. В этом случае предел прочности составляет 250 МПа, что является недостаточным для сопротивления сильному натяжению, которое испытывают провода в линиях электропередач. Поэтому для линий электропередач применяют провода со стальной сердцевиной.

Для кабельных и токопроводящих изделий применяют алюминий марок А00, А0, А1, А2. Проводниковый алюминий



обычно содержит десятые доли процента примесей, из которых основными являются железо и кремний.

Термическая обработка проводникового алюминия для снижения его сопротивления обычно не применяется, так как холодная обработка алюминия мало снижает его электропроводность. Так при обжати до 95 – 98% электропроводность уменьшается не более чем на 1,2% электропроводности стандартной меди.

Проводниковые сплавы. В тех случаях, когда требуется повышенная прочность или специальные свойства (например, повышенное сопротивление истиранию), применяют сплавы на алюминиевой и медной основе. Композицию сплавов подбирают таким образом, чтобы легирующий металл не растворялся в основном металле, а упрочнение сплавов достигалось за счет интерметаллических фаз.

Проводниковое железо. Удельное электрическое сопротивление железа в 7 – 8 раз выше, чем у меди. Тем не менее, железо применяют в промышленности, т.к. оно является недефицитным материалом и имеет повышенную механическую прочность. При использовании железа в качестве проводникового материала оно должно быть достаточно чистым. Обычно для этих целей применяют армко-железо.

Железо используют при изготовлении биметаллических проводов, в этом случае сердцевину провода изготавливают из железа, а поверхностный слой из материала, имеющего более высокую электрическую проводимость (медь, алюминий).

Сверхпроводимость

С понижением температуры наблюдается монотонное падение электрического сопротивления материалов. Вблизи абсолютного нуля у многих металлов и сплавов происходит резкое падение электрического сопротивления, и они становятся сверхпроводниками.

Сверхпроводимость – способность материалов не оказывать сопротивления электрическому току при температурах ниже характерной для них критической температуры T_k .

Впервые сверхпроводимость обнаружил в 1911 г. голландский ученый Гейке Камерлинг-Оннес, который наблюдал скачкообразное исчезновение сопротивления ртути до неизмеримо малой величины при температуре 4,2 К.

К настоящему времени сверхпроводимость обнаружена у большинства чистых металлов, причем сверхпроводящее состояние легче всего возникает в металлах с низкой обычной



проводимостью. Открыто и изучено около трех тысяч сверхпроводящих сплавов и интерметаллических соединений, и их число непрерывно растет. Чистые металлы принято относить к сверхпроводникам первого рода, а сплавы и соединения – к сверхпроводникам второго рода.

Напряженность магнитного поля в объеме сверхпроводников при температурах ниже критической равна нулю. Металл становится диамагнетиком – материалом, приобретающим во внешнем магнитном поле магнитный момент, направленный против намагничивающего поля. Поэтому при переходе материала в сверхпроводящее состояние внешнее магнитное поле «выталкивается» из его объема и остается лишь в тонком поверхностном слое толщиной около 10–5 мм. Это явление называется эффектом Мейснера.

В обычном, неспаренном состоянии электроны рассеиваются на примесях, имеющих в металле, или на тепловых колебаниях кристаллической решетки – фонах. Рассеивание электронов приводит к возникновению электрического сопротивления. Куперовские пары не рассеиваются, так как энергия фононов, которую пара может получить от взаимодействия с ними или дефектами решетки при криогенных температурах, слишком мала. Не испытывая рассеяния, куперовские пары движутся сквозь решетку кристалла без сопротивления, что и приводит к явлению сверхпроводимости.

Сверхпроводящее состояние может быть разрушено как при нагреве материала до температуры выше критической, так и в результате воздействия сильных внешних магнитных полей с напряженностью H_k , превышающей критическое значение. Критическое магнитное поле подобно критической температуре является основной характеристикой сверхпроводящего материала. При превышении T_k или H_k происходит скачкообразное восстановление электрического сопротивления, и магнитное поле проникает в металл. Одним из главных преимуществ сверхпроводников является возможность достижения высоких плотностей тока. Чем выше плотность тока, тем компактнее приборы, меньше расход дорогостоящих сверхпроводящих материалов и меньше масса, которую необходимо охлаждать. Высокая плотность тока позволяет снизить капитальные и эксплуатационные расходы установок на сверхпроводниках.

Сверхпроводящие материалы и технология их производства

Из всех чистых метал-



сверхпроводящее состояние, наивысшую критическую температуру перехода имеет ниобий ($T_{кр} = 9,2 \text{ К}$). Однако для ниобия характерны низкие значения критического магнитного поля (около $0,24 \text{ Тл}$), что недостаточно для его широкого применения. Хорошим сочетанием критических параметров T_k и B_k отличаются сплавы и интерметаллидные соединения ниобия с цирконием, титаном, оловом и германием.

Сплавы и соединения ниобия переходят в сверхпроводящее состояние при достаточно высоких температурах. Они могут выдерживать довольно сильные магнитные поля и характеризуются высокой плотностью тока. В жидком гелии при внешнем поле с индукцией $2,5 \text{ Тл}$ критическая плотность тока составляет: для $Nb - Zr - 1 \text{ кА/мм}^2$; для $Nb - Ti - 2,5 \text{ кА/мм}^2$; $Nb3Sn - 17 \text{ кА/мм}^2$; $V3Ga - 5 \text{ кА/мм}^2$.

К наиболее распространенным сверхпроводящим материалам относится сплав Nb (основа) с $46,5 \%$ Ti (по массе). Этот сплав отличается высокой технологичностью, из него обычными методами плавки, обработки давлением и термической обработки можно изготавливать проволоку, кабели, шины. Интерметаллиды, хотя и обладают более высокими критическими параметрами, имеют высокую хрупкость, что затрудняет изготовление из них длинномерных проводов традиционными методами металлургической технологии.

При изготовлении сверхпроводящего кабеля в бруске меди просверливают множество отверстий и в них вводят тонкие $Nb - Ti$ стержни. Брусек протягивают в тонкую проволоку, вновь разрезают ее на куски, которые снова вводят в новые бруски. Повторяя многократно эту операцию, получают кабель с большим числом сверхпроводящих жил, из которого делают катушки для электромагнитов.

Если в какой-либо жиле сверхпроводимость случайно нарушится, то высокая электро- и теплопроводность медной матрицы дает возможность осуществить термическую стабилизацию сверхпроводника в докритическом режиме.

Применение хрупких интерметаллидов значительно усложняет изготовление кабеля. Для получения проводов из сверхпроводящего соединения $Nb3Sn$ применяют так называемую бронзовую технологию, основанную на селективной твердофазной диффузии. Тонкие нити пластичного ниобия запрессовывают в матрицу из бронзы, содержащую $10 - 13 \%$ Sn . В результате многократного волочения и повторяющихся запрессовок с промежуточными отжигами и последующей термической обработкой



происходит диффузия олова в ниобий и на его поверхности образуется тонкая пленка Nb₃Sn. Из-за ничтожной растворимости медь в ниобий практически не диффундирует.

Для получения сверхпроводящих лент из соединений интерметаллидов кроме того применяют метод химического осаждения из газовой фазы. Его использование позволяет синтезировать соединение Nb₃Ge, имеющее наиболее высокую критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние.

Простота изготовления, благоприятное сочетание электрических и механических свойств и сравнительно низкая стоимость позволяют рекомендовать сверхпроводники на основе твердого раствора Nb – Ti в качестве основных материалов до $B_k = 8$ Тл при $T_k = 4,2$ К. В более сильных полях, когда плотность тока существенно падает, целесообразно использовать интерметаллические соединения типа Nb₃Sn.

В конце 1980-х годов была открыта высокотемпературная сверхпроводимость в керамических материалах.

В 1986 г. впервые были получены сверхпроводящие керамические оксидные образцы системы La – Ba – Cu – O с температурой перехода в сверхпроводящее состояние $T_k = 35$ К. Позднее на иттриевых керамиках системы Y – Ba – Cu – O была достигнута температура перехода в сверхпроводящее состояние T_k около 90 К, дающая возможность использовать дешевый и доступный жидкий азот в качестве хладагента. Керамика на основе соединений оксида меди с оксидом стронция, висмута и щелочноземельных элементов, например состава $2SrO \cdot CaO \cdot Bi_2O_3 \cdot 2CuO$, имеет еще более высокую T_k – до 100 – 115 К. В настоящее время исследователями ряда стран разработано большое число керамических материалов с переходом при температурах 250 К и даже при комнатной температуре. Значительная часть разработанных материалов характеризуется нестабильностью и большой хрупкостью.

Поиск новых сверхпроводников продолжается, хотя пока проблема остается чисто научной. В перспективе необходимо разработать технологию производства и применения высокотемпературных сверхпроводников.

Перспектива использования сверхпроводящих материалов

Наиболее важными областями применения сверхпроводников является создание сильных магнитных полей, получение и передача электроэнергии. Соленоид из сверхпроводящего материала может работать без подвода энергии извне сколь угодно долго, поскольку однажды возбужденный в нем ток не затухает. Поддержание соленоида в сверхпроводящем состоянии не



требует больших энергетических затрат. При нулевом сопротивлении легко решается проблема теплоотвода. Кроме того, сверхпроводящие магниты намного компактнее обычных. Каждый килограмм массы сверхпроводящего магнита создает магнитное поле, эквивалентное по силе полю 20-тонного электромагнита с железным сердечником.

Сверхпроводящие магниты используют для исследований в области физики высоких энергий, создания мощных магнитных кольцевых ускорителей частиц и систем управления движением пучков частиц на выходе из ускорителя. Сверхпроводящие магнитные системы применяют в жидководородных пузырьковых камерах, в которых по кривизне траекторий от пузырьков вскипающей жидкости определяют знак заряда и импульс пролетающих частиц.

Проблемы термоядерной энергетики не могут быть решены без применения мощных сверхпроводящих магнитов. Для осуществления управляемого термоядерного синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития необходимо удерживать в реакционном пространстве горячую тритий-дейтериевую плазму, нагретую до 108 – 109°С. Только сверхпроводящие магниты способны создать поля такой мощности.

В перспективе передачу энергии большой мощности целесообразно осуществлять с помощью сверхпроводящих кабельных подземных линий. Расчеты показали, что по сверхпроводящему кабелю толщиной в руку можно пропускать всю пиковую мощность, вырабатываемую электростанциями США. Из технико-экономического анализа следует, что при передаче энергии большой мощности (порядка 3 – 4 ГВ*А) благодаря малой удельной материалоемкости и меньшей ширине трассы сверхпроводящий кабель будет в 2 – 3 дешевле обычного. При этом он характеризуется большей пропускной способностью и меньшими потерями.

Сверхпроводящие кабели имеют поперечное сечение в виде ряда мно-гослойных труб с вакуумной изоляцией между ними. Внутренние трубы по-крыты слоем сверхпроводящего материала толщиной около 0,3 мм и заполнены жидким гелием. В качестве сверхпроводника может быть использован сплав ниобия с титаном или цирконием. Кабели подобной конструкции прошли производственные испытания в России, США и Японии.

Сверхпроводимость позволяет также решить проблему запаса электро-энергии впрок с выдачей ее при пиковых нагрузках. Индуктивный накопитель энергии представляет собой тороид-



Новые конструкционные материалы

дальный криостат диаметром несколько метров, по виткам обмотки которого практически без потерь циркулирует ток.

Обычный железнодорожный поезд, движущийся по стальным рельсам, имеет принципиальный предел скорости около 350 км/ч. При его превышении нарушается надежное сцепление колес с рельсами, резко возрастает сила аэродинамического сопротивления, появляется «токосъемный барьер», препятствующий нормальному функционированию системы подвески контактного провода вследствие слишком больших вибраций.

В днище вагонов поезда установлены сверхпроводящие электромагниты 4, охлаждаемые жидким гелием 5. При движении поезда в алюминиевых полосах-рельсах 1 наводятся токи, в свою очередь создающие магнитные поля. Согласно правилу Ленца, магнитное поле индуцированного тока противоположно по направлению внешнему магнитному полю, и между магнитом и алюминиевой полосой возникают силы отталкивания, приподнимающие вагон над эстакадой. Применение сверхпроводящих магнитов позволяет поднять вагон над дорогой на высоту более 100 мм.

Тяга создается с помощью линейного бесконтактного электродвигателя. Линейный двигатель 3 можно представить как модификацию обычного вращающегося двигателя, который разрезали вдоль образующей, развернули и уложили на плоскости. На полотне дороги между алюминиевыми полосами проложен третий активный рельс, который играет роль статора, а сверхпроводящая катушка вагона – ротора. Вдоль пути движется тянущая поезд магнитная волна, скорость которой пропорциональна частоте переменного тока в рельсе.

Колеса в поезде на магнитной подушке используются, как в самолете, только для разгона и торможения. По аналогии такие поезда называют магнитопланами.

В Японии проложена скоростная магистраль между Токио и Осакой протяженностью 500 км, по которой курсируют сверхпроводниковые поезда со скоростью 500 км/ч.

Криогенные сверхпроводящие материалы, находящие применение в электродвигателях и трансформаторах, позволяют уменьшить их объем, снизить массу на 80 %, довести коэффициент полезного действия при этом до 98 %.

Вращающийся сверхпроводящий шар из сплавов ниобия при взаимодействии с внешним магнитным полем способен парить без опор в воздухе или в вакууме. Такой шар является идеальным ротором гироскопа – основного прибора для ориен-



тации космических кораблей.

Ток, проходящий через сверхпроводящие обмотки, порождает магнитное поле, бегущее от носа лодки к корме. В заполненном водой кольцевом канале, расположенном между внешним и внутренним корпусом лодки, индуцируются токи. Взаимодействие этих токов с магнитным полем сверхпроводника создает силу,двигающую лодку. Расчетная скорость хода реактивной подводной лодки может составить не менее 90 км/ч.

Сильные магнитные поля криогенных сверхпроводящих устройств позволяют защищать космические корабли от повышенной радиации.

Стали и сплавы с высоким омическим сопротивлением

Сплавы этой группы применяют для изготовления реостатов, нагревателей промышленных и лабораторных печей, бытовых приборов.

Высокое электрическое сопротивление сплавов может быть достигнуто в случае, когда их структура представляет собой твердый раствор. Согласно правилу Н.С. Курнакова при образовании твердых растворов электрическое сопротивление сплавов возрастает, достигая максимального значения при определенном для каждой системы содержании элемента.

В качестве реостатных сплавов применяют сплавы на основе меди с добавками Ni, Mn и Zn. Медноникелевые сплавы с 40 – 50 % Ni (константан МНМц40-1,5, копель МНМц45-0,5) имеют максимальное электрическое сопротивление, которое почти не меняется с температурой. Их максимальная рабочая температура во избежание окисления не должна быть выше 500°C.

Сплавы для нагревательных элементов должны иметь высокое удельное электрическое сопротивление, которое не должно существенно меняться при изменении температуры, высокую окислительную стойкость и достаточную жаропрочность, удовлетворительную пластичность в холодном состоянии.

ТЕМА 3

СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ ТЕПЛОВЫМИ И УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ

Для ряда отраслей машиностроения и приборостроения необходимо применение материалов со строго регламентированными значениями в определенных температурных интервалах



эксплуатации таких физических свойств, как температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) и модуля нормальной упругости (ТКМУ). Эти коэффициенты определяют характер изменения размеров детали и модуля упругости сплава при нагреве.

Согласно правилу Курнакова, в случае, когда компоненты образуют твердый раствор, ТКЛР сплава изменяется по криволинейной зависимости внутри пределов, ограниченных значениями ТКЛР чистых компонентов. Однако сплавы Fe – Ni не подчиняются общим закономерностям.

Самое низкое значение ТКЛР в диапазоне температур от – 100 до +100°C имеет сплав, содержащий 36 % Ni. Этот сплав был открыт в 1897 г. и назван инваром (лат. *invariabilis* – неизменный) из-за минимальных значений коэффициента теплового расширения.

Для металлов с кубической кристаллической решеткой ТКЛР изотропен. Его значения не зависят от направлений кристаллической решетки и преимущественной ориентации текстуры. Термический коэффициент объемного расширения втрое превышает ТКЛР.

Для сплавов Fe – Ni инварного состава, помимо низких значений ТКЛР, характерна еще одна аномалия – аномалия температурного коэффициента модуля упругости. В любых твердых телах, в том числе металлах, при нагреве наблюдается уменьшение модуля упругости, являющегося мерой сил межатомных связей. В сплавах с инварным эффектом модуль упругости растет или остается постоянным с повышением температуры. Характерно, что максимальной величиной ТКМУ обладает тот же Fe – Ni сплав с самым низким значением ТКЛР, содержащий 36 % Ni. Подбор определенного химического состава позволяет разработать сплавы, модуль упругости которых практически не зависит от температуры.

Сплавы, сохраняющие постоянство модуля упругости в широком интервале температур, называют элинварами. Природа аномального изменения ТКЛР инварных сплавов, так же как и модуля нормальной упругости, имеет ферромагнитное происхождение.

В ферромагнитных Fe – Ni сплавах инварного типа велик уровень объемной магнитоупругости – увеличения объема за счет внутреннего магнитного поля. При нагреве происходит уменьшение магнитоупругости составляющей объема. Выше температуры точки Кюри магнитоупругостные деформации полностью исчезают в связи с переходом металла в парамагнитное со-



стояние.

Нормальная составляющая ТКЛР при нагреве растет вследствие уменьшения энергии связи атомов. Этот рост компенсируется уменьшением магнитострикции в результате снижения намагниченности, как следствие усиления тепловых колебаний атомов.

В итоге при нагреве до температуры точки Кюри объем инварных сплавов мало меняется. ТКЛР для некоторых сплавов может даже приобретать отрицательные значения и их объем даже уменьшается.

Внешние растягивающие напряжения действуют на Fe – Ni ферромагнетики инварного состава подобно магнитному полю и также способствуют проявлению объемной магнитострикции, обычно называемой в этом случае механострикцией. Высокий уровень механострикции в элинварных сплавах способствует аномальному изменению модуля упругости при нагреве.

В элинварных сплавах коэффициент всегда имеет положительное значение. Снижение модуля упругости при нагреве обычных сплавов компенсируется составляющей за счет механострикции, что в итоге способствует стабилизации модуля упругости в широком температурном диапазоне.

Для обеспечения стабильности температурного коэффициента линейного расширения и модуля упругости для каждого конкретного случая необходимо применение сплавов строго определенного химического состава. Такие сплавы обычно называют прецизионными сплавами (франц. *precision* – точность), т. е. отличающимися высокой точностью химического состава.

Сплавы с регламентируемым температурным коэффициентом линейного расширения

Основным представителем сплавов с минимальным ТКЛР является сплав 36Н. Инвар имеет самые низкие значения в интервале температур от -100 до $+100^{\circ}\text{C}$. Благодаря высокому уровню механических свойств и технологичности инвар используется в качестве конструкционного материала для деталей, от которых требуется постоянство размеров при меняющихся температурных условиях эксплуатации. Из инвара изготавливают жесткозакрепленные трубопроводы сложной пространственной формы, перекачивающие сжиженные газы в криогенных установках. Малая величина ТКЛР позволяет уменьшить напряжения в трубопроводах и предотвратить возможность их разрушения. Отпадает необходимость установки сильфонных узлов для компенсации



Новые конструкционные материалы

деформации, что упрощает конструкцию и делает ее более надежной.

Для обеспечения минимально возможного ТКЛР и наибольшей стабильности размеров содержание углерода в сплавах инварного состава не должно превышать 0,05 %. Более высокое содержание углерода приводит к изменению параметров кристаллической решетки и магнитострикции парапроцесса. Для сплавов со стеклом повышенное содержание углерода приводит к выделению CO_2 в процессе впаивания и образованию газовых пузырей в стекле.

ТКЛР сплавов зависит от предварительной обработки. Минимальное значение коэффициента инвара достигается после закалки от 830°C , в результате которой примеси переходят в твердый раствор, и отпуска при 315°C . Холодная деформация также способствует снижению ТКЛР. В результате комбинации обеих обработок он становится почти равным нулю.

Замена части никеля равным количеством кобальта и легирование малыми добавками меди позволяет дополнительно снизить ТКЛР инвара. Такой сплав называют суперинваром.

В электровакуумных газоразрядных и полупроводниковых приборах широко используют сплавы металлов с такими диэлектриками, как стекло и керамика. Для обеспечения герметичности и вакуумной плотности спаев необходимо соответствие ТКЛР материалов соединяемой пары в эксплуатационном интервале температур. Во избежание напряжений и трещин значение ТКЛР сплава должно быть максимально приближено к ТКЛР диэлектрика и строго регламентировано. Для определения пригодности спаев металлов со стеклом используют чувствительный метод – измерение в поляризованном свете упругих напряжений, имеющих в спае.

Состав сплавов для пайки и сварки со стеклом подбирают таким образом, чтобы ТКЛР стекла и металла были близки во всем интервале температур вплоть до размягчения стекла. Ковар применяют для соединения с термостойкими стеклами, а платинит – с обычными легкоплавкими стеклами, применяемыми в электровакуумной промышленности. На рисунке 4.3 приведен характер линейного расширения двух разных сортов стекла и соответствующих им сплавов.

Стали с определенным тепловым расширением служат также для изготовления термобиметаллов, когда слой с низким тепловым расширением («пассивный слой») путем прокатки надежно соединяют с другим слоем, обладающим более вы-



соким тепловым расширением («активный слой»). Биметаллические пластины используют в качестве терморегулятора в приборостроении. Нагрев такой пластинки приводит к ее искривлению, позволяющему разомкнуть электрическую цепь.

Основным свойством термобиметаллов является термочувствительность, т. е. способность изгибаться при изменении температуры. В качестве пассивной составляющей обычно применяют инвар 36Н с ТКЛР равным $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, а в качестве активной – Fe-Ni сплавы с ТКЛР около $20 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, содержащие 8 – 27 % Ni, дополнительно легированные Cr, Mn, Mo.

Сплавы с постоянным модулем упругости

Сплавы с заданными свойствами упругости, помимо низких значений ТКМУ, должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям и релаксационной стойкостью в условиях статического и циклического нагружения.

Для чистого железоникелевого сплава даже при небольших колебаниях концентрации никеля, неизбежных в сталеплавильном производстве, уровень ТКМУ становится нестабильным и претерпевает значительные изменения.

Легирование хромом повышает стабильность сплава. Элинвар, содержащий 36 % Ni и 12 % Cr, характеризуется такими же значениями ТКМУ, как и чистый Fe – Ni сплав, но менее зависящими от возможных отклонений в концентрации никеля. Однако он имеет более низкие механические свойства, которые нельзя улучшить термической обработкой из-за стабильности аустенитной структуры. Кроме того, температура Кюри этого сплава составляет около 100°C , что ограничивает температурный интервал его применения.

Для повышения температуры Кюри в элинварах увеличивают концентрацию никеля, а для улучшения механических свойств элинвары дополнительно легируют титаном, алюминием или бериллием и подвергают двойной закалке от $900 - 950^\circ\text{C}$ в воду и старению при $600 - 700^\circ\text{C}$ в течение 4 ч.

После первой закалки элинварные сплавы высокопластичны. Относительное удлинение сплава 42НХТЮ составляет не менее 30 %, сплава 44НХТЮ – не менее 20 %. В этом состоянии они могут подвергаться штамповке и механической обработке. При повторной закалке избыточные фазы растворяются в аустените, а при старении из твердого раствора происходит выделение упрочняющих дисперсных фаз $(\text{FeNi})_3(\text{TiAl})$, Ni_3Ti . К наибольшему упрочнению приводит сочетание низкотемпературной термомеханической обработки с последующим старением.



Элинварные дисперсионно-твердеющие сплавы типа 42НХТЮ, 44НХТЮ применяют для изготовления упругих чувствительных элементов прецизионных приборов: расходомеров, регуляторов скорости и датчиков линейных ускорений, динамометров электронных весов, волосковых спиралей часовых механизмов. Сплав 30Н25КТЮ относится к элинварам с наиболее высокой точкой Кюри (470оС). Благодаря этому он сохраняет температурную стабильность упругих свойств и релаксационной стойкости вплоть до 400оС. Сплав рекомендуется применять после низкотемпературной термомеханической обработки с последующей закалкой и старением. Учитывая большое влияние предшествующей обработки на свойства стали, конкретный режим деформации и термической обработки подбирается для каждой партии сплава в зависимости от заданных механических свойств. Высокий запас пластичности в горячем и холодном состоянии позволяет изготавливать изделия сложной формы.

ТЕМА 4 ЖАРОСТОЙКИЕ И ЖАРОПРОЧНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Жаропрочные и жаростойкие материалы применяют для изготовления деталей установок, которые подвергаются механическим нагрузкам при высоких температурах. Например, тепловые электростанции, установки нефтехимических предприятий и нефтеперерабатывающей промышленности, промышленные нагревательные печи, газовые турбины и авиационные двигатели.

Современные ТЭЦ используют пар, нагретый до 500 – 560оС, а в некоторых случаях – до 650оС. Стационарные газовые турбины и воздухонагреватели работают при температуре более 700оС. Наиболее высокие рабочие температуры в авиационных двигателях и химических установках достигают 1100оС и более.

Жаростойкие стали

Жаростойкостью или окалиностойкостью называется способность металла сопротивляться химической коррозии в сухой газовой среде при высоких температурах.

Железо при взаимодействии с кислородом может образовывать оксиды трех видов: FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃. До 560 – 600оС окалина состоит преимущественно из плотного слоя оксидов Fe₂O₃ и Fe₃O₄, что затрудняет диффузию атомов кислорода и металла.



Новые конструкционные материалы

Выше 600оС происходит растрескивание этих оксидов и вместо них защита металла осуществляется лишь рыхлым оксидом FeO, что облегчает доступ кислорода к поверхности металла. Нагрев более 600оС приводит к интенсивному окислению сплавов на основе железа.

Основным фактором, влияющим на жаростойкость, является химический состав металла, определяющий защитные свойства оксидной пленки.

Рыхлый оксид магния практически не защищает металл при нагреве. Магний не только быстро окисляется, но и легко воспламеняется при нагреве, благодаря чему используется в пиротехнике.

Оксиды металлов второй группы при нагреве разрушаются как за счет сублимации в случае Mo и W, так и благодаря растворению в металле входящего в них кислорода (Ti, Zr).

При повышении температуры сверх определенного предела возрастает дефектность оксидов металлов третьей группы. Для технического железа предельная рабочая температура нагрева в воздушной среде составляет 560оС.

Металлы четвертой группы, благодаря плотной оксидной пленке с высокими защитными свойствами при нагреве, имеют хорошую жаростойкость. Поэтому хром и алюминий, наряду с кремнием, широко используют для повышения жаростойкости легированных сталей. Для достижения высокой жаростойкости стали оксид легирующего элемента должен быть плотным, не подверженным растрескиванию при нагреве, иметь высокие температуры сублимации и плавления.

Учитывая, что высокое содержание алюминия и кремния способствует охрупчиванию и ухудшает технологическую пластичность при обработке давлением, основным легирующим элементом в жаростойких сталях является хром. Жаростойкие свойства растут с увеличением его содержания в стали. Сталь, содержащая 5 % Cr, сохраняет окалиностойкость до 600оС (15X5), 9 % (40X9C2) – до 800оС, 17 % (08X17T) – до 900оС. Хромистые марки сталей относятся к сталям ферритного класса.

Для изготовления деталей печного оборудования применяют стали 20X23H18, 20X25H20C2, имеющие окалиностойкость до 1100оС. Эти марки относятся к аустенитному классу и характеризуются не только высокой жаростойкостью, но и высокой жаропрочностью. Хотя уровень жаростойкости стали и ее максимальная рабочая температура в основном определяются содержанием хрома, повышение температуры эксплуатации обуславливает



одновременный рост концентрации никеля, что связано с необходимостью стабилизации аустенитной структуры.

Критерии жаропрочности

При длительной работе под нагрузкой, не превышающей предела текучести, и нагреве до температур около $0,4 - 0,5$ или более от абсолютной температуры плавления $T_{пл}$ металл испытывает медленную пластическую деформацию. Такая деформация называется ползучестью или крипом.

В качестве температурного критерия удобно рассматривать не заданную абсолютную температуру T , а ее отношение к абсолютной температуре плавления $T/T_{пл}$. Эту безразмерную величину называют гомологической температурой.

При деформации нагретого металла в нем развиваются два противоположных процесса: упрочнение за счет наклепа при пластической деформации и разупрочнение в результате рекристаллизации. Если второй процесс преобладает, то в металле начинает развиваться диффузионное разупрочнение – отдых, коагуляция фаз, рекристаллизация, способствующие ползучести.

Жаропрочностью (hot strength) называется способность материала сопротивляться деформации и разрушению при высоких температурах. Основными критериями жаропрочности металлов является предел ползучести и предел длительной прочности.

Пределом длительной прочности называют напряжение, которое приводит к разрушению образца при заданной температуре за определенное время, соответствующее условиям эксплуатации изделий. Предел длительной прочности обозначают σ_{L} , где индексы t и τ указывают температуру (°C) и время испытаний (ч).

Пределом ползучести называют напряжение, вызывающее заданную суммарную деформацию за определенное время при заданной температуре. Предел ползучести обозначают σ_{cr} , где t – температура, °C; ϵ – суммарное удлинение, %; τ – время, ч. Для деталей, длительное время работающих при повышенных температурах, задается обычно скорость ползучести на установившейся стадии процесса, например $0,1\%$ за 104 ч или за 105 ч.

Срок службы, на который рассчитана машина или механизм, определяет выбор критерия жаропрочности и материала для их изготовления.

Если надежность работы конструкции зависит от ее деформации при ползучести, то характеристикой жаропрочности служит предел ползучести, определяющий скорость установившейся ползучести на участке ВС (рисунок 5.1, б) при заданных температуре и напряжении. Если лимитирующим фактором



Новые конструкционные материалы

надежности конструкции является опасность разрушения детали, то критерием жаропрочности служит предел длительной прочности, определяющий время до разрушения при заданном напряжении и температуре.

В предварительно нагруженных крепежных деталях (болты, гайки, шпильки) ползучесть при повышенных температурах способствует релаксации напряжений, что приводит к ослаблению натяжения и образованию зазора. Испытания на релаксацию проводят с целью определения скорости релаксации напряжений при определенной нагрузке и повышенной температуре. При испытаниях образец нагружают до заданного значения упругой деформации, а после выдержки в течение определенного времени при заданной температуре нагрузку снимают и производят замер остаточной части упругой деформации. По разности значений первоначальной и конечной упругой деформации определяют пластическую деформацию.

Релаксационную стойкость можно определять испытанием кольцевых образцов, в которых начальное напряжение создается клином, вставляемым в прорезь.

Влияние структуры на жаропрочность сплавов

До температур порядка 0,5Тпл деформация ползучести определяется стабильностью дислокационной структуры. При более высоких температурах активизируются диффузионные процессы, происходит растворение скоплений атомов легирующих элементов и примесей, что ослабляет степень закрепления дислокаций и облегчает их перемещение по кристаллу. В этих условиях сопротивление ползучести будет определяться силами межатомной связи.

Прочность межатомных связей большинства металлов недостаточна при высоких температурах. Для повышения жаропрочности необходимо снизить подвижность дислокаций и замедлить диффузию. ГЦК решетка твердого раствора аустенитной стали, в отличие от ферритной стали с ОЦК решеткой, характеризуется более плотной упаковкой атомов. Благодаря этому коэффициент диффузии для -железа с ГЦК решеткой примерно на два порядка меньше, чем для -железа с ОЦК решеткой. В частности, этим объясняется то, что скорость ползучести стали резко изменяется при температуре превращения ОЦК решетки в ГЦК. Аустенитные стали с ГЦК решеткой имеют значительно более высокую жаропрочность по сравнению со сталями с ОЦК решеткой.

Создание препятствий перемещению дислокаций достигается применением материалов, упрочненных дисперсными ча-



Новые конструкционные материалы

стицами. Упрочняющими фазами в жаропрочных сталях являются специальные карбиды, в никелевых сплавах — выделения γ' -фазы с регулярной решеткой типа $Ni_3(Ti, Al, Nb, Ta)$. В сплавах, упрочненных большим количеством γ' -фазы, деформация обусловлена сдвигом в частицах этой фазы, поэтому такие сплавы характеризуются высокой прочностью и вязкостью. Гетерогенная структура с дисперсными частицами в сталях достигается после закалки и отпуска, а в жаропрочных сплавах — после закалки и старения.

Прочность межатомных связей в кристаллической решетке возрастает при легировании элементами с высокой температурой плавления — Cr, Mo, W, Nb, Ta. Кроме того, эти же элементы снижают коэффициент самодиффузии и сдвигают температуру рекристаллизации в область более высоких температур, что также способствует росту жаропрочности.

На скорость ползучести оказывают влияние размеры зерен сплава. Из-вестно положительное влияние мелкозернистой структуры на прочность при низких температурах. При высоких температурах, когда механизм ползучести в основном обусловлен диффузией, наоборот, скорость ползучести снижается при увеличении размера зерна. Границы зерен уменьшают сопротивление ползучести. Это вызвано тем, что границы зерен являются источниками дислокаций. Они облегчают движение дислокаций, диффузию вакансий и зернограничное скольжение. Зерна перемещаются относительно друг друга вдоль общих границ в узкой пограничной области. Заметное смещение зерен при ползучести приводит к образованию и росту клиновидных трещин и пустот на границах. При увеличении длины трещины концентрация напряжений у ее вершины растет, что в свою очередь способствует интенсификации роста трещины, а в итоге — интеркристаллитному разрушению.

Крупнозернистость характерна для жаропрочных сплавов. В идеале их структура вообще не должна иметь границ зерен и должна состоять из одного монокристалла. Такая структура монокристалла получена для ряда турбинных лопаток ответственного назначения.

Жаропрочность сплавов цветных металлов и сталей

Эффективность использования самолетов и ракет предусматривает максимальное снижение их массы. Хотя легкие сплавы на основе алюминия, магния и титана имеют худшую жаропрочность по сравнению со сталями, их применяют в летательных аппаратах для работы в условиях средних температур

При рабочих температурах ниже 400 – 450°C нет



необходимости использовать жаропрочные материалы. В этих условиях могут успешно работать обычные конструкционные стали.

Различают следующие виды жаропрочных конструкционных сталей (high-temperature steel).

1. Перлитные стали. Стали перлитного класса используют для изготовления крепежа, труб, паропроводов, пароперегревателей и коллекторов энергетических установок, длительно работающих при температурах 500 – 550оС. Перлитные стали содержат относительно малые количества углерода и обычно легированы хромом, молибденом и ванадием (марки 12ХМ, 12Х1МФ). Стали этого класса используют в закаленном или нормализованном и высокоотпущенном состоянии.

2. Мартенситные стали. Стали мартенситного класса используют для изготовления деталей энергетического оборудования (лопатки, диафрагмы, турбинные диски, роторы), длительно работающих при температурах 600 – 620оС. Стали более значительно легированы хромом, а также вольфрамом, молибденом, ванадием (марки 15Х11МФ, 15Х12ВНМФ). Высокая жаропрочность этих сталей достигается при закалке от 1000 – 1050оС в масле на мартенсит с последующим отпуском на сорбит или троостит.

Клапаны выхлопа двигателей внутреннего сгорания небольшой и средней мощности изготавливают из силъхромов – хромокремнистых сталей мартенситного класса типа 40Х9С2, 40Х10С2М. Клапаны более мощных двигателей изготавливают из аустенитных сталей.

3. Аустенитные стали. Из этих сталей изготавливают роторы, диски, лопатки газовых турбин, клапаны дизельных двигателей, работающие при температурах 600 – 700°С. Хромоникелевые аустенитные стали для увеличения жаропрочности дополнительно легируют вольфрамом, молибденом, ванадием, ниобием, бором и другими элементами. К жаропрочным сталям аустенитного класса относятся стали 09Х14Н16Б, 09Х14Н19В2БР, 45Х14Н14В2М.

Термообработка этих сталей состоит из закалки и старения при температурах выше эксплуатационных. При старении происходит выделение из аустенита мелкодисперсных избыточных фаз, что дополнительно увеличивает сопротивление стали ползучести. В таблице 5.3 приведены основные свойства некоторых жаропрочных сталей.

Более высокие рабочие температуры (до 1000 – 1100оС и более) выдерживают так называемые суперсплавы, выплавленные на основе элементов VIII группы периодической системы



– никелевые, кобальтовые, железоникелевые сплавы. Их применяют при изготовлении газотурбинных двигателей для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Для работы при еще более высоких температурах применяют тугоплавкие металлы и керамические материалы.

ТЕМА 5 СУПЕРСПЛАВЫ

Началом истории суперсплавов можно считать 1929 г., когда Бедфорд и Пиллинг дополнительно легировали небольшими добавками Ti и Al разработанный ранее жаростойкий хромоникелевый сплав с ГЦК решеткой. Введение этих элементов обеспечило существенный прирост сопротивлению ползучести. Интересно, что появление суперсплавов случайно совпало по времени с началом разработки реактивного двигателя. В конце 1930-х годов в Германии и Англии были созданы первые образцы самолетов с турбинными двигателями. Появление новых конструкций обусловило необходимость разработки новых сплавов с высокой жаропрочностью.

Суперсплавы на никелевой основе в качестве особо жаропрочных материалов имеют наибольшее распространение. Гомологические рабочие температуры никелевых сплавов выше, чем у других систем легирования, и в двигателях с высокими техническими характеристиками их доля превышает 50 %. Суперсплавы имеют сложный химический состав, насчитывающий до 10 – 12 компонентов.

Железо в сплавах присутствует обычно в виде примесей, хотя имеется ряд марок, содержащих до 30 % и более железа. Легирование хромом (15 – 20 %) обеспечивает стойкость к высокотемпературной коррозии. Молибден и вольфрам, находящиеся либо в твердом растворе, либо в карбидах, повышают жаропрочность сплава. Алюминий и титан с никелем образуют γ -фазу Ni₃(Al, Ti), являющуюся основным упрочнителем. Кобальт вводится в никелевые сплавы для понижения энергии дефектов упаковки и интенсифицирует дисперсионное твердение, обусловленное выделением γ -фазы.

В никелевых сплавах после закалки или диффузионного отжига и последующего старения происходит дисперсионное твердение с образованием интерметаллида γ -фазы. Температура



нагрева под закалку и температура диффузионного отжига примерно равны и составляют обычно около 1100 – 1300оС. Выдержка при высоких температурах приводит к растворению интерметаллидных фаз с образованием однородного твердого раствора с низкой твердостью и получением необходимого размера зерна. Одно- или двухступенчатое старение проводят при температурах 700 – 950оС.

Выделяющаяся при старении из твердого раствора интерметаллидная ϵ -фаза обладает уникальными свойствами и вносит определяющий вклад в упрочнение. Как и твердый раствор, она имеет ГЦК структуру и выделяется когерентно. Прочность ϵ -фазы увеличивается с ростом температуры, а ее пластичность не дает ей стать источником разрушения. Сопротивление ползучести никелевых сплавов зависит от морфологии выделившихся интерметаллидов и их объемной доли. Чем мельче выделения и меньше расстояние между ними, тем выше сопротивление ползучести. Доля выделений больше, чем в жаропрочных аустенитных сталях.

Никелевые сплавы, объемная доля ϵ -фазы в которых превышает 50 %, уже нельзя подвергать горячей деформации обычными способами; изделия из них получают методом точного литья.

В кобальтовые сплавы для стабилизации ГЦК структуры вводится никель. Эти сплавы имеют более высокую концентрацию углерода, так как их основное упрочнение осуществляется за счет образования карбидов Me_23C_6 и MeC . После диффузионного отжига при температурах порядка 1200оС и последующей выдержке при 750 – 800оС формируется структура с мелкодисперсными вторичными карбидами.

Определяющей для длительной прочности никелевых и кобальтовых сплавов является стабильность структуры. Структурные изменения обусловлены процессами старения и сводятся к выделению карбидов, трансформации ϵ -фазы или образованию других интерметаллидных фаз, а также к образованию обогащенной хромом хрупкой σ -фазы. Вследствие повышенной диффузионной способности выделения фаз могут протекать относительно быстро при высоких рабочих температурах. Выделения формируются на границах зерен и покрывают границы подобно пленке, понижая сопротивление ползучести.

Аналогично аустенитным сталям добавки незначительного количества бора и частично циркония могут затормаживать диффузию на границах зерен и тем самым способствовать повышению стабильности границ.



Новые конструкционные материалы

Жаропрочные суперсплавы должны содержать минимальные концентрации таких вредных примесей, как S, P, Pb, Bi, Te.

Целью перспективных разработок суперсплавов является повышение надежности и экономичности за счет снижения содержания дорогостоящих легирующих элементов. До температуры 680^oC целесообразно использовать железоникелевые сплавы с высокими свойствами, хорошей обрабатываемостью и более низкой ценой, чем у сплавов на никелевой основе.

Направление дальнейших исследований должно пойти по пути разработки суперсплавов с еще большим сопротивлением ползучести, максимальной стойкостью к окислению, сопротивлением термомеханической усталости и повышенной структурной стабильностью. Сопоставление свойств и надежности изделий, изготовленных по разным технологическим схемам, показало технические и экономические преимущества монокристаллической литейной технологии. Для монокристаллических отливок разрабатываются специальные суперсплавы с низким содержанием элементов, упрочняющих границы зерен (C, B, Zr, Hf), и дополнительным легированием рением с небольшими добавками иттрия и редкоземельных элементов.

КОРРОЗИЯ И КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Коррозией (лат. *corrodere* – разъедать, разрушать) называют разрушение материалов под влиянием окружающей среды в результате ее химического или электрохимического воздействия.

Обычно рассматривают коррозию металлических материалов. Однако это явление характерно не только для металлов и сплавов, аналогичные процессы могут происходить и в неметаллических материалах – пластмассах, керамике. Примером такого коррозионного воздействия может служить износ футеровки плавильных печей под действием жидкого, химически активного шлака.

Ущерб, причиняемый коррозией, может быть прямым и косвенным. Прямой ущерб включает стоимость замены подвергшихся коррозии частей машин, трубопроводов, устройств. Для восстановления пораженных коррозией оборудования и конструкций ежегодно расходуется не менее 10 % продукции мирового металлургического производства.

Косвенный ущерб от коррозии связан с простым оборудованием в результате аварий, ухудшением качества продукции, например в результате ее за- грязнения, увеличением расхо-



Новые конструкционные материалы

да топлива, материалов, энергии. Так, при выходе из строя химической аппаратуры не выпускается продукция, отказ в работе двигателей приводит к простоему ценного оборудования, нарушение герметичности газо- и нефтепроводов делает возможной утечку ценного сырья. Если в результате коррозии водопроводной системы прекращается подача воды на металлургический завод, то ремонт водопровода будет стоить во много раз меньше, чем расходы, связанные с остановкой завода на несколько часов. В зависимости от страны и климатических условий суммарный ущерб, наносимый коррозией, достигает уровня 3 – 10% валового продукта.

Проникновение в результате коррозии газа, нефти и других продуктов в окружающую среду приводит не только к материальным потерям, но и к угрозе жизнеобеспечению человека и природы. Если ущерб от замены и ремонта оборудования можно хотя бы рассчитать, то ущерб окружающей среде не поддается расчету.

В зависимости от свойств окружающей среды и характера ее физико-химического воздействия на материал различают:

1) химическую коррозию, обусловленную воздействием сухих газов, а также жидкостей, не являющихся электролитами (нефть, бензин, фенол);

2) электрохимическую коррозию, обусловленную воздействием жидких электролитов: водных растворов солей, кислот, щелочей, влажного воздуха, грунтовых вод, т. е. растворов, содержащих ионы и являющихся проводниками электричества.

Наиболее распространенным видом химической коррозии является газовая коррозия при высоких температурах – процесс взаимодействия с кислородом или активными газовыми средами (галогены, диоксид серы, сероводород, пары серы, диоксид углерода и т. д.). При газовой коррозии разрушаются такие ответственные узлы и детали, как лопатки газовых турбин, сопла реактивных двигателей, арматура печей.

В производственных условиях чаще всего сталкиваются с окислением металлов, в случае сплавов на основе железа – с образованием окалины. Защитные свойства металлов от окисления обусловлены образованием сплошных оксидных пленок на их поверхности. Для обеспечения сплошности пленок необходимо, чтобы объем оксида $V_{ок}$ был больше объема металла $V_{мет}$, из которого он образовался: $V_{ок}/V_{мет} > 1$. В противном случае получается прерывистая пленка, не способная эффективно защитить металл от коррозии. Такая пленка характерна для магния



($V_{ок}/V_{мет} = 0,79$), что затрудняет защиту сплавов на его основе от коррозии.

Помимо сплошности оксидные пленки должны обладать высокими механическими свойствами, иметь хорошее сцепление с металлом и достаточную толщину, обеспечивающую высокие защитные характеристики. Этим требованиям удовлетворяет пленка оксида хрома Cr_2O_3 , что обуславливает высокую устойчивость против коррозии сталей и жаростойких сплавов с высоким содержанием хрома.

Электрохимическая коррозия – наиболее распространенный вид коррозии металлов. При электрическом контакте двух металлов или двух различающихся по свойствам фазовых составляющих одного металла, которые обладают разными электродными (электрохимическими) потенциалами, но находятся в одном электролите, образуется гальванический элемент. Поведение металлов или отдельных фаз зависит от значения их электродного потенциала. Металл или фаза, имеющие более отрицательный электродный потенциал (анод), отдают положительно заряженные ионы в раствор и растворяются. Избыточные электроны перетекают в металл или фазу, имеющие более высокий электродный потенциал (катод). Катод при этом не разрушается, а электроны из него удаляются во внешнюю среду. Чем ниже электродный потенциал металла или фазы по отношению к стандартному водородному потенциалу, принятому за нулевой уровень, тем легче металл или фаза отдают ионы в раствор, тем ниже их коррозионная стойкость. Ход электрохимического процесса определяется разностью потенциалов элементов, который, например, для пары $Cu - Zn$ разность потенциалов составляет 1,1В.

В случае замкнутой цепи медь является катодом, а цинк – анодом, что приводит к его растворению. Если приложить напряжение более 1,1 В, то анод и катод поменяются местами, что приведет к растворению меди и восстановлению металлического цинка.

В зависимости от коррозионной среды различают два вида электрохимической коррозии – с водородной и кислородной деполяризацией.

Коррозия с водородной деполяризацией характерна для разрушения металлов в кислотной среде. Примером может служить та же пара $Cu - Zn$, находящаяся в растворе H_2SO_4

Благодаря отрицательному потенциалу цинк разрушается и в раствор переходят положительные ионы цинка

Ионы водорода выступают в роли деполяризаторов.



Новые конструкционные материалы

Они отводят электроны с катода и способствуют восстановлению его потенциала.

При кислородной деполяризации электроны отводятся кислородом, растворенным в электролите и попадающим туда из воздуха. Примером может служить коррозия цинка в контакте с медью в водном растворе какой-либо соли, например NaCl, водимой для увеличения электропроводности среды.

Анализ работы гальванических элементов позволяет заключить, что при коррозии всегда разрушается анод из металла с меньшим электродным потенциалом. Катод не разрушается и является электродом, на котором осуществляются процессы деполяризации.

Виды электрохимической коррозии

Приведенная схема работы гальванической пары лежит в основе электрохимической коррозии металлов и сплавов. Разные фазовые составляющие, присутствующие в структуре сплава, находясь в электролите, приобретают разные по величине и знаку электродные потенциалы. Чем больше различие в электродных потенциалах отдельных фазовых составляющих, тем активнее будет протекать коррозионный процесс и коррозионное разрушение сплава. Электрохимическая гетерогенность поверхности металла является причиной коррозии. Более коррозионностойкими являются сплавы со структурой однородного твердого раствора.

Однако даже в случае однородной структуры коррозия может развиваться за счет образования анодных областей из-за наличия межкристаллитной пористости, различия остаточных напряжений в отдельных зернах и других факторов.

Особенно сильно электрохимическая коррозия развивается в случае контакта в конструкции разнородных материалов с разными потенциалами (например, коррозия стальных деталей в контакте с медными или магниевых сплавов в контакте со сталью).

Иллюстрацией могут служить две стальные пластинки, одна из которых покрыта оловом, а другая цинком. Нарушение этих пленок приводит к тому, что из-за разности электродных потенциалов железо в пластинке с оловом становится анодом, и подвергается коррозионному разрушению. В пластинке с цинком сталь становится катодом. Цинк, разрушаясь, защищает железо от коррозии. Этим объясняется долговечность строительной жести, домашних ведер, оцинкованных кузовных листов и др.

В случае однофазного материала, например чистого металла или однородного твердо-



страняется равномерно по всей поверхности детали – происходит так называемая общая или равномерная коррозия (рисунок 6.3, а). Обработка, ведущая к гомогенизации структуры, делает сплав более устойчивым против электрохимической коррозии. Примером такой обработки является закалка хромоникелевой коррозионностойкой стали или отжиг оловянистых бронз, имеющих после литья неоднородное строение вследствие ликвации. Наоборот, нагрев сплавов, приводящий к распаду пересыщенного твердого раствора и выделению частиц второй фазы, снижает коррозионную стойкость. Разность потенциалов отдельных составляющих микроструктуры способствует электрохимической коррозии.

В неоднородных металлах коррозия носит местный характер, охватывая отдельные анодные участки их поверхности с низким значением электродного потенциала. К местной коррозии относятся питтинг или точечная коррозия, а также пятнистая и язвенная ее разновидности. Очаги местной коррозии являются концентраторами напряжений.

Анодными участками могут быть границы зерен и фаз, в то время как зерна сами по себе являются катодами. В этом случае развивается наиболее опасный вид коррозии – межкристаллитная коррозия (МКК). Она почти незаметна с поверхности и распространяется в глубь металла по границам зерен (рисунок 6.3, в). В результате межкристаллитной коррозии нарушается связь между зернами, при постукивании по металлу пропадает характерный металлический звук, и после приложения нагрузки металл легко разрушается.

Межкристаллитная коррозия высокохромистой стали обусловлена выделением при повышенных температурах по границам зерен карбидов типа $Cr_{23}C_6$. Эти карбиды образуются в результате диффузии углерода из всего объема зерна, а хрома – только с приграничных областей. Углерод перемещается по межзельному механизму диффузии (по механизму внедрения), который по сравнению с перемещением атомов по механизму замещения характеризуется высокой подвижностью. Это приводит к снижению содержания хрома в приграничных областях ниже его критической концентрации 12 – 14 % и скачкообразному падению электродного потенциала с +0,2 до –0,6 В. Границы зерен становятся анодом по отношению к металлу внутри зерен.

Эффективным средством, подавляющим межкристаллитную коррозию, является максимальное снижение содержания углерода и введение в сталь таких сильных карбидообразующих элементов, как титан или ниобий, обладающих большим



сродством к углероду, чем хром.

При одновременном действии коррозионной среды и нагрузки или остаточных напряжений возникает коррозия под напряжением, проявляющаяся в виде коррозионного растрескивания или сетки трещин. Места концентрации напряжений имеют более низкий электродный потенциал и приобретают характер анодных участков.

Из повседневной жизни известно, что в поврежденных местах кузовов автомобилей, а также в местах деформаций листового металла продукты коррозии появляются чаще всего. Высокие остаточные напряжения являются причиной ускоренной коррозии сварных швов, околшовной зоны, болтовых, заклепочных и других соединений.

Большое влияние на процесс коррозии в водных средах оказывает растворенный в жидкости кислород. При достаточном содержании кислорода на поверхности образуется защитная оксидная пленка, повышающая электродный потенциал металла. Наиболее опасные анодные зоны создаются в местах плохой аэрации, где затруднен доступ кислорода из воздуха. Хорошо известно, что та часть стальной плиты, которая находилась под слоем песка, корродирует в большей степени по сравнению с той частью, которая оставалась под непосредственным влиянием атмосферы. Стальные гвозди в старых деревянных конструкциях разрушаются гораздо быстрее, чем их головки, расположенные снаружи. Аналогичное явление наблюдается в щелях замкнутых профилей (пример – пороги автомобилей), на стыке листов, на резьбовой поверхности в болтовых соединениях, на грязной поверхности и т. д. Внутренние напряжения сами по себе трудно обвинить в появлении коррозии. Интенсифицируя это явление, они становятся инициаторами анодного процесса. Неоднородность внутренней структуры материала способствует коррозии. Коррозионные явления усиливаются при наложении анодной напряженности на структурную.

Состав атмосферы также оказывает влияние на коррозию сплавов. В городах, где воздух загрязнен промышленными газами, коррозия проявляется значительно сильнее, чем в сельской местности. Для стальных деталей особенно вредными являются сернистый газ SO_2 , сероводород H_2S , хлор Cl_2 и хлористый водород HCl .

Хлористый водород также опасен для алюминиевых и магниевых сплавов. Для медных сплавов характерна повышенная коррозия в атмосфере аммиака NH_3 .



Новые конструкционные материалы

По повышению коррозионной агрессивности различные виды атмосфер могут быть расположены в следующий ряд: сухая континентальная, морская чистая, морская индустриальная, индустриальная, индустриальная сильно загрязненная.

Коррозионная усталость – это процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений и коррозионно-активных сред. Образование и развитие усталостных трещин сопровождается проникновением коррозионной среды в эти трещины и облегчает разрушение. Этому виду разрушения подвержены практически любые конструкционные материалы на основе железа, алюминия, титана, меди и других металлов. Особая опасность коррозионно-усталостного разрушения состоит в том, что оно может проходить практически в любых, в том числе таких слабых коррозионных средах, как влажный воздух, газы, влажные машинные масла и др. Поэтому коррозионная усталость металлов и сплавов наблюдается во всех отраслях техники, прежде всего в энергетической, нефтегазодобывающей, горнорудной промышленности, в морском, наземном и воздушном транспорте.

При коррозионно-усталостном нагружении разрушение может произойти при напряжениях, значительно меньших обычного предела усталости. При этом величина условного предела усталости приближается к нулевому значению. Объясняется это тем, что даже при минимальных напряжениях или их отсутствии недостаточно защищенный металл разрушится только от коррозии. Прогрессирующий рост трещин усталости обусловлен с одной стороны низким значением электродного потенциала в месте концентрации напряжений, а с другой – легким разрушением защитной оксидной пленки в устье трещины при переменном нагружении.

Методы защиты от коррозии

Методы защиты от коррозии можно объединить в следующие группы:

- 1) нанесение защитных покрытий и пленок;
- 2) изменение электрохимического потенциала защищаемого материала по отношению к среде на границе фаз;
- 3) модификация коррозионной среды.

Борьба с коррозией с применением защитных покрытий является наиболее распространенным способом. В качестве защитных применяют металлические и неметаллические покрытия.

Металлические покрытия могут быть выполнены из металла более или менее благородного, чем подложка. В связи



Новые конструкционные материалы

с этим они делятся на две группы: катодные и анодные покрытия.

К катодным покрытиям относятся те покрытия, электрохимический потенциал которых в данных условиях больший, чем у защищаемого металла. На алюминий почти всегда наносят катодные покрытия. Покрытия из благородных металлов на стали имеют такой же характер. Катодные покрытия защищают металл только благодаря его изоляции от атакующей среды. Поэтому свою роль они выполняют только при наличии полной сплошности. Если в катодном покрытии образуется щель, то в условиях коррозии она становится катодом, а открытая часть защищаемого металла – анодным элементом. Анодная поверхность при этом значительно меньше, чем катодная. Электрохимическое разрушение металла концентрируется на небольшой поверхности. Учитывая опасности, кроющиеся в возможных несплошностях катодных покрытий, их делают сравнительно большой толщины.

Анодные покрытия – это покрытия, выполненные из металла, у которого электродный потенциал меньше, чем у защищаемого металла. Для железа, работающего в малоокислых или нейтральных растворах, анодными покрытиями являются цинк, алюминий. Защитные свойства анодных покрытий состоят не только в механической изоляции металла от коррозионной среды. Они заключаются еще и в электрохимическом воздействии. В случае нарушения покрытия и образования коррозионного элемента, защищаемый металл, являющийся катодом, не разрушается. Небольшие несплошности в анодных покрытиях не опасны.

Металлические покрытия наносят электроосаждением, погружением в расплавленные металлы, металлизацией напылением, химическим осаждением солей, диффузией и т. д. В последнее время все большее распространение получает нанесение покрытий в вакууме.

Неметаллические покрытия применяются в случае возникновения химической реакции металла в соответствующих средах. К ним, в частности, относят оксидные алюминиевые покрытия, полученные в ходе специального электролитического процесса. Фосфатные покрытия применяются в большинстве случаев с дополнительными защитными средами, как, например, краски, лаки и т. п. Фосфатирование стали состоит в погружении изделия в разбавленный раствор фосфорной кислоты и кислых фосфатов цинка или магния. В результате реакции образуется нерастворимый фосфат железа, который в ходе процесса плотно покрывает поверхность металла. К этой же группе относят керамические покрытия и стекловидные эмали. Эти покрытия достаточно стой-



Новые конструкционные материалы

ки к воздействию минеральных и органических кислот. Их недостатком является повышенная хрупкость и низкая стойкость в условиях резких перепадов температуры.

К органическим покрытиям относятся разнообразные лакокрасочные материалы.

Знание механизма коррозии позволило создать методы коррозионной защиты путем наложения на металл такого потенциала, при котором он становится термодинамически устойчивым. К таким методам относятся катодная защита и уменьшение агрессивности среды, окружающей металлоконструкцию.

Катодная защита состоит в присоединении к защищаемой конструкции анода-протектора с более отрицательным электрохимическим потенциалом. Протектор (лат. protector – покровитель, защитник) и служит таким анодом, препятствующим разрушению защищаемого сплава; сам протектор при коррозии постепенно разрушается.

Протектором может являться любой металл, имеющий по отношению к данному сплаву более отрицательный потенциал. Однако разница в потенциалах не должна быть слишком большой, чтобы при электрохимическом процессе не происходило быстрого разрушения протектора.

Протекторы представляют собой обычно небольшие пластинки, присоединяемые к защищаемой детали заклепками или болтами. Катодную или протекторную защиту широко применяют при защите от морской и подземной коррозии металлоконструкций, коммуникаций, трубопроводов, сосудов и т. д. В качестве анодов-протекторов для защиты стальных изделий обычно применяют сплавы магния или цинка. Защита может также осуществляться присоединением защищаемого металла к отрицательному полюсу постоянного тока.

Для уменьшения агрессивности окружающей среды в нее вводят добавки, называемые ингибиторами коррозии, которые или способствуют пассивации металла, или значительно снижают скорость его коррозии. Условием использования ингибиторов является эксплуатация изделия в замкнутой среде постоянного состава.

Различают анодные и катодные ингибиторы. В качестве анодных ингибиторов коррозии используют различные вещества, образующие нерастворимые соединения на анодных участках. Одним из таких пассиваторов является хромпик $K_2Cr_2O_7$, вводимый в количестве 2 – 3 г/л в раствор охлаждающей жидкости.

Катодные ингибиторы тормозят катодный процесс. К



их числу относятся различные травильные присадки, добавляемые в количестве 1 – 2 % в кислоты для снятия окалины без разрушения основного металла.

Летучие ингибиторы, такие как нитрат натрия NaNO_2 , применяют для пропитки бумаги, в которую заворачивают детали, подлежащие хранению или транспортировке. Испаряясь, они насыщают окружающее детали пространство, создавая защитную газовую среду. Летучие ингибиторы отличаются высокой эффективностью. Стальные изделия, завернутые в бумагу, обработанную NaNO_2 , в условиях относительной влажности 85 % не ржавеют в течение 5 лет. Преимуществом летучих ингибиторов является отказ от применения защитных покрытий, удобство расконсервации и постоянная готовность деталей к немедленному использованию без дополнительной обработки.

ТЕМА 6 КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ СТАЛИ

Устойчивость против коррозии повышается при введении в состав стали хрома, алюминия, кремния. Эти элементы образуют непрерывную прочную оксидную пленку и повышают электродный потенциал, т. е. увеличивают электроположительность стали. Алюминий и кремний повышают хрупкость стали и применяются реже хрома. При содержании хрома более 12 % сталь резко изменяет электродный потенциал с электроотрицательного ($-0,6$ В) на электроположительный ($+0,2$ В). На поверхности образуется плотная защитная пленка оксида Cr_2O_3 .

Сталь, содержащая 12 – 14 % Cr, устойчива против коррозии в атмосфере, морской воде, ряде кислот, щелочей и солей. Кроме хрома, в состав коррозионностойких сталей вводят также другие элементы – чаще никель. С ростом содержания хрома коррозионная стойкость стали растёт.

Коррозионностойкие стали (corrosion-resistant steel) обычно делят на хромистые ферритные, содержащие 12 – 25 % Cr и 0,07 – 0,2 % C и хромистые мартенситные, содержащие 12 – 18 % Cr и 0,15 – 1,2 % C, а также аустенитные стали, содержащие 12 – 18 % Cr, 8 – 30 % Ni и 0,02 – 0,25 % C.

Хромистые стали коррозионностойки при температуре до 300°C в водопроводной воде, влажной атмосфере, растворах азотной кислоты и многих органических кислот. В морской воде



хромистые стали подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением.

Содержание углерода в коррозионнстойких аустенитных сталях ограничено, и желательно, чтобы оно было ниже предела растворимости углерода в легированном никелем аустените при 20°C, составляющего 0,04 %. Присутствие в стали более высоких концентраций углерода может приводить к образованию карбидов хрома типа Cr₂₃C₆, вследствие чего твердый раствор обедняется хромом и создается двухфазная структура. При этом снижается коррозионная стойкость стали. Для предотвращения образования карбидов хрома, особенно при технологических нагревах, связанных с проведением операций сварки или пайки и опасностью возникновения межкристаллитной коррозии, в сталь вводят дополнительно титан, ниобий или тантал. Эти элементы связывают углерод в карбиды типа TiC, NbC, TaC, оставляя хром в твердом растворе. Необходимое количество титана для введения в сталь определяют по формуле

$$Ti = (C - 0,02) * 5 - (6.9)$$

где C – содержание углерода в стали.

Стали, не склонные к межкристаллитной коррозии, называют стабилизированными. Эффект стабилизации может быть достигнут, помимо введения сильных карбидообразующих элементов, снижением содержания углерода ниже 0,04 %.

Хромоникелевые коррозионнстойкие стали содержат дефицитный и дорогостоящий никель и поэтому имеют высокую стоимость. В ряде случаев применяют более дешевые стали, в которых весь никель или часть его заменены марганцем. Например, до температур –196°C и в слабоагрессивных средах вместо стали 12X18H10T может быть использована сталь 10X14Г14Н4Т.

Азот повышает стабильность аустенита, поэтому для повышения коррозионной стойкости можно использовать более высокие концентрации хрома и молибдена, не увеличивая склонность стали к выделению интерметаллидных фаз. Примером может служить сталь 03X20H16AG6, используемая в криогенной технике.

Коррозионнстойкие сплавы цветных металлов

Различают две группы коррозионнстойких цветных металлов:

- неpassивирующиеся металлы с высоким электродным потенциалом (Au, Pt, Ag, Cu и сплавы на их основе);
- passивирующиеся металлы, образующие на поверхности плотные защитные пленки оксидов (Ti, Al, Cr).



Золото, платина, серебро коррозионностойки практически в любых средах, кроме некоторых концентрированных кислот. Медь сохраняет коррозионную стойкость во влажной атмосфере, морской воде и многих органических кислотах. Для подавления склонности латуней к коррозионному растрескиванию во влажной атмосфере проводят отжиг для снятия внутренних напряжений.

Пассивирующиеся металлы характеризуются высокой коррозионной стойкостью в сухой и влажной воздушной среде, в органических и неорганических кислотах. Титан по сопротивлению коррозии уступает только золоту и платине. Высокая коррозионная стойкость титана объясняется образованием на поверхности стойкой пассивирующей пленки оксида TiO_2 . Он сохраняет коррозионную стойкость даже при нагреве во влажной атмосфере. Титановые сплавы обладают высокой стойкостью против кавитационной коррозии в морской воде.

Алюминий и алюминиевые сплавы образуют на поверхности защитную оксидную пленку Al_2O_3 , что обеспечивает их коррозионную стойкость во влажной атмосфере и в кислотной среде. Пленка устойчива в нейтральных средах, но легко растворяется в щелочах. Поэтому в щелочных средах алюминий и его сплавы легко разрушаются. В морской воде алюминиевые сплавы подвержены коррозионному растрескиванию.

Такие легирующие элементы, как медь и железо, имеющие более высокий электродный потенциал, ухудшают коррозионную стойкость алюминиевых сплавов. Дуралюмины, легированные медью, по коррозионной стойкости существенно уступают чистому алюминию. Легирование электроотрицательными элементами кремнием и магнием не ухудшает пассивность, а марганец оказывает даже положительное влияние благодаря образованию соединения $(MnFe)Al_6$, что позволяет удалить железо из твердого раствора и устранить его отрицательное действие на коррозионную стойкость. Поэтому сплавы типа АМц сопротивляются коррозии даже лучше, чем технический алюминий.

ХЛАДОСТОЙКИЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При эксплуатации материалов в условиях низких температур ужесточаются требования к их пластичности и вязкости. Обычно минимальная рабочая температура определяется температурой вязко-хрупкого перехода, при которой вязкость падает до неприемлемо малых значений.

По хладостойкости металлические материалы, используемые при низких температурах, условно могут быть разбиты на четыре основные группы.



Новые конструкционные материалы

1. Металлы и сплавы, характеристики механических свойств которых позволяют использовать их при температурах до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. до низких климатических температур, для изготовления изделий так называемого северного исполнения. К этой группе относятся качественные углеродистые и низколегированные стали ферритного и перлитного классов с ОЦК решеткой.

2. Ко второй группе относятся сплавы, сохраняющие вязкость и пластичность при охлаждении до 170 К. Это стали с 0,2 – 0,3 % С, дополнительно легированные Ni, Cr, Ti, Mo. К этой группе относятся, например, низкоуглеродистые ферритные стали с 2 – 5 % Ni, используемые при температурах 210 – 150 К.

3. К третьей группе относятся сплавы, способные без ухудшения свойств выдерживать температуры до 77 К (температура кипения жидкого азота). Сюда относятся стали типа 12X18H10T, 0H9A, большинство сплавов на основе Al, Ti, Cu, не обнаруживающих склонности к хрупкому разрушению. Для ненагруженных конструкций с целью экономии Ni применяют Cr – Mn и Cr – N – Mn стали типа 10X14Г14Н4Т (ЭИ711), 03X13АГ19 (ЧС36), 07X21Г7АН5(ЭП222).

4. К четвертой группе относятся сплавы, работающие при температуре ниже 77 К. К этой группе принадлежат материалы, используемые в космической технике, производстве и потреблении водорода, экспериментальной физике. Для работы при таких температурах пригодны лишь высоколегированные коррозионно-стойкие стали типа 03X20H16АГ6, 10X11H23ТЗМР (ЭП33), некоторые бронзы, никелевые, алюминиевые сплавы, легированные магнием, и сплавы титана.

Хладостойкие стали. Хладостойкость сталей климатического холода

Механические свойства и хладноломкость стали определяются прежде всего тремя механизмами упрочнения:

- 1) измельчением зерна;
- 2) упрочнением феррита атомами легирующих элементов и примесей, образующими твердые растворы внедрения и замещения;
- 3) упрочнением выделениями частиц второй фазы различной степени дисперсности.

Углерод, хотя и способствует эффективному упрочнению, резко снижает вязкость и пластичность стали, способствуя повышению хладноломкости. Принято считать, что увеличение содержания углерода в стали на каждые 0,1 % повышает порог хладноломкости на 20 К



Новые конструкционные материалы

Снижение содержания углерода предотвращает образование при сварке в зоне термического влияния хрупких закалочных мартенситных структур. В свариваемых хладостойких сталях содержание углерода должно быть ниже 0,2 %, и в структуре должно быть мало перлита (малоперлитные стали).

Введение в углеродистую сталь до 2 % марганца и до 0,8 % кремния упрочняет ферритную матрицу благодаря образованию твердого раствора замещения. Легирование марганцем измельчает зерно и увеличивает вязкость феррита, что повышает величину работы распространения трещины при низких температурах. Легирование стали малыми добавками титана, ниобия и ванадия позволяет получать мелкодисперсные выделения второй фазы типа VC, TiC, Nb(C,N), V(C,N), эффективно упрочняющие матрицу. Эти же элементы способствуют измельчению зерна и снижают склонность стали к его росту. На границах зерен образуются дисперсные частицы карбидов и карбонитридов ниобия, титана и ванадия, тормозящие рост зерен при нагревании. Увеличение содержания этих элементов более 0,15 %, хотя и увеличивает прочность, но одновременно повышает склонность стали к хрупкому разрушению.

Для повышения хладостойкости и свариваемости строительных сталей применяют малоперлитные стали с низким содержанием углерода, микролегированные сильными карбидообразующими элементами. Кроме того, используют стали, легированные азотом в сочетании с различными сильными нитридообразующими элементами, в качестве которых чаще всего применяют ванадий, алюминий, ниобий и титан. Выделение азота из твердого раствора в виде нитридов уменьшает его охрупчивающее действие. Это увеличивает прочность стали и, способствуя измельчению зерна, не ухудшает ее хладостойкости.

К сталям этой группы относятся стали марок 09Г2, 09Г2С, 09Г2СД, 16Г2АФ, 14Г2АФ, 14Г2САФ и др. Из-за дефицитности никеля его применение в сталях этого типа ограничено. Стали типа 14Г2АФ, 16Г2АФ и их варианты 14Г2САФ, 16Г2САФ широко используются в нормализованном состоянии для изготовления газопроводных труб диаметром 1020 – 1420 мм. Их прочность $\sigma_{\text{в}}$ = 560 – 600 МПа, а ударная вязкость КСЧ при -60°C (213 К) в случае снижения содержания серы и фосфора до 0,01 % составляет 60 Дж/см².

Из всех легирующих элементов никель в наибольшей степени понижает хладноломкость стали. Никель и железо полностью растворимы друг в друге, имеют близкое строение кри-



сталлических решеток. Никель не является карбидообразующим элементом, он находится в твердом растворе в феррите или аустените. Никель упрочняет феррит и одновременно увеличивает его вязкость. Никель увеличивает прокаливаемость стали, измельчает зерно, а также снижает концентрацию примесей на дислокациях и уменьшает блокирование дислокаций примесными атомами внедрения. Введение 1 % Ni снижает порог хладноломкости примерно на 20 К.

Хром несколько повышает прочность стали и при содержании до 1 % увеличивает ее вязкость. Увеличение концентрации хрома более 1,5 % приводит к повышению порога хладноломкости.

Сталь 09ХГ2НФБ в результате контролируемой прокатки с последующим регулируемым охлаждением в процессе прокатки на стане имеет преимущественно бейнитную структуру с небольшим количеством мелкозернистого феррита, упрочненного дисперсными частицами карбонитридных фаз V и Nb. При $\sigma_{0,2} > 700$ МПа и $\sigma_{0,2} > 900$ МПа ее $b_5 = 20,5$ %. При -60°C ударная вязкость $KCU = 104$ Дж/см², а критическая температура хрупкости $T_{50} = -100^\circ\text{C}$. Сталь хорошо сваривается и может быть использована в сварных конструкциях ответственного назначения в строительстве и машиностроении.

Введение молибдена в количествах до 0,5 % существенно снижает порог хладноломкости. Молибден оказывает сдерживающее влияние на диффузионную подвижность фосфора и уменьшает отпускную хрупкость.

Для магистральных трубопроводов северного исполнения в США и Канаде применяют высокопрочные свариваемые Mn – Mo – Nb стали с микроструктурой игольчатого феррита, содержащие 1,6 – 2,2 % Mn, 0,25 – 0,4 % Mo, 0,04 – 0,10 % Nb. Упрочнение выделениями Nb(C,N) происходит при ее охлаждении после прокатки и в процессе старения горячекатаной стали при температуре 575 – 650°C.

Трубы фирмы «Италсидер» такого состава со структурой игольчатого феррита при толщине стенки 20 мм имеют порог хладноломкости $T_{50} = -50^\circ\text{C}$ при $\sigma_{0,2} = 650$ МПа и $\sigma_{0,2} = 540$ МПа.

Для железнодорожных мостов северного исполнения применяют сталь 12Г2МФТ. Прокат из стали 12Г2МФТ толщиной до 40 мм характеризуется не только более высокой прочностью, но и более высокими характеристиками вязкости разрушения в широком температурном диапазоне.

Особую сложность представляет повышение хла-



достоинства литых сталей. Литая сталь отличается от деформированной наличием дефектов в виде раковин и трещин. Литые стали имеют крупное первичное зерно, и его измельчение представляет сложную задачу. Термическая обработка по обычным режимам полностью не устраняет структурные особенности литого металла.

Наиболее перспективным способом измельчения зерна в литых сталях, как и в деформированных, является микролегирование такими карбидообразующими элементами, как V, Ti, Nb, Zr.

Несмотря на существенные структурные различия литых сталей, наблюдается единая зависимость их параметра трещиностойкости K_{IC} от $\sigma_{0,2}$ при различных видах разрушения: хрупком, квазихрупком и вязком

Оптимальными для получения максимальной трещиностойкости и хладостойкости являются литые стали, имеющие предел текучести от 300 – 400 МПа, так как они обладают рациональным сечением характеристик прочности и пластичности. Стали с пределом текучести меньше 300 МПа не могут быть использованы в качестве хладостойких в связи с низкими характеристиками прочности. Стали с пределом текучести более 800 МПа обладают низкой хладостойкостью вследствие пониженной пластичности. Эти стали в условиях низких климатических температур могут быть использованы лишь в качестве износостойких.

Хладостойкие стали. Стали криогенной техники

Стали для криогенной техники должны обеспечивать необходимую прочность в сочетании с высокой вязкостью и пластичностью, обладать малой чувствительностью к концентрации напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению. Учитывая технологию изготовления изделий, работающих при низких температурах, такие стали должны обладать хорошей свариваемостью. Важной характеристикой сталей является их высокая коррозионная стойкость.

Стабильные аустенитные стали. Широкое распространение в технике низких температур получили хромоникелевые аустенитные стали, содержащие 17 – 25 % хрома и 8 – 25 % никеля. Благодаря сохранению высокой пластичности и вязкости в широком температурном диапазоне, коррозионной стойкости в сочетании с хорошими технологическими свойствами они в настоящее время являются наиболее распространенными конструкционными материалами криогенной техники.

Хромоникелевые аустенитные стали применяются для изготовления сварных элементов аппаратов, емкостей, трубопро-



Новые конструкционные материалы

водов (обечаек, днищ, пат-рубков, фланцев), деталей арматуры (штоков, клапанов, седел) и т. д. Рекомендуемая температура эксплуатации сварных соединений 4 – 870 К без ограничения давления.

В зависимости от содержания основных легирующих элементов различают два типа хромоникелевых аустенитных сталей. Это метастабильные стали, претерпевающие заметное мартенситное превращение при охлаждении и деформации, содержащие 17 – 20 % Cr и 8 – 12 % Ni. Вторую группу образуют стабильные стали, содержащие 17 – 25 % Cr и 14 – 25 % Ni. В них мартенситное превращение подавлено и аустенитная структура сохраняется вплоть до самых низких температур.

К недостаткам этой группы сталей относятся низкая прочность при комнатной температуре, особенно по пределу текучести (около 250 МПа), а также сравнительно высокая стоимость, обусловленная высоким содержанием дорогого никеля.

Высокая стоимость никеля привела к созданию сталей, в которых никель полностью или частично заменен марганцем, также являющимся стабилизатором аустенита (марки 03X13AG19, 10X14Г14Н4Т). В их состав дополнительно вводят азот, способствующий получению аустенитной структуры и дополнительному упрочнению (03X20Н16AG6, 07X13Н4AG20).

Введение азота в хромоникельмарганцевые стали позволяет более чем в полтора раза поднять уровень предела текучести при комнатной температуре. С понижением температуры эффективность влияния азота как элемента внедрения, блокирующего движение дислокаций, на величину предела текучести еще более возрастает. Хром, никель и марганец как элементы замещения оказывают меньшее влияние на прочностные свойства, их роль определяется необходимостью обеспечения заданной аустенитной структуры.

К недостаткам азота как легирующего элемента относятся его склонность к ликвации при кристаллизации стального слитка и некоторое осложнение процессов сварки. В свариваемых сталях с азотом необходимо более строго ограничивать концентрацию углерода, которое должно приближаться к пределу его растворимости в аустените, составляя не более 0,03 – 0,04 %.

Для работы при температурах до 4 К аустенитная сталь должна отвечать следующим требованиям:

немагнитная аустенитная структура должна быть устойчивой в диапазоне температур до 4 К;

прочностные характеристики при комнатной темпера-



Новые конструкционные материалы

туре должны быть не ниже 500 МПа для предела текучести и 850 МПа для временного сопротивления;

прочность при температурах 20 и 4 К должна быть выше 1200 и 1800 МПа для предела текучести и временного сопротивления соответственно;

относительное удлинение при температуре 4 К должно составлять не менее 20 % , а ударная вязкость на образцах Шарпи – 80 Дж/см²;

материал должен обладать высокой коррозионной стойкостью в воздушной среде при изменяющихся температурных условиях работы, быть технологичным и хорошо свариваться.

Этим требованиям полнее других отвечает сталь 04Х21Н16АГ8М2ФД.

Аустенитные хромоникелевые стали такого типа с азотом, обладая почти вдвое более высокой прочностью по сравнению с обычными хромоникелевыми сталями, перспективны для изготовления высоконагруженных деталей машин и конструкций криогенной техники. Они технологичны, хорошо свариваются, коррозионностойки, характеризуются высоким показателем вязкости и пластичности вплоть до температур жидкого гелия. Стали этой системы легирования сохраняют высокую стабильность аустенитной структуры в криогенных условиях.

Стабильные аустенитные стали высокой прочности находят применение при изготовлении сверхпроводящих магнитов, установок термоядерного синтеза, криогенных оболочек сверхпроводящих устройств, установок для специальных физических экспериментов и т. д.

В криогенном энергомашиностроении и прецизионной технике требуются материалы, обладающие стабильной маломангнитной структурой, магнитная проницаемость которых не должна превышать порог маломангнитности ($M < 1,01$) в ходе длительной эксплуатации в магнитных полях различной напряженности. Этим требованиям отвечают стабильные высокоуглеродистые стали системы Mn – Cr – Al типа 120Г25Х5Ю7 и 105Г25Х5Ю5.

Метастабильные аустенитные стали. Существует целый ряд деталей и узлов криогенной техники, к металлу которых не предъявляются требования по стабильности аустенитной структуры и магнитной проницаемости в процессе эксплуатации. К ним относятся емкости для хранения и транспортировки сжиженных газов, перспективные проекты топливных баков автомобилей, работающих на сжиженном природном газе, а также топливных баков авиакосмической техники. Основными характеристиками



Новые конструкционные материалы

металла для их изготовления являются высокая удельная прочность и технологичность. Традиционно такие сосуды изготавливаются из аустенитной стали 12X18H10T, однако удельная прочность стали невысока, что долгое время сдерживало широкое распространение сжиженного природного газа в качестве топлива.

Необходимой прочностью в сочетании с высоким комплексом пластических и вязких свойств при низких температурах могут обладать Cr – Ni – Mn метастабильные аустенитные стали, дополнительно легированные ванадием и азотом. Старение такого металла сопровождается упрочнением за счет выделения карбонитридных фаз V(C,N). В результате этого временное сопротивление и особенно предел текучести стали после старения возрастают.

Высокопрочные мартенситно-стареющие стали. Отличительной особенностью этой группы сталей является получение при закалке практически безуглеродистого легированного мартенсита и его последующее старение при температуре около 500°C, сопровождающееся выделением интерметаллидных фаз. Это обеспечивает сочетание высоких прочностных свойств с достаточной пластичностью и вязкостью. Опасность хрупких разрушений при низких температурах в отличие от других высокопрочных сталей уменьшается благодаря присутствию никеля и низкому содержанию углерода (не более 0,03%). Высокая концентрация легирующих элементов предотвращает образование немартенситных продуктов превращения аустенита независимо от скорости охлаждения при закалке.

Сталь ЭП 921 имеет более однородную мартенситную структуру. Ее применяют для изготовления высоконагруженных деталей, в том числе таких деталей уплотнительных узлов арматуры, как седла клапанов, а также элементов турбодетандеров (валиков, подпятников, лопаток), где требуется сочетание, высокой твердости и эрозионной стойкости.

Сталь ЭП 767 является сталью переходного класса и содержит до 20 – 30 % остаточного аустенита, благодаря чему высокий уровень вязкости $KCV > 50$ Дж/см² сохраняется до температуры 77 К. Эта сталь широко используется в ракетно-космической технике для изготовления тонколистовых конструкций сложной конфигурации и деталей арматуры, работающих при температуре до 77 К (золотники, втулки, штоки, опоры, стаканы, клапаны, тарелки и др.).

Недостатками сталей ЭП 921 и ЭП 767 являются повы-



шенное содержание дорогого и дефицитного кобальта, а также ограничение нижнего предела применения температурой 77 К.

Современная авиакосмическая техника требует расширения диапазона применения высокопрочных сталей до температуры кипения жидкого водорода 20 К.

С этой целью разработана новая высокопрочная мартенситно-старееющая коррозионностойкая экономнолегированная кобальтом сталь 03X12H7K6M4Б.

Литейные стали. Стальные отливки сравнительно редко применяют в криогенной технике. Однако существует ряд изделий, для которых их применение целесообразно. К ним относится запорно-регулирующая арматура для перекачки криогенных жидкостей. Изготовление корпусов вентилей из кованных, штампованных заготовок или проката путем механической обработки и сварки связано с большими трудозатратами.

Оптимальное сочетание прочностных, пластических и вязких свойств, высоких литейных свойств и коррозионной стойкости обеспечивает сталь типа 07X13Г28АНФЛ, содержащая, %: не более 0,07 С, 27 – 29 Мn, 12 – 14 Cr, 0,5 – 1,5 Ni, 0,1 – 0,2 V, 0,2 – 0,3 N.

Железоникелевые сплавы

Для изготовления некоторых узлов криогенных установок, размеры которых не должны меняться с изменением температуры, используют высоколегированные инвары – сплавы с никелем. Сплав с 36 % Ni имеет коэффициент линейного расширения при температурах 50 – 100 К в 10 – 20 раз меньше, чем для никелевых и хромоникелевых сталей, а также алюминиевых сплавов.

Из инваров изготавливают жесткозакрепленные трубопроводы сложной пространственной формы, работающие при температурах до 20 К (например, трубопроводы жидкостных ракетных двигателей), некоторые элементы арматуры, которые по условиям работы должны иметь минимальные изменения размеров при изменении температуры. Малое значение коэффициента линейного расширения материала позволяет уменьшить напряжения в трубопроводах и предотвратить возможность их разрушения. Отпадает необходимость установки сильфонных узлов для компенсации деформаций, что упрощает конструкцию и делает ее более надежной. Инвар имеет низкую теплопроводность, почти вдвое меньшую, чем у аустенитных сталей, что особенно важно при использовании его в узлах, где необходимо уменьшить притоки теплоты.

Недостатком железоникелевых сплавов является их



Новые конструкционные материалы

высокая стоимость, превышающая стоимость сталей типа 12Х18Н10Т в 5 – 10 раз.



ТЕМА 7

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Алюминий и его сплавы. Способность алюминия и его сплавов сохранять пластичность вплоть до криогенных температур послужила основой для их широкого использования при изготовлении низкотемпературного оборудования.

Технический алюминий широко используют для изготовления малонагруженных элементов конструкций. Из алюминия изготавливают такие детали, как насадки регенераторов, паяные теплообменники аппаратов воздухоразделительных установок и др.

Алюминиевые сплавы применяют для изготовления емкостей и трубопроводов для хранения и транспортировки жидких газов: природного газа, кислорода, азота, водорода и гелия, а также в качестве материала для ректификационных колонн и трубных систем. При температурах ниже 120 К объем потребления алюминиевых сплавов, главным образом в виде горячекатаного листа, составляет около 30 % от объема всего используемого металла.

Высокий коэффициент теплопроводности алюминиевых сплавов часто заставляет отказываться от применения их в деталях, которые определяют притоки теплоты к охлаждаемым элементам. Например, горловины криостатов выполняют из аустенитных сталей или полимерных материалов, хотя сам внутренний сосуд изготавливается из алюминиевого сплава.

Алюминиевые сплавы имеют более высокий температурный коэффициент линейного расширения, чем аустенитные стали. Это определяет более высокий уровень термических напряжений, особенно в жесткозакрепленных элементах конструкций при их охлаждении. Поэтому в трубопроводах для перекачки сжиженных газов в случае отсутствия возможности применения компенсаторов деформации предпочтительно использовать сплавы на основе железа.

В технике низких температур применяют деформируемые и литейные алюминиевые сплавы.

Временное сопротивление деформируемых термообработанных алюминиевых сплавов может достигать 500 МПа и более при плотности менее 2,85 г/см³. Удельная прочность σ_u у алюминиевых сплавов имеет высокие значения и приближается к удельной прочности высокопрочных сталей.



Новые конструкционные материалы

Прочность при растяжении деформируемых алюминиевых сплавов с понижением температуры от 293 до 77 К увеличивается на 35 – 60 %, а предел текучести – на 15 – 25 %. Пластичность при снижении температуры обычно даже несколько возрастает или остается на уровне пластичности при комнатной температуре. Алюминиевые сплавы не имеют порога хладноломкости. Вязкость при ударном изгибе у них равномерно понижается с падением температуры, но по сравнению с аустенитными сталями значения ее существенно ниже. При низких температурах алюминиевые сплавы имеют вязкий излом при относительно малой ударной вязкости.

Усталостная прочность, определенная как на гладких, так и на надрезанных образцах, с понижением температуры также увеличивается. Вязкость разрушения алюминиевых сплавов в условиях плоской деформации почти не уменьшается, а иногда даже увеличивается при криогенных температурах по сравнению с вязкостью разрушения при комнатной температуре.

Наибольшее применение в технике низких температур нашли сплавы алюминия с магнием – магналии – благодаря удачному сочетанию в них прочности, пластичности, свариваемости, коррозионной стойкости.

Применяемые термически неупрочняемые сплавы содержат не более 7 % Mg. Из магналиев как за рубежом, так и в СНГ предпочтение в машиностроении отдается сплаву АМг5.

В холодильной и криогенной технике также используют термоупрочняемые алюминиевые сплавы, легированные медью, магнием, марганцем и другими элементами. Оптимальные механические свойства эти сплавы приобретают после термической обработки, состоящей из закалки в воде от температуры около 500°С и последующего естественного или искусственного старения за счет дисперсионного выделения при старении интерметаллидных фаз.

Прочность термоупрочняемых алюминиевых сплавов приближается к прочности аустенитных сталей, и поэтому во многих случаях они могли бы их заменить. Их недостатком является склонность к коррозии под напряжением. Кроме того, эти сплавы разупрочняются в зоне сварного шва.

Наряду с деформируемыми в технике низких температур применяют литейные алюминиевые сплавы. Их используют главным образом для изготовления деталей сложной конфигурации типа корпусов арматуры. Наибольшее распространение получили сплавы, легированные 8 – 13 % Si, – силумины, обладающие



высокими литейными свойствами.

Титан и его сплавы.

Титановые сплавы относятся к числу наиболее перспективных материалов для техники низких температур. Титановые сплавы определенных марок обладают удовлетворительной пластичностью и вязкостью вплоть до 4 К. Благодаря низкой плотности в сочетании с высокой прочностью и достаточной пластичностью применение титановых сплавов при низких температурах позволяет уменьшить массу конструкций в сравнении с коррозионностойкими Cr – Ni сталями на 20 – 25 % и алюминиевыми сплавами – на 40 – 45 %. Поэтому титановые сплавы все чаще применяют для изготовления деталей и узлов, работающих при низких температурах в летательных аппаратах.

Химическая активность титана требует определенной осторожности при использовании титановых сплавов в конструкциях, где рабочей средой является газообразный или жидкий кислород.

Наиболее перспективными конструкционными материалами для использования в холодильной и криогенной технике являются сплавы со структурой α -фазы типа BT5-1, легированные 4 – 6 % Al, 2 – 3 % Sn, и OT4-1, содержащие 1,5 – 2,5 % Al и 0,7 – 2,0 % Mn. Они хорошо свариваются и сохраняют высокую пластичность при низких температурах.

Сплавы с двухфазной ($\alpha + \beta$)-структурой типа BT3-1, содержащие 5,5 – 7,0 % Al, 0,8 – 2,0 % Cr, 2 – 3 % Mo, 0,2 – 0,7 % Fe, имеют более высокую прочность, но несколько меньшую пластичность. Поэтому их реже используют при криогенных температурах.

Медь и ее сплавы.

Медь и ее сплавы являются материалами, одними из первых нашедшими применение в холодильном и криогенном оборудовании. Медь не имеет порога хладноломкости, и нижний температурный предел ее использования близок к абсолютному нулю.

Медь и ее сплавы имеют высокое значение температурного коэффициента линейного расширения. С понижением температуры до 120 К этот коэффициент уменьшается, но это уменьшение выражено значительно слабее, чем у коррозионностойких сталей и алюминиевых сплавов.

Технически чистая медь имеет невысокие прочностные свойства. При снижении температуры от 293 до 20 К прочность и твердость меди повышаются почти в два раза, пластичность сохраняется на том же уровне. Ударная вязкость даже увели-



Новые конструкционные материалы

чивается, сохраняя при 20 К столь высокие значения, что надрезанные образцы не разбиваются копром, а протягиваются между его опорами. Усталостная прочность меди и ее сплавов с понижением температуры растет так же, как модуль упругости и модуль сдвига.

Технически чистую медь используют в установках разделения газов методом глубокого охлаждения для изготовления различных трубчатых конструкций: витых и прямотрубных теплообменников, трубчатых конденсаторов и др. Листовую медь используют для изготовления внутренних емкостей и экранов сосудов Дьюара, в которых хранятся и транспортируются жидкие газы, для изготовления обечаек ректификационных колонн жидкого воздуха.

Широкое применение в холодильном и криогенном машиностроении находят сплавы меди – латуни марок Л63, Л68, ЛЖМц59-1-1, ЛЦ59, ЛК80-3Л и бронзы марок БрАЖМцЮ-3-1,5; БрКМц3-1; БрБ2.

Латунь Л68 применяют для изготовления различных трубопроводов, сеток, прокладок, работающих при температурах 520 – 20 К.

Латунь марки ЛС59-1 применяется для изготовления различных крепежных изделий, работающих в интервале температур 520 – 20 К. Для более ответственных крепежных деталей в этом же температурном диапазоне применяют латунь марки ЛЖМц59-1-1.

Из литейной латуни ЛК80-3 изготавливается арматура, корпуса трубопроводов и другие литые детали, работающие при температурах 520 – 20 К.

Бронза марки БрАЖМцЮ-3-1,5 применяется для изготовления втулок, шестерен, вентиляей, деталей клапанной арматуры, эксплуатируемых при температурах 520 – 77 К.

Наибольшую прочность имеют меднобериллиевые сплавы, временное сопротивление которых в термообработанном состоянии более 1000 МПа при удовлетворительной вязкости и пластичности при низких температурах. Поэтому бронза БрБ2, сочетающая высокую прочность с высокой релаксационной стойкостью, нашла применение для изготовления пружинящих элементов криогенной арматуры; они хорошо работают вплоть до 4 К.

ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ

Тугоплавкими называют металлы с температурой плавления выше 2200°С, т. е. выше температуры плавления желе-



Новые конструкционные материалы

за, никеля, кобальта и их сплавов. К тугоплавким металлам, нашедшим применение в технике, относят металлы, имеющие следующие температуры плавления, оС: ниобий 2468, молибден 2610, тантал 2996, вольфрам 3410.

Все перечисленные металлы имеют ОЦК кристаллическую решетку и не претерпевают фазовых превращений. Менее плотноупакованная по сравнению с ГЦК решеткой структура, несмотря на высокую температуру плавления, характеризуется сравнительно низким сопротивлением ползучести.

Другим недостатком всех тугоплавких металлов является их низкая жаростойкость и необходимость использования различных покрытий для защиты от окисления при высоких температурах. Для молибденовых и вольфрамовых сплавов применяют термомодифицирующие силицидные покрытия.

Кроме того, сплавы на основе молибдена и вольфрама недостаточно технологичны – они плохо деформируются и свариваются. Сплавы на основе тантала и ниобия не имеют этих недостатков. Применение танталовых сплавов сдерживается высокой стоимостью и дефицитностью металла. В качестве конструкционных материалов в перспективе могут найти применение сплавы на основе ниобия с дополнительным упрочнением твердого раствора вольфрамом и дисперсным упрочнением карбидами типа MeC.

Основная область применения сплавов тугоплавких металлов – элементы конструкций высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов и термоядерных реакторов, в перспективе они могут быть использованы в космических аппаратах с ядерными источниками энергии, в электрических термодарных и других устройствах. Хорошо известна ведущая роль вольфрама, как материала для нитей накаливания ламп и тантала, как материала для конденсаторов.

Вместе с тем необходимо учитывать, что возможности суперсплавов приближаются к пределу. Поэтому в будущем тугоплавкие металлы могут рассматриваться как перспективные материалы для турбин или других воздушно-реактивных установок при условии, что новые достижения в области металлургических процессов и технологии обработки смогут придать этим материалам необходимые служебные качества.

Сплав ниобия с цирконием (1 % по массе) характеризуется хорошей технологичностью и малым сечением захвата тепловых нейтронов. Его широко применяют в ядерных системах, кото-



Новые конструкционные материалы

рые содержат жидкие металлы и работают при температурах 980 – 1200°C.

Сплав вольфрама с 3 % рения, благодаря высокому электрическому со-противлению, используется в импульсных лампах-вспышках.

Молибденовый сплав, легированный малыми добавками титана (0,5 %) и циркония (0,1 %), используют для изготовления литейных стержней и вставок при литье под давлением стали, алюминия, цинка и меди. Применяют его и как инструментальный материал при изотермической штамповке крупных турбинных дисков.

В ряде специальных конструкций используют так называемые псевдосплавы – композиционные материалы, состоящие из взаимно нерастворимых компонентов с разной температурой плавления. Предварительно спеченный из порошка вольфрама пористый каркас пропитывают при температуре 1200 – 1250°C жидкой металлической составляющей композиции – медью или серебром. Для повышения сопротивления окислению проводят хромирование пористых псевдосплавов.

Свойства псевдосплавов W – Cu и W – Ag можно изменять в широких пределах, варьируя состав композиций. Псевдосплавы имеют лучшую тепло- и электропроводность, чем чистый вольфрам. Теплопроводность чистого вольфрама при температуре 1000°C составляет 120 Вт/(м•К), а псевдосплава W – 20% (объ-емн.) Cu – 135 Вт/(м•К).

Испарение меди при температурах выше 2000 °C мало изменяет различие эксплуатационных свойств чистого вольфрама и псевдосплава. Затраты тепла на испарение меди и пограничный слой, обогащенный медными парами, существенно снижают тепловой поток и эрозионное воздействие продуктов сгорания топлива на материал.

Псевдосплавы W – Cu и W – Ag применяют в ракетной технике и элек-тротехнике. Из них изготавливают сопловые вкладыши ракетных двигателей, работающих на твердом топливе, и ряд других деталей, эксплуатируемых в условиях воздействия мощных тепловых потоков. Плавление и испарение сравнительно легкоплавкой меди сопровождается значительным поглощением тепла, предупреждающим перегрев тугоплавкого вольфрамового каркаса. Пока в порах содержится жидкий металл, температура псевдосплава не может подняться выше его температуры кипения независимо от величины теплового потока, действующего на материал.



Из псевдосплавов $W - Cu$ и $W - Ni - Cu$ изготавливают контакты для высоковольтных выключателей, работающих в неокислительной среде или масле, электроды контактных сварочных машин для сварки тугоплавких и цветных металлов, газоохлаждаемые сопла и межэлектродные вставки мощных сварочных, плазмохимических и металлургических плазмотронов. Пористые сопла для сварочных плазмотронов из вольфрам-медных псевдосплавов с пористостью 50 %, содержащих 10 % (объемн.) Cu , при токе 200 А в течение 10 мин работы почти не теряют массу, тогда как масса сопел из одного пористого вольфрама уменьшается на 2,2 %. Повышенная стойкость пористых псевдосплавов связана с образованием на рабочих поверхностях пленки оксида меди, защищающей вольфрам.

Из псевдосплавов $W - Ag$ изготавливают электроконтакты для сварочных машин, световых выключателей, авиационного оборудования, стартеров, вибраторов, преобразователей тока. Для работы в вакууме можно использовать самосмазывающиеся подшипники, спеченные из вольфрамового порошка и пропитанные серебром, золотом, оловом, сплавом Вуда.

Заменителями псевдосплавов W являются псевдосплавы $Mo - Cu$, $Mo - Ag$. Из молибденовых псевдосплавов изготавливают контакты бытовых приборов, реле, дуговые наконечники, вибропреобразователи.

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

По принципу действия атомные электростанции (АЭС) и тепловые электростанции (ТЭС) мало отличаются друг от друга. На АЭС и ТЭС вода доводится до кипения и образующийся пар подается на лопасти высоко-скоростной турбины, заставляя ее вращаться. Вал турбины соединен с валом генератора, который при вращении вырабатывает электрическую энергию. Различие АЭС и ТЭС состоит в способе нагрева воды до кипения. Если в ТЭС для нагрева воды сжигается уголь или мазут, то в АЭС для этой цели используют тепловую энергию управляемой цепной реакции деления урана.

Для выработки электроэнергии в настоящее время в большинстве стран применяют легководные реакторы (LWR). Реакторы этого типа имеют две модификации: реакторы с водой под давлением (PWR) и кипящие реакторы (BWR), из которых наибольшее распространение получили реакторы с водой под давлением. На рисунке 9.1 представлена схема АЭС, оборудованной легководным реактором с водой, находящейся под давлением.



Новые конструкционные материалы

В корпусе реактора находятся активная зона и первый контур. В первом контуре циркулирует вода, являющаяся теплоносителем и замедлителем. Вода отводит тепло от активной зоны к теплообменнику (парогенератор), в котором тепло передается второму контуру, где вырабатывается пар. Преобразование энергии происходит в турбогенераторе, где пар используется для выработки электроэнергии. Первый контур со всеми трубопроводами и компонентами заключен в специально созданную конструкцию, называемую контейнментом. Таким образом, любые радиоактивные продукты деления, которые могут выйти из топлива в воду первого контура, изолируются от окружающей среды.

В первом контуре вода находится под давлением 15,5 МПа и при максимальной температуре 315°C. Эти условия предохраняют воду от кипения, поскольку точка кипения воды при давлении 15,5 МПа значительно выше 315°C.

Топливо состоит из слабообогащенного диоксида урана (UO_2), изготовленного в виде цилиндрических таблеток размером 8 * 12 мм. Таблетки спекают при высокой температуре, обрабатывают до нужного размера и укладывают в трубки, которые заполняют гелием и герметически запаивают. Получаются длинные топливные стержни с диаметром около 10 из которых собирают сборки. Сборка является топливной единицей, содержащей большое количество энергии. Обычная станция мощностью 1000 МВт содержит около 200 топливныхборок и от 40000 до 50000 топливных стержней. Общее количество топлива в активной зоне реактора PWR мощностью 1000 МВт составляет приблизительно от 100 до 110 т диоксида урана.

В каждом реакторе в зависимости от его конструкции от 16 до 25 ячеек оставлены свободными для регулирующих стержней. Они перемещаются с помощью управляющего стержня, проходящего через крышку корпуса реактора.

Пар, выходящий из турбины, конденсируется в водоохлаждаемом конденсаторе, в котором сбрасывается оставшаяся тепловая энергия. В некоторых системах охлаждения используются градирни.

Радиационная повреждаемость конструкционных материалов

Конструкционные материалы под действием облучения испытывают структурные превращения, оказывающие отрицательное влияние в первую очередь на механические свойства и коррозионную стойкость. Из всех видов облучения (нейтроны,) наиболее сильное влияние оказывает нейтронное облучение.



Новые конструкционные материалы

Радиационно-стойкими материалами называют материалы, сохраняющие стабильность структуры и свойств в условиях нейтронного облучения.

Радиационную среду принято характеризовать нейтронным спектром и нейтронным потоком. Спектр определяется дискретными уровнями энергии нейтронов. В зависимости от энергии нейтронов, используемых для осуществления цепной ядерной реакции, различают реакторы на медленных (тепловых) и быстрых нейтронах. Нейтронный поток характеризует интенсивность радиационной среды и выражается числом нейтронов с энергией $E > 0,1$ МэВ, пересекающих площадь 1 см^2 за 1 с (нейтрон/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$)). Нейтронный поток, суммированный по времени (нейтрон/ см^2), или флюенс нейтронов, характеризует суммарную дозу облучения и является мерой накопления радиационного воздействия.

Соударения вызывают смещения атомов или каскад смещений в решетке в зависимости от количества энергии, передаваемой нейтроном атому металла. Подвергшийся удару нейтроном первый атом, подобно бильiardному шару, ударяя по другим атомам, вызывает в решетке дополнительные смещения. В результате развития каскада образуются объемы с высокой концентрацией вакансий, по периферии окруженные зонами с повышенной плотностью межузельных атомов. Один нейтрон способен создать в алюминии более 6000 вакансий, в бериллии с большей энергией межатомной связи – более 450 вакансий.

Помимо смещений большие нейтронные потоки за счет своей энергии возбуждают атомы, усиливают их колебания (это явление названо «радиационной тряской»), что сопровождается локальным повышением температуры. Рост температуры способствует радиационному отжигу, сопровождающемуся аннигиляцией вакансий и межузельных атомов. Высокие температуры и нейтронное облучение могут вызвать в материале ядерные реакции с образованием гелия, что в свою очередь приводит к появлению газовых пузырей по границам зерен.

Структурные изменения приводят к изменению механических свойств. В результате при температуре ниже температуры рекристаллизации – низкотемпературного облучения – металл упрочняется, но теряет вязкость и пластичность. Влияние суммарного нейтронного потока Φ на временное сопротивление, предел текучести и пластичность аустенитной хромоникелевой стали при 20°C . Сталь приобретает максимальное упрочнение при $\Phi = 3 \cdot 10^{19}$ нейтрон/ см^2 , причем $0,2$ растет интенсивнее, что приводит к снижению способности к деформационному



упрочнению. Дальнейшее увеличение потока практически не влияет на свойства стали.

Кроме флюенса, на свойства оказывает влияние температура, при которой проходит низкотемпературное облучение. Наиболее резко охрупчивание аустенитных сталей проявляется после облучения в температурном интервале 250 – 350°C.

Действие низкотемпературного облучения на свойства металла связано преимущественно с образованием точечных дефектов. В условиях облучения выше температуры рекристаллизации (высокотемпературное облучение) роль точечных радиационных дефектов снижается. Вакансии и межузельные атомы частично аннигилируют друг с другом, частично взаимодействуют с примесями, дислокациями, границами раздела. Оставшиеся межузельные атомы и вакансии объединяются в кластеры, которые в свою очередь могут превращаться соответственно в дислокационные петли межузельного или вакансионного.

Высокотемпературное облучение активизирует диффузионные процессы и способствует распаду пересыщенных твердых растворов – старению. Этим объясняется высокотемпературная хрупкость аустенитных хромоникелевых сталей. Активизацией диффузионных процессов также объясняется снижение длительной прочности при облучении. Падение жаропрочности растет с увеличением температуры и интенсивности нейтронного потока.

При высокотемпературном облучении большими нейтронными потоками в аустенитных сталях и сплавах на основе Ni, Ti, Mo, Zr, Вe зарождаются и растут вакансионные поры, а более подвижные межузельные атомы уходят на дальние стоки (краевые дислокации, границы зерен и др.), что приводит к заметному увеличению объема металла – радиационному распуханию.

Объем аустенитных сталей, облученных при рабочей температуре 450°C, линейно растет с увеличением нейтронного потока. Объем может увеличиться на 20 % и более. Распухание усиливается в результате скопления в микропорах газов, образовавшихся при облучении.

Легирование хромоникелевых сталей титаном, молибденом, ниобием снижает их распухание. Высокохромистые ферритные и перлитные стали с меньшей растворимостью водорода характеризуются меньшей склонностью к распуханию.

Воздействие облучения на полимерные материалы приводит к разрыву полимерных цепочек. Смещение обрывков цепей и свободных радикалов изменяет свойства полимеров и способствует их разрушению.



Новые конструкционные материалы

При облучении резко снижается коррозионная стойкость металлов и сплавов. Вода и водяной пар являются теплоносителями в водном и водопаровом трактах АЭС. Вследствие радиолитического разложения воды изменяется состав электролита – происходит разрушение молекул воды с образованием ионов и атомов кислорода, водорода и щелочных гидроксид-ионов OH^- . Конструкционные реакторные материалы, подвергающиеся облучению, работают в контакте с водой и паром. Образующийся кислород окисляет металл, а водород его наводороживает и тем самым дополнительно охрупчивает. Радиолитическое разложение воды и увеличение концентрации гидроксид-ионов способствует растворению поверхностных оксидных пленок, в обычных условиях защищающих металл от коррозии.

Скорость коррозии сплавов на основе алюминия в водной среде в условиях облучения возрастает в 2 – 3 раза. Аустенитные хромоникелевые стали во влажном паре подвержены межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию.

Состав и свойства реакторных материалов

Корпусные материалы. Для изготовления узлов атомных электростанций используют различные стали. Для обечеек корпусов реакторов в США широко используют рекомендуемые ASTM (American Society for Testing Materials) ферритные низкоуглеродистые и низколегированные стали марок A508-2 и A533. Стали легированы марганцем и молибденом, причем первая марка дополнительно модифицирована небольшими добавками никеля и хрома. После улучшения стали характеризуются высокой прочностью и вязкостью и, благодаря низкому содержанию углерода, имеют хорошую свариваемость. Технические условия ASTM на эти стали для повышения стойкости против радиационного охрупчивания устанавливают низкое содержание вредных примесей (менее 0,012 % P и 0,015 % S) и особенно меди (менее 0,1 %) и ванадия (менее 0,06 %).

Однако эти ферритные стали быстро теряют прочность при повышении температуры и не обладают достаточной коррозионной стойкостью. Поэтому внутренние поверхности всех компонентов первого контура плакируют аустенитными хромоникелевыми коррозионностойкими сталями серии 300 AISI.

Корпус жидкометаллического реактора, работающего при более высокой температуре, для предотвращения ползучести изготавливают целиком из сталей типа 304 и 316.

Корпуса современных модификаций реакторов HTGR работают при еще более высоких температурах (до 700°C) и давлениях в активной зоне (7,25 МПа). Для их изготовления



применяют сплавы на основе никеля и кобальта, легированные хромом и молибденом. Сопротивление ползучести специальных сплавов примерно в 2 раза превышает сопротивление ползучести аустенитных сталей типа X18H8 при температуре 650°C, причем при более высоких температурах это различие возрастает.

Радиационное распухание можно подавить путем структурно-принудительной рекомбинации металлов за счет непрерывного распада твердого раствора с определенной дилатацией на границе матрицы с образующейся вторичной фазой. Возникающие при распаде сильные поля структурных напряжений способствуют рекомбинации радиационных дефектов и существенно снижают распухание. Развитое дисперсионное твердение является способом подавления радиационного распухания.

Легирование титаном и алюминием способствует переходу сталей и сплавов в группу дисперсионно-твердеющих материалов, что позволяет уменьшить высокое содержание никеля, почти полностью подавив радиационное распухание. Дисперсионному твердению способствует модифицирование стали редкоземельными элементами – иттрием, празеодимом. Высокое сопротивление распуханию достигается в экономнолегированных никелем сталях типа X12H23MT3Ц4 (23 % Ni), X15H15M3TЦ4 (15 % Ni), X15H11T2Ц4(11 % Ni).

Материалы теплообменников. В реакторах АЭС используются крупные парогенераторы, с помощью которых осуществляется теплопередача от первого контура ко второму. Передача тепла осуществляется через стенки тысяч труб парогенераторов. Материал труб должен обладать высокой теплостойкостью и коррозионной стойкостью, особенно со стороны второго контура, где среда более агрессивна. Первоначально для их изготовления применяли хромоникелевые стали типа X18H8 и X18H12. Более высокую надежность имеют холоднотянутые трубы из сплавов на основе никеля. На АЭС США для труб парогенераторов обычно используют инконель 600, содержащий 60,5 % Ni, 23 % Cr, 14,1 % Fe и небольшие количества других элементов. В Германии отдают предпочтение сплаву инконель 800 (34 % Ni, 21 % Cr, 43 % Fe).

Из-за скопления примесей в участках второго контура с плохой циркуляцией может образоваться щелочная среда. В щелочных растворах с высокой температурой резко возрастает опасность межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением. Присутствующие в воде примеси и растворенные газы (водород, кислород или аммиак) способствуют корро-



зии. Из трех рассмотренных материалов наибольшей стойкостью к коррозионному растрескиванию обладает сплав инконель 800. Высокую надежность имеют титановые трубопроводы, особенно в агрессивных средах. Широкое внедрение трубопроводов из этого материала сдерживается высокой стоимостью как самого титана, так и изготовления из него изделий.

Конструкционные материалы тепловыделяющих элементов (ТВЭ-Лов). ТВЭЛы представляют собой длинные трубы, в которые загружается топливо в виде таблеток из оксида урана или смешанного уран-плутониевого оксида. Трубы служат оболочками и представляют собой барьеры, препятствующие выходу в контур продуктов деления, выделяющихся из топлива во время облучения.

Конструкция ТВЭЛов должна позволять осуществлять экономически выгодный топливный цикл. Помимо высокой радиационной стойкости, ТВЭЛы должны иметь такие характеристики, которые позволяют сделать работу АЭС безопасной. Первое требование вынуждает выбирать конструкционные материалы с низким сечением захвата нейтронов, тогда как второе требование вынуждает отдавать предпочтение материалам с необходимыми механическими и коррозионными характеристиками.

Оболочки ТВЭЛов первых реакторов изготавливались из хромоникелевых аустенитных сталей благодаря их высоким механическим и антикоррозионным характеристикам. Их недостатком является низкая сопротивляемость набуханию под действием нейтронного облучения и высокое сечение захвата нейтронов. На смену оболочкам из нержавеющей сталей пришли оболочки из циркониевых сплавов – циркалоев. Циркалои имеют по сравнению со сталями в 15 раз меньшее сечение захвата нейтронов, низкий коэффициент линейного расширения, хорошее сопротивление ползучести и высокую пластичность.

МЕТАЛЛЫ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ.

Долгое время неупругую деформацию считали полностью необратимой. В начале 60-х годов XX в. был открыт обширный класс металлических материалов, у которых элементарный акт неупругой деформации осуществляется за счет структурного превращения. Такие материалы обладают обратимостью неупругой деформации. Явление самопроизвольного восстановления формы – эффект памяти формы (ЭПФ) – может наблюдаться как в изотермических условиях, так и при температурных изменениях. При теплосменах такие металлические материалы могут многократно обратимо деформироваться.



Новые конструкционные материалы

Способность к восстановлению деформации не может быть подавлена даже при высоком силовом воздействии. Уровень реактивных напряжений некоторых материалов с ЭПФ может составлять до 1000 – 1300 МПа.

Эффект памяти формы состоит в том, что образец, имеющий определенную форму в аустенитном состоянии при повышенной температуре, деформируют при более низкой температуре мартенситного превращения. После перегрева, сопровождающегося протеканием обратного превращения, исходная характерная форма восстанавливается. ЭПФ проявляется в сплавах, характеризующихся термоупругим мартенситным превращением, когерентностью решеток исходной аустенитной и мартенситной фаз, сравнительно небольшой величиной гистерезиса структурного превращения, а также малыми изменениями объема при превращениях.

В этих условиях при деформации образуются когерентные с исходной структурой двойниковые мартенситные кристаллы, а при отогреве и обратном превращении эти мартенситные кристаллы исчезают и плавно переходят в решетку исходной фазы. Обратимое движение когерентных межфазных границ при обратном превращении приводит к восстановлению первоначальной формы.

При охлаждении материала из аустенитного состояния мартенсит начинает образовываться при некоторой температуре M_n . При дальнейшем охлаждении количество мартенситной фазы увеличивается, и полное превращение аустенита в мартенсит заканчивается при некоторой температуре M_k . Ниже этой температуры термодинамически устойчивой остается только мартенситная фаза.

При нагреве превращение мартенсита в аустенит начинается при некоторой температуре A_n и полностью заканчивается при температуре A_k . При полном термоциклировании получается гистерезисная петля. Ширина гистерезисной петли по температурной шкале $A_k - M_n$ или $A_n - M_k$ может быть различной для разных материалов: широкой или узкой

Кроме этих температур обычно рассматривают еще три характеристических температуры: T_0 – температура термодинамического равновесия; M_d – температура, ниже которой мартенсит может возникнуть не только вследствие понижения температуры, но и под действием механического напряжения; A_d – температура, выше которой аустенит может появиться не только под действием температуры, но и под действием механических



Новые конструкционные материалы

напряжений. Расположение этих температур относительно петли гистерезиса оказывает влияние на поведение материала при термосиловом воздействии. В случае узкого гистерезиса температура M_d может оказаться выше температуры конца аустенитного превращения A_c , а при широком гистерезисе – ниже этой температуры

Тогда для материала с узким гистерезисом наведенный механомартенсит, т. е. мартенсит, образованный под действием внешней нагрузки при температуре ниже M_d (но выше A_c), будет термодинамически неустойчивым и при разгрузке он должен исчезнуть.

В случае широкого гистерезиса наведенный механомартенсит будет термодинамически устойчивым и сохраняется при разгрузке. Деформации в этом случае исчезнут только после нагрева, т. е. после завершения превращения мартенсита в аустенит.

Из большого числа сплавов с ЭПФ наиболее перспективными для практического применения являются сплавы Ti – Ni эквивалентного состава (примерно 50 : 50 % (ат.)), обычно называемые никелидом титана или нитинолом. Реже используют более дешевые сплавы на основе меди Cu – Al – Ni и Cu – Al – Zn.

Таким образом, варьируя соотношение титана и никеля, можно существенно менять температуры фазовых переходов и влиять на ширину гистерезиса фазовой диаграммы. В разных сплавах с ЭПФ интервал температур фазовых переходов может находиться в пределах от 4,2 до 1300 К.

Температуры мартенситных превращений зависят от состава сплава. Легирование никелида титана железом, марганцем, хромом, ванадием, кобальтом приводит к снижению M_n и M_k вплоть до -196°C , а введение Zr, Ta, Nb – к их повышению (до $+100^\circ\text{C}$). Медь и кремний в довольно широком интервале составов слабо влияют на температуры превращений.

Технология производства и свойства сплавов с эффектом памяти формы

Никелид титана в жидком состоянии легко поглощает газы и взаимодействует со многими веществами. Поэтому его выплавка производится в вакууме или атмосфере чистого инертного газа. К слиткам предъявляются высокие требования по однородности химического состава и чистоте от примесей. Хорошее качество металла достигается применением комбинированного способа плавки, при котором вначале плавка производится в вакуумной гарнисажной печи, после чего полученный электрод вторично



переплавляют в электродуговой вакуумной печи в слитки массой до 1 т.

Никелид титана подвергают обработке давлением в интервале температур 700 – 900°C. Нагрев до более высоких температур опасен из-за сильного окисления и образования хрупкого газонасыщенного поверхностного слоя.

Особенно важную роль играет технологическая операция термофиксации. Сложность этой операции обусловлена проявлением эффекта памяти после придания заготовке из никелида титана требуемой формы. Заготовку деформируют при комнатной температуре. Для сохранения формы и размеров производят жесткое фиксирование по всем степеням свободы (заневоливание) с последующим нагревом в вакууме до температуры 650 – 700°C, т. е. до аустенитного состояния. В результате такой операции достигается стабильное состояние структуры и формы, которые объект «запоминает».

Из сплавов никелида титана производят листы толщиной до 10 мм, проволоку, прессованные прутки диаметром до 110 мм и трубы с наружным диаметром до 50

Две характеристики предела текучести обусловлены возможностью разного структурного состояния сплава ТН-1 при комнатной температуре. При стабильно аустенитной структуре поведение никелида титана при нагружении типично для большинства металлов. Если же под напряжением происходит мартенситное превращение и структура становится мартенситно-аустенитной или мартенситной, то кроме условного предела текучести $\sigma_{0.2} = 400 - 600$ МПа наблюдается еще один предел текучести при значительно меньшей величине напряжения, называемый фазовым пределом текучести. Величина зависит от положения температуры деформирования T_d относительно характеристических температур мартенситных превращений. Установлено, что минимальные значения наблюдаются при T_d , близкой к M_n . При чисто мартенситной структуре $\sigma_{0.2} = 150 - 200$ МПа, при двухфазной – $\sigma_{0.2} = 200 - 400$ МПа.

Для повышения триботехнических характеристик (Трибология (греч. tribos – трение) – научная дисциплина, занимающаяся изучением трения и износа деталей машин и механизмов в присутствии смазочных материалов) проводится химико-термическая обработка, состоящая из оксидирования и азотирования трущихся поверхностей. Сплавы никелида титана свариваются теми же способами, как и другие титановые сплавы: аргонодуговым, электронно-лучевым и др.



Новые конструкционные материалы

Сплавы на основе никелида титана плохо поддаются механической обработке, особенно сплавы типа ТН-1, в которых интервал прямого мартен-ситного превращения (Мн – Мк) находится вблизи комнатной температуры. В процессе резания происходят структурные превращения в поверхностном слое, приводящие к появлению эффекта памяти и резкому изменению механических свойств. Для механической обработки следует применять твердо-сплавные резцы с оптимальной геометрией и специальные охлаждающие среды.

Никелид титана в зависимости от состава и условий деформирования может иметь как однократно, так и многократно обратимый ЭПФ. Многократно обратимый эффект памяти проявляется при термоциклировании через интервалы прямого и обратного мартенситных переходов. Этот эффект проявляется как в нагруженном, так и в ненагруженном состоянии материала и сохраняется практически независимо от числа теплосмен.

Помимо никелида титана ЭПФ обнаружен во многих сплавах. Однако, как показали исследования, практическое применение, кроме никелида титана, имеют только сплавы на основе меди, такие как тройные сплавы Cu – Al – Ni и Cu – Zn – Al. Эти сплавы привлекли внимание в связи с резким расширением сферы применения сплавов с ЭПФ и необходимостью обеспечения экономичности их производства. Стоимость сплавов на основе меди по данным японских фирм составляет не более 10 % от стоимости никелида титана.

Основным недостатком сплавов на основе меди является их высокая хрупкость. Сплав Ti – Ni может быть деформирован до разрушения приблизительно на 50 %. Разрушение происходит с образованием шейки и ямочным рельефом, т. е. наблюдается типично вязкое разрушение. Поликристаллические образцы из сплавов на основе меди являются чрезвычайно хрупкими, после деформации на 2 – 3 % происходит интеркристаллитное разрушение. Высокая хрупкость чрезвычайно затрудняет обработку давлением сплавов с ЭПФ на основе меди при комнатной температуре. Кроме того, сплавы на основе меди могут менять температуру превращения и свойства в результате старения при температурах ниже эксплуатационных. Это ограничивает возможность их применения при высоких температурах. Сплавы на основе меди характеризуются более низким сопротивлением усталости.

Эти обстоятельства, а также высокая коррозионная стойкость и стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением, несмотря на более высокую стоимость на уровне со-



временной технологии, делают сплавы на основе никелида титана практически незаменимыми для изделий ответственного назначения.

Применение сплавов с эффектом памяти формы

Освоение ближнего и дальнего космоса связано с созданием орбитальных станций и крупным космическим строительством. Необходимо сооружение таких громоздких объектов, как солнечные батареи и космические антенны.

Антенны состоят из листа и стержня из сплава Ti – Ni, которые свернуты в виде спирали и помещены в углубление в искусственном спутнике. После запуска спутника и выведения его на орбиту антенна нагревается с помощью специального нагревателя или тепла солнечного излучения, в результате чего она выходит в космическое пространство.

Для размещения различных технических объектов, жилых и производственных модулей необходимо строительство в условиях открытого космического пространства больших платформ. Доставка в открытый космос громоздких агрегатов технически возможна только по частям с последующими монтажными работами. Используемые в массовом производстве способы соединения деталей, такие как сварка, пайка, склеивание, клепка и другие, непригодны в космических условиях. Особые требования предъявляются к обеспечению исключительно высокой техники безопасности.

С учетом этих особенностей в нашей стране была создана уникальная технология соединения элементов в открытом космосе с использованием муфты из сплава ТН-1. Эта технология была успешно использована при сборке конструкции фермы из алюминиевых сплавов общей длиной 14,5 м и поперечным сечением в виде квадрата со стороной 0,5 м. Ферма состояла из отдельных трубчатых деталей диаметром 28 мм, которые соединялись между собой с помощью муфты из металла с памятью

Муфту с помощью дорна деформировали при низкой температуре таким образом, чтобы ее внутренний диаметр был больше наружного диаметра соединяемых элементов. После нагрева выше температуры обратного мартенситного превращения внутренний диаметр муфты восстанавливался до того диаметра, который муфта имела перед расширением. При этом генерировались значительные обжимающие реактивные усилия, соединяемые элементы пластически деформировались, что обеспечивало их прочное соединение. Сборка фермы и установка ее на астрофизическом модуле «Квант» орбитального ком-



плекса «Мир» была произведена в 1991 г. всего за четыре выхода в открытый космос и заняла в общей сложности около суток.

Эти же принципы строительства могут быть использованы для монтажа на больших глубинах крупногабаритных морских подводных конструкций.

Их используют для соединения трубопроводов гидросистем реактивного истребителя F-14, причем каких-либо аварий, связанных с утечкой масла, не отмечено. Преимуществом муфт, изготовленных из сплавов с памятью формы, помимо их высокой надежности, является отсутствие высокотемпературного нагрева (в отличие от сварки). Поэтому свойства материалов вблизи соединения не ухудшаются. Муфты такого типа применяются для трубопроводов атомных подводных лодок, надводных кораблей, для ремонта трубопроводов для перекачки нефти со дна моря, причем для этих целей используются муфты большого диаметра – порядка 150 мм. В некоторых случаях для изготовления муфт применяется также сплав $Cu - Zn - Al$.

Для неподвижного соединения деталей обычно применяются заклепки и болты. Однако, если невозможно осуществлять какие-либо действия на противоположной стороне скрепляемых деталей (например, в герметичной пустотелой конструкции), выполнение операций крепления вызывает трудности. Стопоры из сплава с эффектом памяти формы позволяют в этих случаях осуществить крепление с использованием пространственного восстановления формы.

Сплавы с ЭПФ используют в силовых конструкциях прессов, домкратов. Трубчатый силовой элемент прессы с наружным диаметром 14 мм и толщиной стенки 1 мм развивает усилие до 2 т. С целью экономии полезного пространства можно использовать комбинированные конструкции, в которых все рабочие элементы являются активными. Примером такой конструкции является телескопический малогабаритный домкрат, в котором простые цилиндры развивают

Особенностью исполнительных элементов из сплавов с памятью является их миниатюрность. Это обусловлено простотой механизма их действия, а также тем, что элемент состоит из одного сплава. На действие таких исполнительных механизмов не влияет среда или атмосфера, а влияет только температура. Следовательно, возможна установка этих элементов в таких средах, как вакуум или вода, при этом нет необходимости в герметизированном подвижном узле, как при установке двигателей или гидронеуматических цилиндров.



Новые конструкционные материалы

Материалы с ЭПФ могут применяться в простых тепловых двигателях, использующих разность температур горячей и холодной воды или горячей воды и холодного окружающего воздуха. Такие двигатели работают за счет преобразования в механическую энергию низкотемпературной бросовой тепловой энергии, например энергии горячей отходящей воды, геотермической или солнечной энергии.

Двигатель действует с помощью шести спиралей из сплава Ti – Ni. Оси рабочего колеса и кривошипного вала смещены одна относительно другой. Удлинение и сокращение спиралей в зависимости от разности температур горячей и холодной сред, составляющей 10 – 20°C, действуют так же, как возвратно-поступательное движение поршня в обычных двигателях, и вызывают вращение рабочего колеса.

ТЕМА 8 ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Методы порошковой металлургии позволяют создавать принципиально новые материалы, которые сложно или даже невозможно получить другими способами. Порошковая металлургия дает возможность свести к минимуму отходы металла в стружку, упростить технологию изготовления деталей и снизить трудоемкость их производства.

Технологический процесс изготовления изделий из порошков включает получение порошков, подготовку шихты, формование, спекание, горячее прессование и штамповку. Иногда применяют дополнительную обработку, состоящую из пропитки деталей смазками, термической и химико-термической обработки, калибровки и обработки резанием.

Размеры частиц порошка обычно составляют от 0,1 мкм до 0,1 мм. Более крупные фракции называют гранулами, а более мелкие – пудрой.

Металлические порошки получают физико-механическими и химико-металлургическими способами. В основе физико-механических способов получения порошков лежат методы механического измельчения металлов в твердом и жидком состояниях. К ним относятся дробление и размол стружки в мельницах, распыление расплавленного металла струей сжатого воздуха, газа или жидкости, грануляция при литье расплавленного металла в жидкость и пр.



Новые конструкционные материалы

К химико-металлургическим способам относятся способы восстановления металлов из оксидов, электролитическое осаждение металлов из водных растворов солей, термическая диссоциация карбонильных соединений металлов.

При формовании заготовок из порошков определенного химического состава прессованием им придают форму и размеры готовых деталей, после чего направляют на спекание. При спекании непрочные прессованные заготовки превращаются в прочное спеченное тело со свойствами, приближающимися к свойствам беспористого компактного материала. Температура спекания деталей из конструкционных материалов на основе железа с добавками графита, никеля и других компонентов составляет 1100 – 1200°C. Температура спекания изделий антифрикционного назначения на основе железа составляет 1000 – 1050°C, на основе бронзы – 850 – 950°C. Спекание проводят в течение 0,5 – 1,5 ч в нагревательных печах, как правило, в защитной атмосфере или в вакууме для предотвращения окисления частиц порошка. Для получения более высоких характеристик механических и служебных свойств материалов и повышения точности размеров после формования и спекания дополнительно производят горячее прессование, штамповку, прокатку и термическую обработку.

В ряде случаев дополнительно проводят химикотермическую обработку деталей из порошковых материалов. Цементацию и нитроцементацию применяют для повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя. Сульфидирование применяется с целью уменьшения коэффициента трения для повышения износостойкости и твердости железных и железграфитовых изделий. Оксидирование обработкой паром применяется для повышения износостойкости и коррозионной стойкости порошковых деталей на железной основе.

Конструкционные материалы. (Конструкционные порошковые материалы)

Различают конструкционные порошковые материалы общего назначения, заменяющие обычные углеродистые и легированные стали, чугуны и цветные металлы, и материалы, обладающие специальными свойствами – высокой износостойкостью, твердостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, специфическими магнитными и электрическими характеристиками. В зависимости от условий нагружения различают мало-, средне- и тяжело нагруженные детали, которые в свою очередь делятся на тяжело нагруженные статическими и динамическими усилиями.

Чем выше требования по прочности, тем меньше



должна быть пористость металла. Порошковые детали делятся на четыре группы по плотности (пористости). Тяжелонагруженные статическими усилиями детали изготавливают из порошков углеродистых или легированных сталей и цветных сплавов. Пористость материала не должна превышать 9 %. Изделия получают холодным прессованием и спеканием с последующей дополнительной горячей и холодной штамповкой или горячим прессованием. Применяют также пропитку легкоплавкими металлическими расплавами с последующей термической обработкой.

Тяжелонагруженные динамическими нагрузками детали изготавливают из порошков углеродистых и легированных сталей и сплавов цветных металлов с пористостью не более 2 %. В этом случае проводят холодное прессование, спекание, горячую штамповку, горячее прессование или химико-термическую обработку.

С увеличением плотности одновременно возрастают пластичность и ударная вязкость. Изменяя пористость, можно регулировать плотность и механические свойства, подбирать материалы с заданным уровнем свойств для конкретных условий работы изделий.

Порошковые стали по механическим свойствам могут не уступать литым и кованным сталям соответствующего состава. Так мартенситно-стареющие стали, благодаря возможности повышения содержания титана до 2 – 3 % имеют до 2000 МПа при КСЧ от 30 до 40 Дж/см².

Основой для получения порошковых коррозионностойких материалов обычно служат порошки сталей и сплавов определенного состава.

Перспективно использование порошков титана и его сплавов для изготовления тяжелонагруженных деталей. Высокие механические свойства порошковых изделий на основе титана ($\sigma = 650 - 900$ МПа, $\delta = 8 - 16\%$) позволили применить их для изготовления шатунов автомобильных двигателей. Это позволило существенно уменьшить массу, снизить инерционные силы и повысить мощность двигателя. Из порошков титана организовано серийное производство таких деталей, как втулки, крышки, трубы для химического и пищевого машиностроения, приборостроения и др.

Антифрикционные материалы

Для изготовления подшипников скольжения, уплотнений, подпятников наряду с литыми сплавами (бронзы, баббиты и чугуны) используют антифрикционные материалы, изготовленные методом порошковой металлургии. Они создаются на основе меди или железа и содержат вещества типа твердых смазок



Новые конструкционные материалы

(графит, сульфиды и др.), что обеспечивает им заданные механические и эксплуатационные свойства.

Антифрикционные порошковые материалы характеризуются низким коэффициентом трения, хорошей износостойкостью, способностью легко прирабатываться к валу и выдерживать значительные нагрузки. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными антифрикционными материалами. Их износостойкость в несколько раз выше, чем у бронз и баббитов. Они работают при более высоких скоростях и давлениях. Наличие в структуре пористости, регулируемой в широких пределах (до 35 %), позволяет предварительно пропитывать их смазочными маслами. Во время работы по мере нагревания масло, удерживаемое в порах и мельчайших каналах материала капиллярными силами, постепенно вытесняется наружу и образует смазочную пленку на рабочей поверхности. При остановке и последующем охлаждении подшипника масло частично всасывается обратно в поры. Поэтому пористые подшипники могут работать длительное время без дополнительной смазки. Эффект самосмазываемости в пропитанном маслом пористых подшипниках без подвода смазки извне может сохраняться в течение 3000 – 5000 ч.

Композиционные антифрикционные порошковые материалы позволяют иметь равномерно распределенные включения из веществ, играющих роль твердой смазки. К таким веществам относятся графит, сульфиды, пластмассы и некоторые другие соединения. Такие материалы имеют сравнительно низкий коэффициент трения при работе в режиме сухого трения без жидкой смазки. Сочетание повышенных антифрикционных свойств твердых смазок и пластмасс со свойствами металлов позволяет получать материалы, способные работать в воде, агрессивных жидкостях, бензине, различных газовых средах, в вакууме, а также в условиях высоких и низких температур.

Порошковые антифрикционные материалы могут представлять собой каркасные конструкции, в которых каркас выполнен из прочного материала, а промежутки заполнены более мягким материалом. Можно, наоборот, иметь мягкую матрицу с равномерно распределенными твердыми включениями разной степени дисперсности, повышающими работоспособность подшипников. Эти особенности позволяют осуществлять направленное регулирование свойств порошковых антифрикционных материалов применительно к конкретным условиям эксплуатации.

Внедрение порошковых подшипников скольжения повышает надежность и долговечность работающего оборудования.



ния, снижает трудоемкость процесса их изготовления, позволяет уменьшить отходы металла в стружку, обеспечивает экономию дефицитных цветных металлов и сплавов.

Фрикционные материалы (Порошковые фрикционные материалы)

Порошковые фрикционные материалы предназначены для работы в различных тормозных и передаточных узлах автомобилей, гусеничных машин, дорожных и строительных механизмов, самолетов, станков, прессов и т. п. Фрикционные элементы из порошковых материалов изготавливают в виде дисков, секторных накладок и колодок различной конфигурации. Применяют порошковые фрикционные материалы на основе меди и на основе железа.

Порошковые материалы на основе оловянистых и алюминиевых бронз, содержащие свинец, графит и железо, предназначены преимущественно для работы в условиях трения со среднеуглеродистыми сталями с твердостью 40 – 45 HRC при давлении до 35 МПа и скорости скольжения до 50 м/с. При меньших давлениях и скоростях до 5 м/с используют металлопластмассовые материалы.

Порошковые материалы на основе железа, содержащие добавки меди, графита, оксида кремния, асбеста, сульфата бария, предназначены для работы в условиях трения при давлениях до 300 МПа и скоростях до 60 м/с в паре с чугуном либо легированной сталью в тормозных устройствах различной конструкции – дисковых, колодочных, ленточных тормозах.

В сравнении с асбофрикционными материалами порошковые материалы обладают более высокими значениями термо- и износостойкости (в 2 – 4 раза), а в некоторых случаях, например при работе с легированным чугуном, и более высоким (на 15 – 25 %) коэффициентом трения.

Пористые фильтрующие элементы

Для изготовления фильтрующих элементов обычно применяют ткани, войлок, керамику, фарфор, а также сетчатые фильтры из различных материалов. Их недостатками являются низкая коррозионная стойкость, недостаточная механическая прочность, низкая термостойкость и жаропрочность. В большинстве случаев они не допускают высоких перепадов давлений и с трудом поддаются регенерации.

Высокопористые порошковые металлические материалы благодаря жесткому пространственному каркасу имеют бо-



Новые конструкционные материалы

лее высокую прочность. Они выдерживают резкие колебания температур, легко обрабатываются, свариваются и паяются, обеспечивают необходимую коррозионную стойкость, жаростойкость, теплопроводность. Вследствие высокой пористости они имеют хорошую проницаемость для жидкостей и газов при достаточно тонкой фильтрации (до 30 мкм). Эти материалы легко регенерируются и при этом почти полностью восстанавливают свои первоначальные свойства. Они не засоряют фильтрующиеся жидкости или газы материалами фильтра.

Технология изготовления металлических пористых элементов зависит от их формы и размеров. Фильтры небольших размеров изготавливают спеканием свободно засыпанного порошка. Для более крупных фильтров применяют холодное прессование и последующее спекание. Для получения тонких пористых лент применяют прокатку.

Для изготовления пористых проницаемых элементов применяют порошки различных металлов и сплавов: углеродистых и коррозионностойких сталей различных марок, сплавов никеля с хромом и молибденом, сплавов меди, титана, алюминия, вольфрама, молибдена и др. В технике наибольшее распространение получили фильтры из коррозионностойкой стали, бронзы, сплавов никеля и титана.

Применение порошковых материалов позволяет увеличить срок службы насосов, двигателей и других агрегатов, работающих на очищенных жидкостях. С их помощью повышается эффективность химических процессов и улучшается качество вакуумной продукции, создаются предпосылки для получения материалов с новыми свойствами.

Инструментальные порошковые стали

Получение порошков быстрорежущих сталей осуществляется методами газового и водного распыления. Основные технологические операции получения порошковых заготовок инструмента методом газового распыления производятся в следующей последовательности (процесс ASEA-Stora): 1) распыление расплава азотом; 2) рассев фракций; 3) загрузка в контейнер; 4) вакуумирование, заполнение азотом и заварка контейнера; 5) холодное изостатическое прессование (ХИП) контейнера; 6) нагрев контейнера; 7) горячее изостатическое прессование (ГИП) контейнера; 8) пластическое деформирование заготовки; 9) изготовление окончательного сорта; 10) передача прутков на изготовление инструмента.

Недостаток быстрорежущих сталей обычного пере-



дела заключается в неравномерном распределении карбидов. В порошковых сталях карбидной ликвации нет. Порошковая металлургия обеспечивает снижение потерь материала, уменьшение энергозатрат, а также необходимое изменение химического состава. За счет измельчения структуры и более равномерного распределения карбидов износостойкость порошковой быстрорежущей стали выше, чем обычной, в 1,5 – 3 раза.

Технология ГИП используется во многих странах, однако необходимость применения сложной аппаратуры снижает ее экономичность. Более экономичной считается горячая экструзия, при которой порошковые заготовки после спекания пористостью менее 10 % подвергают обжатию высокой степени (свыше 90 %).

Как правило, при производстве порошковой быстрорежущей стали используются порошки с размером частиц менее 600 мкм. Температура спекания зависит от содержания углерода. Для стали с содержанием углерода 1 % она составляет 1240°C, при увеличении содержания углерода до 1,6 % – 1200°C.

Порошковая металлургия обеспечивает мелкозернистую структуру изделий из быстрорежущей стали, повышает их прочность и вязкость, а также износостойкость.

Порошковые высоколегированные инструментальные стали применяют также для штампов. Хромо-молибденовая сталь типа X12M высокой плотности используется для изготовления инструмента для ударного выдавливания.

Карбидостали

Карбидостали называют порошковые материалы, состоящие из легированной стальной матрицы и карбидов с массовой долей от 20 до 70 %. В качестве карбидной составляющей чаще всего применяют карбид титана. Матрица из легированной стали выполняет роль связки с равномерно распределенными в ней карбидами.

Приготовление порошковой смеси состоит в смешивании порошка TiC с порошком стали-связки заданного состава либо со смесью порошка железа с порошками легирующих компонентов.

В качестве металла-связки обычно используются легированные инструментальные стали марок X12M, X4H2MB, X6B3M, 5X6BM2, P6M5K5.

Карбидостали после закалки и отпуска обладают высокой твердостью и износостойкостью. По комплексу свойств они занимают промежуточное положение между твердыми сплавами и быстрорежущими сталями.



Новые конструкционные материалы

Кроме инструментов разного назначения их можно использовать для изготовления деталей, подвергающихся интенсивному износу: втулок, валиков, подшипников, зубчатых колес, кулачков, а также деталей, работающих в условиях гидроабразивного износа, при повышенных температурах и в коррозионных средах. В качестве матрицы могут использоваться инструментальные, конструкционные, нержавеющие и другие стали, что определяется назначением карбидосталей.

Карбидостали обладают высокой твердостью при нагреве, сравнительно низким коэффициентом трения, устойчивостью против адгезии при обработке материалов, незначительным изменением размеров при термической обработке. Карбидостали легче инструментальных сталей на 12 %, твердых сплавов – на 50 %.

Условия образования аморфной структуры

При переохлаждении жидкой фазы ниже равновесной температуры плавления $T_{пл}$ скорость кристаллизации достигает максимума при температуре $T_{п}$. Если жидкость закалить со скоростью выше критической до температуры стеклования $T_{д}$, то система будет «заморожена» и образуется аморфное состояние. Критическая скорость охлаждения для разных аморфных сплавов составляет от 102 до 1010 К/с.

В настоящее время использование специальных методов закалки из жидкого состояния позволяет достигать скорости охлаждения более 105 К/с и получать металл в стеклообразном аморфном состоянии.

Из диаграммы также следует, то если полученный аморфный сплав впоследствии нагреть до температуры $T < T_{п}$ и выдерживать изотермически в течение времени t_x , он начнет кристаллизоваться. Если же аморфный сплав медленно нагревать от комнатной температуры, то кристаллизация начинается при температуре T_x , которая повышается по мере увеличения скорости нагрева. Условия перехода в кристаллическое состояние меняются в широких пределах для разных аморфных систем.

Аморфные сплавы находятся в термодинамически неравновесном состоянии. В силу своей аморфной природы металлические стекла имеют свойства, присущие неметаллическим стеклам: при нагреве в них проходят структурная релаксация, «расстекловывание» и кристаллизация. Поэтому для стабильной работы изделий из аморфных сплавов необходимо, чтобы их температура не превышала некоторой заданной для каждого сплава рабочей температуры.



Новые конструкционные материалы

Многие металлические стекла на основе Fe, Co и Ni переходят в кристаллическое состояние при 700 К (приблизительно 0,5 Тпл) в течение нескольких минут. Длительная эксплуатация этих материалов в течение нескольких лет возможна лишь при температурах, ниже указанной приблизительно на 300 К. Введение в состав сплава для повышения термической стабильности металлических стекол дополнительных элементов – металлов или металлоидов – повышает температуру и энергию активации кристаллизации. Увеличение энергии активации приводит к резкому повышению термической стабильности и периода сохранения аморфной структуры при умеренных температурах.

Затвердевание с образованием аморфной структуры принципиально возможно для всех металлов и сплавов. Для практического применения обычно используют сплавы переходных металлов (Fe, Co, Mn, Cr, Ni и др.), в которые для образования аморфной структуры добавляют аморфообразующие элементы (B, C, Si, P, S). Такие аморфные сплавы обычно содержат около 80 % (ат.) одного или нескольких переходных металлов и 20 % металлоидов, добавляемых для образования и стабилизации аморфной структуры. Состав аморфных сплавов близок по формуле $Me_{80}X_{20}$, где Me – один или несколько переходных металлов, а X – один или несколько аморфизаторов. Известны аморфные сплавы, состав которых отвечает приведенным формулам: Fe70Cr10P15B5, Fe40Ni40S14B6, Fe80P13B7 и др. Аморфизаторы понижают температуру плавления и обеспечивают достаточно быстрое охлаждение расплава ниже температуры его стеклования так, чтобы в результате образовалась аморфная фаза. На термическую стабильность аморфных сплавов наибольшее влияние оказывают кремний и бор, наибольшей прочностью обладают сплавы с бором и углеродом, а коррозионная стойкость зависит от концентрации хрома и фосфора.

Структура аморфных сплавов подобна структуре замороженной жидкости. Затвердевание происходит настолько быстро, что атомы вещества оказываются замороженными в тех положениях, которые они занимали, будучи в жидком состоянии. Аморфная структура характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении атомов, благодаря чему в ней нет кристаллической анизотропии, отсутствуют границы блоков, зерен и другие дефекты структуры, типичные для поликристаллических сплавов.

Следствием такой аморфной структуры являются необычные магнитные, механические, электрические свойства и коррозионная стойкость аморфных металлических сплавов. Наря-



Новые конструкционные материалы

ду с высокой магнитной мягкостью, такой, что уровень электромагнитных потерь в аморфных сплавах с высокой магнитной индукцией оказывается существенно ниже, чем во всех известных кристаллических сплавах, эти материалы проявляют исключительно высокие механическую твердость и прочность при растяжении, в ряде случаев имеют близкий к нулю коэффициент теплового расширения, а удельное электросопротивление их в три-четыре раза выше его значения для железа и его сплавов. Некоторые из аморфных сплавов характеризуются высокой коррозионной стойкостью.

Методы получения аморфных металлов

Сверхвысокие скорости охлаждения жидкого металла для получения аморфной структуры можно реализовать различными способами. Общим в них является необходимость обеспечения скорости охлаждения не ниже 10⁶ К/с. Известны методы катапультирования капли на холодную пластину, распыление струи газом или жидкостью, центрифугирование капли или струи, расплавление тонкой пленки поверхности металла лазером с быстрым отводом тепла массой основного металла, сверхбыстрое охлаждение из газовой среды и др. Использование этих методов позволяет получать ленту различной ширины и толщины, проволоку и порошки.

Получение ленты. Наиболее эффективными способами промышленного производства аморфной ленты являются охлаждение струи жидкого металла на внешней (закалка на диске) или внутренней (центробежная закалка) поверхностях вращающихся барабанов или прокатка расплава между холодными валками, изготовленными из материалов с высокой теплопроводностью.

Расплав, полученный в индукционной печи, выдавливается нейтральным газом из сопла и затвердевает при соприкосновении с поверхностью вращающегося охлаждаемого тела (холодильника). Различие состоит том, что в методах центробежной закалки и закалки на диске расплав охлаждается только с одной стороны. Основной проблемой является получение достаточной степени чистоты внешней поверхности, которая не соприкасается с холодильником. Метод прокатки расплава позволяет получить хорошее качество обеих поверхностей ленты, что особенно важно для аморфных лент, используемых для головок магнитной записи.

Для каждого метода имеются свои ограничения по размерам лент, поскольку есть различия и в протекании процесса затвердевания, и в аппаратурном оформлении методов. Если при



Новые конструкционные материалы

центробежной закалке ширина ленты составляет до 5 мм, то прокаткой получают ленты шириной 10 мм и более. Метод закалки на диске, для которого требуется более простая аппаратура, позволяет в широких пределах изменять ширину ленты в зависимости от размеров плавильных тиглей. Данный метод позволяет изготавливать как узкие ленты шириной 0,1 – 0,2 мм, так и широкие – до 100 мм, причем точность поддержания ширины может быть ± 3 мкм. Разрабатываются установки с максимальной вместимостью тигля до 50 кг.

Волокно получается при протягивании расплава одновременно со стеклянной трубкой, при этом диаметр волокна составляет 2 – 5 мкм. Главная трудность здесь состоит в отделении волокна от покрывающего его стекла, что, естественно, ограничивает составы сплавов, аморфизируемых данным методом.

Получение порошков. Для производства порошков аморфных сплавов можно воспользоваться методами и оборудованием, применяемым для изготовления обычных металлических порошков.

Метод распыления вращающимся диском в принципе аналогичен ранее описанному методу изготовления тонкой проволоки, но здесь расплавленный металл, попадая в жидкость, разбрызгивается за счет ее турбулентного движения. С помощью этого метода получают порошок в виде гранул диаметром около 100 мкм.

Свойства аморфных сплавов

Маркировка аморфных сплавов

Для маркировки аморфных сплавов используется буквенно-числовая система обозначений. Элементы обозначаются буквами русского алфавита так же, как это предусмотрено для сталей. Числа перед буквенным обозначением элемента указывают его среднее содержание в сплаве. Содержание кремния и бора в марочном обозначении не указывается. Общее содержание этих элементов-аморфизаторов обычно составляет 20 – 25 % (ат.).

Химический состав аморфных сплавов обозначают также символами химических элементов с цифровыми индексами, которые указывают содержание данного элемента в % (ат.), например, Fe₈₁B₁₃Si₄C₂.

Сплавы, производимые в промышленных масштабах, в США называются Metglas, в Германии – Vitrovas, в Японии – Amomet. К этим названиям добавляется кодовое число.

Механические свойства сплавов

Аморфные сплавы являются высокопрочными мате-



риалами. Предел текучести аморфных сплавов Fe₄₀Ni₄₀P₁₄B₆, Fe₈₀B₂₀, Fe₆₀Cr₆Mo₆B₂₈ составляет соответственно 2400, 3600, 4500 МПа, в то время как предел текучести высокопрочных сталей обычно составляет не более 2500 МПа.

Для аморфных сплавов характерна четкая линейная связь между твердостью и прочностью. Для сплавов на основе Fe, Ni, Co справедливо выражение $\sigma = 0,00015 \cdot H^2 + 0,0000000001 \cdot H^3$, что позволяет с достаточной точностью использовать показания твердомера для определения прочностных характеристик.

Следует обратить особое внимание на то, что наряду с высокой прочностью аморфные сплавы характеризуются хорошей пластичностью при сжатии (до 50 %) и изгибе.

При комнатной температуре аморфные сплавы подвергаются холодной прокатке в тонкую фольгу. Лента аморфного сплава Ni₄₉Fe₂₉P₁₄B₆Al₂ толщиной 25 мкм без образования микротрещин может быть согнута вокруг острия бритвенного лезвия. Однако при растяжении их относительное удлинение составляет не более 1 – 2 %. Это объясняется тем, что пластическая деформация происходит в узко локализованных полосах сдвига (10 – 40 нм), а за пределами этих полос деформация практически не имеет развития, что и приводит к низким значениям макроскопической пластичности при растяжении.

Энергия разрушения и ударная вязкость аморфных сплавов также значительно превышает эти характеристики для обычных кристаллических сталей и сплавов. Характер излома свидетельствует о вязком разрушении металлических стекол.

Аморфные высокоуглеродистые стали, содержащие Cr, Mo, W, обладают высоким сопротивлением разрушению и термической стабильностью: например, Fe₅₄Cr₁₆Mo₁₂C₁₈ имеет предел прочности при растяжении 3800 МПа и температуру кристаллизации 880 К. При этом такие высокоуглеродистые сплавы имеют высокие коррозионные характеристики и не чувствительны к охрупчиванию при старении. Такие сплавы целесообразно использовать в высокопрочных композитах.

Таким образом, аморфные сплавы являются высокопрочным материалом с высокими упруго-пластическими характеристиками, имеющими очень малое деформационное упрочнение.

Свойства аморфных сплавов. Магнитные свойства

Сплавы на основе железа характеризуются высокой магнитной индукцией насыщения ($B_s = 1,5 - 1,6$ Тл) и низкими потерями на перемагничивание при обычных и повышенных

Высококобальтовые сплавы обладают магнито-



стрикцией, близкой к нулю. Основным достоинством этой группы АМС являются высокие магнитные свойства в полях с малой коэрцитивной силой, соответствующие уровню этих свойств в лучших пермаллоях.

Свойства аморфных сплавов. Коррозионные свойства аморфных сплавов

Аморфные сплавы на основе железа и никеля, содержащие хром, обладают необычайно высоким сопротивлением коррозии в самых различных коррозионно-агрессивных средах.

Аморфный сплав, не содержащий хрома, корродирует быстрее, чем кристаллическое железо, однако по мере увеличения содержания хрома скорость коррозии аморфного сплава резко снижается и при содержании 8 % (ат.) Cr и более не фиксируется микровесами после выдержки в течение 168 ч. Коррозионная стойкость сплавов с содержанием хрома выше 8 % (ат.) на несколько порядков превышает стойкость классических коррозионноустойчивых сталей.

Аморфные сплавы практически не подвержены питтинговой коррозии, даже в случае анодной поляризации в соляной кислоте.

Высокая стойкость против коррозии обусловлена образованием на по-верхности пассивирующих пленок, обладающих высокими защитными свойствами, высокой степенью однородности и быстрой образования. Помимо хрома повышению коррозионной стойкости способствует введение фосфора. В пленке высокохромистых кристаллических сталей всегда присутствуют микропоры, которые со временем преобразуются в очаги коррозии. На аморфных сплавах, содержащих определенное количество хрома и фосфора, пассивирующая пленка высокой степени однородности может образоваться даже в 1 н. НС1. Образование однородной пассивирующей пленки обеспечивается химической и структурной однородностью аморфной фазы, лишенной кристаллических дефектов, таких как выделения избыточной фазы, сегрегационные образования и границы зерен.

Сплав Fe45Cr25Mo10P13C7, пассивируясь даже в таком концентрированном растворе, как 12 н. раствор соляной кислоты при 60°C, вообще почти не корродирует. По своей коррозионной стойкости этот сплав превосходит даже металлический тантал.



Нанокристаллические сплавы

Нанокристаллические сплавы (НКС) представляют собой сплавы со смешанной аморфно-кристаллической структурой. Такая структура может состоять из кристаллов твердого раствора кремния в α -Fe размером 10 – 20 нм (нанокристаллы) и аморфной фазы, образующей тонкую (в несколько атомных слоев) оболочку вокруг этих кристаллитов.

Для нанокристаллических сплавов $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$, получивших за рубежом название Finimet, характерно сочетание высоких значений магнитной индукции $B_s > 1,2$ Тл с гистерезисными магнитными свойствами на уровне магнитомягких кристаллических и аморфных сплавов ($M_{нач} = 105$).

Нанокристаллы твердого раствора кремния в α -Fe содержат около 18 – 20 % (ат.) кремния, причем твердый раствор находится в частично упорядоченном состоянии. После оптимальной с точки зрения магнитных свойств термической обработки (отжиг при 530 – 550°C в течение 1 ч) объемная доля аморфной фазы составляет 20 – 40 %. Эта фаза обогащена Nb, Cu и B по сравнению с составом исходного аморфного сплава.

По сравнению с другими нанокристаллическими сплавами у сплава Finimet самые лучшие магнитные свойства, он производится и используется в промышленных масштабах. Отечественной промышленностью выпускается сплав 5БДСР примерно такого же химического состава.

В Японии НКС с высокими свойствами выпускаются в виде ленты толщиной до 40 мкм и шириной 0,5 – 100 мм и маркируются FT-I. Составы этих сплавов отвечают формуле $Fe(74,5-x)Cu_xNb_3Si_{13,5}B_9$.

НКС применяют в сердечниках силовых и измерительных трансформаторов тока промышленной и повышенной частот (50 – 100 кГц), импульсных высокочастотных трансформаторов, роторов электродвигателей, датчиках, переключателях и других устройствах, основными требованиями к которым являются большая индукция насыщения, малые потери на перемагничивание, высокие значения проницаемости.

Нанокристаллические материалы обладают высокой коррозионной стойкостью. Опыты показали, что обычные углеродистые стали в наноструктурном состоянии обладают более высокими антикоррозионными свойствами, чем специальные нержавеющие стали. Наноструктурный нитинол демонстрирует исключительную сверхупругость и эффект памяти формы. Свойства магнито-твердых и магнитомягких материалов значительно пре-



Новые конструкционные материалы

вышают характеристики аналогов в обычной кристаллической форме.

Особый интерес представляют механические свойства объемных наноструктурных материалов. Уменьшение размера зерна металла с 10 мкм до 10 нм дает повышение прочности примерно в 30 раз. Кроме того, возможно появление низкотемпературной и высокоскоростной сверхпластичности.

Основные области применения аморфных металлических материалов

Аморфные элинвары используют для изготовления сейсмодатчиков, мембран манометров, датчиков скорости, ускорения и крутящего момента; пружин часовых механизмов, весов, индикаторов часового типа и других прецизионных пружинных устройств. В ФРГ разработан сплав марки Vitrovac-0080, содержащий 78 % никеля, бор и кремний. Сплав имеет прочность при растяжении = 2000 МПа, модуль Юнга $1,5 \cdot 10^5$ МПа, плотность 8 г/см³, электросопротивление 0,9 Ом•мм²/м, предел выносливости при изгибе около 800 МПа на базе 10⁷ циклов. Сплав рекомендуется для изготовления пружин, мембран и контактов.

Аморфные материалы используют для армирования трубок высокого давления, изготовления металлокорда шин и др. В перспективе возможно применение аморфных сплавов для изготовления маховиков. Такие маховики могут использоваться для аккумулирования энергии и покрытия пиковых нагрузок на электростанциях, для улучшения рабочих характеристик автомобилей и т. д.

АМС на основе железа применяются как материалы для сердечников высокочастотных трансформаторов различного назначения, дросселей, магнитных усилителей. Это обусловлено низкими суммарными потерями, которые в лучших АМС данного класса оказываются на порядок ниже, чем у кремнистых электро-технических сталей.

Сплавы Fe – Si – В с высоким магнитным насыщением были предложены для замены обычного кристаллического сплава Fe – Si в сердечниках трансформаторов, а также сплавов Ni – Fe с высокой магнитной проницаемостью. Отсутствие магнитокристаллической анизотропии в сочетании с довольно высоким электросопротивлением снижает потери на вихревые токи, в особенности на высоких частотах. Потери в сердечниках из разработанного в Японии аморфного сплава Fe₈₁B₁₃Si₄C₂ составляют 0,06 Вт/кг, т. е. примерно в двадцать раз ниже, чем потери в текстурованных листах трансформаторной ста-



Новые конструкционные материалы

гистерезисных потерь энергии при использовании сплава Fe83B15Si2 вместо трансформаторных сталей составит только в США 300 млн. долл/год. Эта область применения металлических стекол имеет широкую перспективу.

Помимо чрезвычайно высокой начальной магнитной проницаемости, особенно на высоких частотах (10 кГц), а также нулевой магнитострикции металлические стекла на основе кобальта имеют высокую твердость и хорошие коррозионные характеристики, поэтому они находят применение в качестве материалов для магнитных записывающих головок. Высокие характеристики и широкое применение нашел разработанный в Японии сплав Fe5Co70Si10B15. Методом закалки в валках производят ленту толщиной 50 мкм и шириной 15 мм с прекрасным качеством обеих поверхностей (шероховатость ± 3 мкм). Вследствие высокой плотности магнитного потока и высокой износостойкости записывающие головки, изготовленные из такой ленты, имеют лучшие общие характеристики, чем ферритные головки, а также головки из пермаллоев. Эти материалы находят применение в звуко-, видео-, компьютерном и другом записывающем оборудовании.

Ленты из аморфных кобальтовых сплавов применяют в сердечниках малогабаритных высокочастотных трансформаторов различного назначения, в частности для источников вторичного питания и магнитных усилителей. Их используют в детекторах утечки тока, системах телекоммуникаций и в качестве датчиков (в том числе типа феррозондовых), для магнитных экранов и температурночувствительных датчиков, а также высокочувствительных магнитных преобразователей. Высокая прочность в сочетании с коррозионной стойкостью позволяют использовать аморфные сплавы для изготовления кабелей, работающих в контакте с морской водой, а также изделий, условия эксплуатации которых связаны с воздействием агрессивных сред.

Сочетание высокой прочности, коррозионной стойкости и износостойкости, а также магнитомягких свойств обуславливает возможность и других областей применения. Например, возможно использование таких стекол в качестве индукторов в устройствах магнитной сепарации. Изделия, сплетенные из ленты, использовали в качестве магнитных экранов. Преимущество этих материалов в том, что их можно разрезать и изгибать для получения необходимой формы, не снижая при этом их магнитных характеристик.

Поскольку стекла представляют собой сильно переохлажденную жидкость, их кристаллизация при нагреве



обычно происходит с сильным зародышеобразованием, что позволяет получать однородный чрезвычайно мелкозернистый металл. Такая кристаллическая фаза не может быть получена обычными методами обработки. Это открывает возможность получения специальных припоев в виде тонкой ленты. Такая лента легко изгибается, ее можно резать и подвергать штамповке для получения оптимальной конфигурации. Весьма важным для пайки является то, что лента гомогенна по составу и обеспечивает надежный контакт во всех точках изделий, подвергаемых пайке. Припои имеют высокую коррозионную стойкость. Они используются в авиационной и космической технике.

В перспективе возможно получение сверхпроводящих кабелей путем кристаллизации исходной аморфной фазы.

Известно также применение аморфных сплавов в качестве катализаторов химических реакций. Например, аморфный сплав Pd – Rh оказался катализатором для реакции разложения NaCl на NaOH и C12, а сплавы на основе железа обеспечивают больший выход (около 80 %) по сравнению с порошком железа (около 15 %) в реакции синтеза

$4\text{H}_2 + 2\text{CO} = \text{C}_2\text{H}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ Аморфные металлы часто называют материалами будущего, что обусловлено уникальностью их свойств, не встречающихся у обычных кристаллических металлов.

Широкому распространению аморфных металлов препятствуют высокая себестоимость, сравнительно низкая термическая устойчивость, а также малые размеры получаемых лент, проволоки, гранул. Кроме того, применение аморфных сплавов в конструкциях ограничено из-за их низкой свариваемости.



ТЕМА 9

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Общая характеристика и классификация

Композиционным материалом (КМ) или композитом называют объемную гетерогенную систему, состоящую из сильно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых компонентов, строение которой позволяет использовать преимущества каждого из них.

КМ позволяют иметь заданное сочетание разнородных свойств: высокой удельной прочности и жесткости, жаропрочности, износостойкости, теплозащитных свойств и др. Спектр свойств КМ невозможно получить при использовании обычных материалов. Их применение дает возможность создавать ранее недоступные принципиально новые конструкции.

Важными характеристиками композиционных материалов являются удельная прочность и удельная жесткость, где σ – временное сопротивление, E – модуль нормальной упругости, ρ – плотность материала, g – ускорение свободного падения. По удельной прочности и жесткости композиционные материалы превосходят все известные конструкционные сплавы

КМ состоят из сравнительно пластичного матричного материала-основы и более твердых и прочных компонентов, являющихся наполнителями. Свойства КМ зависят от свойств основы, наполнителей и прочности связи между ними.

Матрица связывает композицию в монолит, придает ей форму и служит для передачи внешних нагрузок арматуре из наполнителей. В зависимости от материала основы различают КМ с металлической матрицей, или металлические композиционные материалы (МКМ), с полимерной – полимерные композиционные материалы (ПКМ) и с керамической – керамические композиционные материалы (ККМ).

Ведущую роль в упрочнении КМ играют наполнители, часто называемые упрочнителями. Они имеют высокую прочность, твердость и модуль упругости. По типу упрочняющих наполнителей КМ подразделяют на дисперсноупрочненные,

В дисперсноупрочненные КМ искусственно вводят мелкие равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и др., не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояние между



ними, тем прочнее КМ. В отличие от волокнистых, в дисперсно-упрочненных КМ основным несущим элементом является матрица. Дисперсные частицы наполнителя упрочняют материал за счет сопротивления движению дислокаций при натружении, что затрудняет пластическую деформацию. Эффективное сопротивление движению дислокации создается вплоть до температуры плавления матрицы, благодаря чему дисперсноупрочненные КМ отличаются высокой жаропрочностью и сопротивлением ползучести.

Арматурой в волокнистых КМ могут быть волокна различной формы: нити, ленты, сетки разного плетения. Армирование волокнистых КМ может осуществляться по одноосной, двухосной и трехосной схеме

Прочность и жесткость таких материалов определяется свойствами армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку. Армирование дает больший прирост прочности, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо.

Слоистые композиционные набираются из чередующихся слоев наполнителя и матричного материала (типа «сэндвич»). Слои наполнителя в таких КМ могут иметь различную ориентацию. Возможно поочередное использование слоев наполнителя из разных материалов с разными механическими свойствами. Для слоистых композиций обычно используют неметаллические материалы.

Дисперсноупрочненные композиционные материалы

При дисперсном упрочнении частицы блокируют процессы скольжения в матрице. Эффективность упрочнения при условии минимального взаимодействия с матрицей зависит от вида частиц, их объемной концентрации, а также от равномерности распределения в матрице. Применяют дисперсные частицы тугоплавких фаз типа Al_2O_3 , SiO_2 , BN , SiC , имеющие малую плотность и высокий модуль упругости. КМ обычно получают методом порошковой металлургии, важным преимуществом которого является изотропность свойств в различных направлениях.

В промышленности обычно применяют дисперсноупрочненные КМ на алюминиевой и реже на никелевой основах. Характерными представителями этого вида композиционных материалов являются материалы типа САП (спеченная алюминиевая пудра), которые состоят из алюминиевой матрицы, упрочненной дисперсными частицами оксида алюминия. Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера около 1



мкм в присутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче и в ней повышается содержание оксида алюминия. Дальнейшая технология производства изделий и полуфабрикатов из САП включает холодное прессование, предварительное спекание, горячее прессование, прокатку или выдавливание спеченной алюминиевой заготовки в форме готовых изделий, которые можно подвергать дополнительной термической обработке.

Сплавы типа САП удовлетворительно деформируются в горячем состоянии, а сплавы с 6 – 9 % Al_2O_3 – и при комнатной температуре. Из них холодным волочением можно получить фольгу толщиной до 0,03 мм. Эти материалы хорошо обрабатываются резанием и обладают высокой коррозионной стойкостью.

Марки САП, применяемые в странах СНГ, содержат 6 – 23 % Al_2O_3 . Различают САП-1 с содержанием 6 – 9, САП-2 с 9 – 13, САП-3 с 13 – 18 % Al_2O_3 . С увеличением объемной концентрации оксида алюминия возрастает прочность композиционных материалов. При комнатной температуре характеристики прочности САП-1 следующие: $\sigma = 280$ МПа, $\sigma_{0,2} = 220$ МПа. САП-3 при той же температуре имеет $\sigma = 420$ МПа, $\sigma_{0,2} = 340$ МПа.

Материалы типа САП обладают высокой жаропрочностью и превосходят все деформируемые алюминиевые сплавы. Даже при температуре 500°C они имеют не менее 60 – 110 МПа. Жаропрочность объясняется тормозящим действием дисперсных частиц на процесс рекристаллизации. Характеристики прочности сплавов типа САП весьма стабильны. Испытания длительной прочности сплавов типа САП-3 в течение 2 лет практически не повлияли на уровень свойств как при комнатной температуре, так и при нагреве до 500°C. При 400°C прочность САП в 5 раз выше прочности стареющих алюминиевых сплавов.

Сплавы типа САП применяют в авиационной технике для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, работающих при температурах до 300 – 500°C. Из них изготавливают штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки тепловыделяющих элементов и трубы теплообменников. Принято считать, что упрочнение дисперсными частицами или дисперсионное упрочнение имеет наибольшее значение для цветных металлов, в частности для дуралюминов, сплавов на основе кобальта, никеля, меди. Однако в последние годы разработаны новые сплавы на основе железа, прочность которых в значительной мере определяется дисперсионным твердением. Широкое применение нашли микро-



ные стали и мартенситно-стареющие стали. Микролегированные конструкционные стали содержат небольшие количества Ti, V, Zr, Nb, которые образуют с углеродом и азотом твердые дисперсные частицы карбонитридов. Растворенный в железе алюминий образует с азотом твердые частицы AlN.

Состав мартенситно-стареющих сталей подобран таким образом, что при старении в безуглеродистой мартенситной матрице образуются твердые интерметаллидные соединения типа Ni₃Ti, FeAl и др., способствующие упрочнению.

Частицы дисперсной фазы действуют как препятствия движению дислокаций в кристаллической решетке. Различают два вида выделений. К первому относятся мелкодисперсные выделения, сохраняющие связь с матрицей (когерентные или частично когерентные частицы), которые перерезаются дислокациями (перерезаемые частицы). Для движения дислокаций в этом случае требуется дополнительное усилие, необходимое для прохода сквозь области с разной энергией дефектов упаковки.

Потеря когерентности и идеального сопряжения решеток матрицы и выделения приводит к изменению характера движения дислокаций. Некогерентные выделения образуются на более поздних стадиях распада твердого раствора, они обычно крупнее когерентных и характеризуются большей жесткостью и большими расстояниями между собой, значительно превышающими их диаметр. Дислокации под действием приложенного напряжения выгибаются между частицами и проходят дальше, оставляя кольца дислокаций вокруг частиц.

Наибольшее упрочнение при сохранении вязкости, пластичности и конструктивной прочности достигается при условии достаточно высокой дисперсности частиц и их некогерентности с матрицей. Обычно модуль сдвига частиц более чем в 2 раза больше модуля сдвига матрицы. Дислокации не перерезают и не деформируют частицы, а огибают некогерентные выделения с увеличением уровня напряжения. Чем меньше расстояние между дисперсными частицами, тем выше упрочнение.

Механизм упрочнения феррито-перлитых сталей также обусловлен тем, что деформация начинается в феррите, а перлитные колонии препятствуют движению дислокаций. Чем больше перлитной составляющей, чем выше ее дисперсность и меньше расстояние между отдельными пластинками цементита, тем выше степень упрочнения. Однако, увеличивая прочность, перлит резко отрицательно влияет на ударную вязкость и повышает температуру вязко-хрупкого пере-



Новые конструкционные материалы

Волокнистые композиционные материалы

Помимо обеспечения прочности и монолитности конструкции матрица должна иметь необходимую пластичность и быть работоспособной в той температурной области, для которой предназначен КМ.

Для изготовления КМ, применяемых при температурах ниже 200°C, используют полимерные матрицы. К таким композициям относятся стеклопластики, армированные короткими стеклянными волокнами в матрице из полиэфирной смолы. Стеклопластики применяют для изготовления корпусов автомобилей, лодок, некоторых бытовых приборов. В качестве матриц также используют термореактивные полимеры, в которых поперечные связи между основными цепями формируют жесткую структуру с трехмерной сеткой. Такими полимерами являются эпоксидные смолы, которые благодаря поперечным связям имеют более высокую термостойкость.

Для работы при более высоких температурах применяют металлические матрицы. Обычно используют металлы с малой плотностью: алюминий, реже – магний, титан.

Металлические КМ обладают рядом преимуществ перед полимерными. Помимо более высокой рабочей температуры, они характеризуются лучшей изотропией и большей стабильностью свойств в процессе эксплуатации, более высокой эрозийной стойкостью.

Пластичность металлических матриц сообщает конструкции необходимую вязкость. Это способствует быстрому выравниванию локальных механических нагрузок. Высокая теплопроводность металлических КМ предохраняет от локальных перегревов, что особенно важно для таких изделий, как наконечники ракет и ведущие кромки крыльев.

Высокая электропроводность металлических КМ хорошо защищает их от электромагнитного излучения, молнии, снижает опасность статического электричества. Важным преимуществом металлических КМ является более высокая технологичность процесса изготовления, формовки, термообработки, формирования соединений и покрытий.

Для наиболее высоких рабочих температур в качестве матричного материала применяют керамику. Ее основной недостаток – отсутствие пластичности – в некоторой степени компенсируется армирующими волокнами, тормозящими распространение трещин в керамике.

Использование в качестве матричного материала



Новые конструкционные материалы

аморфного углерода, а в качестве армирующего материала – волокон из кристаллического углерода (графита) позволило создать композит, выдерживающий нагрев до 2500°C. Такой углерод-углеродный композит перспективен для космонавтики и заатмосферной авиации. Толчком к интенсивному использованию углерод-углеродных композитов в США послужили работы по программе создания космических кораблей многоразового использования. Недостаток углеродной матрицы состоит в возможном окислении и абляции (Абляция (лат. ablation – отнятие) – унос вещества с поверхности твердого тела потоком горячего газа (путем эрозии, оплавления, сублимации)). Для предотвращения этих явлений композит покрывают тонким слоем карбида кремния.

Таким образом, наиболее важным критерием выбора матричного материала является рабочая температура эксплуатации композита.

Помимо высокой прочности и жесткости, основными требованиями, предъявляемыми к волокнам для КМ, является хорошее смачивание материала волокна расплавленной матрицей в процессе изготовления композита. Важными условиями являются слабое взаимодействие волокна с материалом матрицы и его высокая окислительная стойкость.

Для армирования металлических КМ обычно используют непрерывные волокна: углеродные (УВ), борные (В), оксида алюминия (Al₂O₃), карбида кремния (SiC), карбида бора (B₄C), нитрида бора (BN), диборида титана (TiB₂), оксида кремния (SiO₂). В качестве волокон применяют также металлическую тонкую проволоку, полученную методом волочения из стали, вольфрама, титана, молибдена и бериллия. Реже используют нитевидные специально выращенные кристаллы разных материалов.

Наибольшее распространение для армирования металлических КМ получили непрерывные или дискретные углеродные и борные волокна

Волокна бора обычно получают осаждением бора из газовой фазы при диссоциации его галоидных соединений, например треххлористого бора BC₁₃. Бор осаждается на основу из тонкой (12 мкм) вольфрамовой нити, нагретой до 1100 – 1200°C. В процессе осаждения бор диффундирует в вольфрамовую основу, образуя бориды вольфрама в сердцевине волокна. Время пребывания волокна в реакционной камере составляет 1 – 2 мин. Общий диаметр борного волокна составляет 100 – 150 мкм.

Сырьем для получения высокопрочных и высокомодульных углеродных волокон являются такие полимеры с высо-



Новые конструкционные материалы

ким содержанием углерода, как полиакрилонитрил (ПАН), и реже – пек и вискоза. ПАН-волокно выдавливают через малые отверстия и подвергают пиролизу в инертной атмосфере при температуре около 2000°C. Углеродные волокна выпускают в виде нитей, содержащих до 10000 элементарных волокон, диаметр которых составляет около 7 мкм. Модуль и прочность волокна не изменяется при нагреве его до 600°C.

Для многих видов волокон разработаны технологические процессы нанесения покрытий для обеспечения лучшей смачиваемости, окислительной стойкости и оптимального взаимодействия волокна с матрицей. Борные волокна защищают от реагирования с расплавами титана и алюминия созданием на поверхности диффузионного барьера из карбидов кремния или бора. Волокна бора, защищенные карбидом кремния, называют borsic (борсик). Из-за высокой окислительной способности углеродных волокон на их поверхность наносят специальные покрытия, а процессы переработки осуществляют в защитной атмосфере. Углеродные волокна имеют отрицательное значение температурного коэффициента линейного расширения, благодаря чему появляется возможность при соответствующей укладке волокон получать температурный коэффициент линейного расширения близкий к нулю.

Волокна карбида кремния получают методом химического осаждения из паровой фазы на подложку из борного или углеродного волокна. Эти волокна имеют хорошую теплостойкость, стойкость к окислению и мало реагируют с металлом.

Слоистые композиты

Материалом основы композитов со слоистым строением являются пластмасса, металл или керамика. В качестве наполнителей применяются полимерные волокна, ленты из тканей, трикотажа и других материалов. Хорошо известные ламинаты изготовлены из смол, армированных полимерными волокнами или стеклотканью.

К этой же группе композитов относятся абляционные материалы для тепловой защиты ракет, изготовленные на базе фенолоформальдегидных смол с углеродным или стекловолокном. В этих материалах часто используется стеклоткань, которая при многослойном нанесении обеспечивает высокие механические свойства изделий, например тонкостенных труб, втулок и др.

Встречаются композиты, в которых слоистым связующим являются алюминиевые, титановые, медные, никелевые и кобальтовые листы и фольга, а слоями, определяющими специальные свойства и применение, – керамика, интерметаллидные



соединения или другие металлы.

Слоистые керамические композиты используют в экстремальных условиях. Компонентами этого типа композиционных материалов чаще всего являются керамика, углерод и металлы, например корунд, пиролитический графит, карбиды, оксиды, нитриды в композиции с алюминием, медью, титаном, никелем, кобальтом, танталом, железом. Такие материалы нашли применение в космических аппаратах для изготовления теплоизоляционных силикатных плиток из корунда, боросиликата, углеродных карборундовых ламинатов.

Свойства и применение композиционных материалов

Хорошая совместимость матрицы с армирующим элементом, высокие прочностные свойства борного волокна и удовлетворительная пластичность материала матрицы определяют высокие удельные значения прочности и жесткости металлического КМ (отношение временного сопротивления и модуля упругости к плотности) в сочетании с хорошей технологичностью и конструкционной надежностью изделий из этого материала.

Для создания металлических КМ с еще более малой плотностью применяется магний. Композиционные материалы на основе магния на 30 % легче, чем сплавы алюминия. У металлических КМ на основе магния хорошие удельные свойства, стабильный температурный коэффициент линейного расширения в широком диапазоне температур, что достигается за счет комбинаций свойств матрицы и волокна и может регулироваться в зависимости от конкретных условий использования. Магний – один из легких металлов, для которого не возникает проблем взаимодействия с углеродными, борными волокнами и волокнами из карбида кремния. Перспективная система углеродные волокна-магний обладает самыми высокими удельными характеристиками: $E_{уд} = 23,5 \cdot 10^3 \text{ км}$, $\rho = 115 \text{ км}$.

Системы углеродные волокна-алюминий и углеродные волокна-магний перспективны для использования в авиационной технике, а также в космосе, благодаря высоким значениям удельной прочности и жесткости, малому температурному коэффициенту линейного расширения и сравнительно высокой теплопроводности.

Металлы с высокой пластичностью и прочностью хорошо совмещаются с высокопрочными и жесткими волокнами с низкой плотностью и пластичностью, образуя КМ с повышенной жесткостью и малой массой. Примером такой комбинации может быть титан, армированный волокнами бора или карбида кремния.



Новые конструкционные материалы

Однако такие системы имеют пониженную усталостную прочность из-за остаточных напряжений и химического взаимодействия между волокнами и матрицей при высоких температурах изготовления. Кроме того, механическая обработка КМ на основе титановой матрицы представляет большие трудности. Недостатком этого вида КМ является также высокая реакционная способность титановой матрицы.

Прочность и модуль упругости, а также сопротивление материалов удару для однонаправленных композиционных материалов на основе алюминия, магния и титана повышаются по мере увеличения в композиции объемного содержания волокон.

Для очень высоких температур, например в камерах сгорания реактивных двигателей, используются системы, содержащие молибденовую и вольфрамовую проволоку в матрицах из титана и суперсплавов. Наибольшей прочностью при температуре 1093°C обладает проволока из сплава $W - Re - Hf - C = 2,2$ ГПа, что в 6 раз больше прочности никелевых или кобальтовых суперсплавов при такой же температуре.

Большие перспективы открываются с развитием процессов объемного армирования металлических КМ. В частности, для металлических КМ объемное армирование дает существенный выигрыш в ударной вязкости. Система Al_2O_3/Al трехмерного армирования поглощает почти такую же энергию удара, как и чистый металл. Армирование по толщине, обеспечиваемое трехмерной волокнистой структурой, предотвращает расслоение и ограничивает распространение трещин.

К недостаткам металлических КМ относится их сравнительно высокая стоимость и сложность изготовления, однако, уникальные свойства этих материалов делают их незаменимыми в ряде конструкций.

В авиации и ракетно-космической технике наиболее широко используют КМ с борными волокнами. Детали из боропластика и бороалюминия применяют такие крупные фирмы США, как «Локхид», «Боинг», «Дженерал Дайнемикс». Из них изготавливают горизонтальные и вертикальные стабилизаторы, рули, элементы хвостового оперения лонжероны, лопасти винтов, обшивку крыльев и др. Детали из бороалюминия по сравнению с титановыми сплавами дают снижение массы на 30 – 40 %, обеспечивая более высокую длительную и усталостную прочность при нагреве до 500°C.

Еще более эффективно применение бороалюминия в ракетно-космической технике. Его использование для изго-



Новые конструкционные материалы

товления крупных деталей для ракет «Атлас», космических кораблей «Аполлон», «Шаттл» позволило уменьшить их массу на 20 – 50 %. Это, в свою очередь, увеличило полезную нагрузку, а для военных самолетов – дальность полета, объем вооружения и т. д.

Фирма «Toyota» (Япония) изготовила металлические КМ для деталей автомобилестроения. Алюминий армировали смесью коротких волокон Al_2O_3 и SiO_2 (диаметр около 3 мкм и длина до 10 мкм) в различных соотношениях. С увеличением массовой доли волокон Al_2O_3 возрастает прочность и модуль упругости, при росте доли волокон SiO_2 повышается износостойкость. Этот материал использовали вместо никелевых сплавов для изготовления накладок поршней, что позволило поднять температуру в камере сгорания двигателя и его мощность. За счет увеличения износостойкости поршней пробег автомобиля увеличен до 300 тыс. км.

Керамическая технология и классификация керамики

Керамика является третьим наиболее широко используемым промышленностью материалом после металлов и полимеров. Она является наиболее конкурентоспособным по сравнению с металлами классом материалов для использования при высоких температурах. Большие перспективы открывает использование транспортных двигателей с деталями из керамики, керамических материалов для обработки резанием и оптической керамики для передачи информации. Это позволит снизить расход дорогих и дефицитных металлов: титана и тантала в конденсаторах, вольфрама и кобальта в режущих инструментах, кобальта, хрома и никеля в тепловых двигателях.

Основными разработчиками и производителями керамических материалов являются США и Япония.

Керамическая технология предусматривает следующие основные этапы: получение исходных порошков, консолидацию порошков, т. е. изготовление компактных материалов, их обработку и контроль изделий.

При производстве высококачественной керамики с высокой однородностью структуры используют порошки исходных материалов с размером частиц до 1 мкм. Измельчение производится механическим путем с помощью мелющих тел, а также путем распыления измельчаемого материала в жидком состоянии, осаждением на холодных поверхностях из парогазовой фазы, виброкавитационным воздействием на частицы, находящиеся в жидкости, с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и другими методами. Для сверхтонкого помола (частицы



менее 1 мкм) наиболее перспективны вибрационные мельницы, или аттриторы.

Консолидация керамических материалов состоит из процессов формования и спекания. Различают следующие основные группы методов формования:

Прессование под действием сжимающего давления, при котором происходит уплотнение порошка за счет уменьшения пористости;

Пластичное формование выдавливанием прутков и труб через мундштук (экструзия) формовочных масс с пластификаторами, увеличивающими их текучесть;

Шликерное литье для изготовления тонкостенных изделий любой сложной формы, в котором для формования используют жидкие суспензии порошков.

При переходе от прессования к пластичному формованию и шликерному литью увеличиваются возможности изготовления изделий сложной формы, однако усложняется процесс сушки изделий и удаления пластификаторов из керамического материала. Поэтому для изготовления изделий сравнительно простой формы предпочтение отдается прессованию, а более сложной – экструзии и шликерному литью.

При спекании отдельные частицы порошков превращаются в монолит и формируются окончательные свойства керамики. Процесс спекания сопровождается уменьшением пористости и усадкой.

Применяют печи для спекания при атмосферном давлении, установки горячего изостатического прессования (газостаты), прессы горячего прессования с усилием прессования до 1500 кН. Температура спекания в зависимости от состава может составлять до 2000 – 2200°C.

Часто применяются совмещенные методы консолидации, сочетающие формование со спеканием, а в некоторых случаях – синтез образующегося соединения с одновременным формованием и спеканием.

Обработка керамики и контроль являются основными составляющими в балансе стоимости керамических изделий. По некоторым данным, стоимость исходных материалов и консолидации составляет всего лишь 11 % (для металлов 43 %), в то время как на обработку приходится 38 % (для металлов 43 %), а на контроль 51 % (для металлов 14 %). К основным методам обработки керамики относятся термообработка и размерная обработка поверхности. Термообработка керамики производится с це-



Новые конструкционные материалы

лью кристаллизации межзеренной стеклофазы. При этом на 20 – 30 % повышаются твердость и вязкость разрушения материала.

Большинство керамических материалов с трудом поддается механической обработке. Поэтому основным условием керамической технологии является получение при консолидации практически готовых изделий. Для доводки поверхностей керамических изделий применяют абразивную обработку алмазными кругами, электрохимическую, ультразвуковую и лазерную обработку. Эффективно применение защитных покрытий, позволяющих залечить мельчайшие поверхностные дефекты – неровности, риски и т. д.

Для контроля керамических деталей чаще всего используют рентгеновскую и ультразвуковую дефектоскопию.

Прочность химических межатомных связей, благодаря которой керамические материалы обладают высокой твердостью, химической и термической стойкостью, одновременно обуславливает их низкую способность к пластической деформации и склонность к хрупкому разрушению. Большинство керамических материалов имеет низкую вязкость и пластичность и соответственно низкую трещиностойкость. Вязкость разрушения кристаллической керамики составляет около 1 – 2 МПа/м^{1/2}, в то время как для металлов она составляет более 40 МПа/м^{1/2}.

Возможны два подхода к повышению вязкости разрушения керамических материалов. Один из них традиционный, связанный с совершенствованием способов измельчения и очистки порошков, их уплотнения и спекания. Второй подход состоит в торможении роста трещин под нагрузкой. Существует несколько способов решения этой проблемы. Один из них основан на том, что в некоторых керамических материалах, например в диоксиде циркония ZrO₂, под давлением происходит перестройка кристаллической структуры. Исходная тетрагональная структура ZrO₂ переходит в моноклинную, имеющую на 3 – 5 % больший объем.

Третий способ состоит в том, что с помощью специальных технологий весь керамический материал пронизывают микротрещинами. При встрече основной трещины с микротрещиной угол в острие трещины возрастает, происходит затупление трещины и она дальше не распространяется.

Определенный интерес представляет физико-химический способ повышения надежности керамики. Он реализован для одного из наиболее перспективных керамических материалов на основе нитрида кремния Si₃N₄. Способ основан на образовании определенного стехиометриче-



ров оксидов металлов в нитриде кремния, получивших название сиалонов. Примером высокопрочной керамики, образующейся в этой системе, являются сиалоны состава $\text{Si}_3\text{-xAl}_x\text{N}_4\text{-xO}_x$, где x – число замещенных атомов кремния и азота в нитриде кремния, составляющее от 0 до 2,1. Важным свойством сиалоновой керамики является стойкость к окислению при высоких температурах, значительно более высокая, чем у нитрида кремния.

Свойства и применение керамических материалов

Принципиальными недостатками керамики являются ее хрупкость и сложность обработки. Керамические материалы плохо работают в условиях механических или термических ударов, а также при циклических условиях нагружения. Им свойственна высокая чувствительность к надрезам. В то же время керамические материалы обладают высокой жаропрочностью, превосходной коррозионной стойкостью и малой теплопроводностью, что позволяет с успехом использовать их в качестве элементов тепловой защиты.

При температурах выше 1000°C керамика прочнее любых сплавов, в том числе и суперсплавов, а ее сопротивление ползучести и жаропрочность выше.

К основным областям применения керамических материалов относятся режущий инструмент, детали двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей и др.

Режущий керамический инструмент. Режущая керамика характеризуется высокой твердостью, в том числе при нагреве, износостойкостью, химической инертностью к большинству металлов в процессе резания. По комплексу этих свойств керамика существенно превосходит традиционные режущие материалы – быстрорежущие стали и твердые сплавы

Для изготовления режущего инструмента широко применяется керамика на основе оксида алюминия с добавками диоксида циркония, карбидов и нитридов титана, а также на основе бескислородных соединений – нитрида бора с кубической решеткой ($-\text{BN}$), обычно называемого кубическим нитридом бора, и нитрида кремния Si_3N_4 . Режущие элементы на основе кубического нитрида бора в зависимости от технологии получения, выпускаемые под названиями эльбор, боразон, композит 09 и др., имеют твердость, близкую к твердости алмазного инструмента, и сохраняют устойчивость к нагреву на воздухе до $1300 - 1400^\circ\text{C}$. В отличие от алмазного инструмента кубический нитрид бора химически инертен по отношению к сплавам на основе железа. Его можно использовать для черного и чистового точения закаленных



сталей и чугунов практически любой твердости.

Режущие керамические пластины используются для оснащения различных фрез, токарных резцов, расточных головок, специального инструмента.

Керамические двигатели. Из второго закона термодинамики следует, что для повышения КПД любого термодинамического процесса необходимо повышать температуру на входе в энергетическое преобразовательное устройство: $\text{КПД} = 1 - T_2/T_1$, где T_1 и T_2 – температуры на входе и выходе энергетического преобразовательного устройства соответственно. Чем выше температура T_1 тем больше КПД. Однако максимально допустимые температуры определяются теплостойкостью материала. Конструкционная керамика допускает применение более высоких температур по сравнению с металлом и поэтому является перспективным материалом для двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей. Помимо более высокого КПД двигателей за счет повышения рабочей температуры преимуществом керамики является низкая плотность и теплопроводность, повышенная термо- и износостойкость. Кроме того, при ее использовании снижаются или отпадают расходы на систему охлаждения.

Вместе с тем следует отметить, что в технологии изготовления керамических двигателей остается ряд нерешенных проблем. К ним прежде всего относятся проблемы обеспечения надежности, стойкости к термическим ударам, разработки методов соединения керамических деталей с металлическими и пластмассовыми. Наиболее эффективно применение керамики для изготовления дизельных адиабатных поршневых двигателей, имеющих керамическую изоляцию, и высокотемпературных газотурбинных двигателей.

Конструкционные материалы адиабатных двигателей должны быть устойчивы в области рабочих температур 1300 – 1500 К, иметь прочность при изгибе не менее 800 МПа и коэффициент интенсивности напряжений не менее $8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяет керамика на основе диоксида циркония ZrO_2 и нитрида кремния. Наиболее широко работы по керамическим двигателям проводятся в Японии и США. Японская фирма «Isuzu Motors Ltd» освоила изготовление форкамеры и клапанного механизма адиабатного двигателя, «Nissan Motors Ltd» – крыльчатки турбокомпрессора, фирма «Mazda Motors Ltd» – форкамеры и пальца толкателя.

Компания «Cammin Engine» (США) освоила альтернативный вариант двигателя грузо-



Новые конструкционные материалы

ями из ZrO_2 , нанесенными на днище поршня, внутреннюю поверхность цилиндра, впускные и выпускные каналы. Экономия топлива на 100 км пути составила более 30 %.

Фирма «Isuzu» (Япония) сообщила об успешной разработке керамического двигателя, работающего на бензине и дизельном топливе. Двигатель развивает скорость до 150 км/ч, коэффициент полноты сгорания топлива на 30 – 50% выше, чем у обычных двигателей, а масса на 30 % меньше.

Конструкционной керамике для газотурбинных двигателей в отличие от адиабатного двигателя не требуется низкая теплопроводность. Учитывая, что керамические детали газотурбинных двигателей работают при более высоких температурах, они должны сохранять прочность на уровне 600 МПа при температурах до 1470 – 1670 К (в перспективе до 1770 – 1920 К) при пластической деформации не более 1 % за 500 ч работы. В качестве материала для таких ответственных деталей газотурбинных двигателей, как камера сгорания, детали клапанов, ротор турбокомпрессора, статор, используют нитриды и карбиды кремния, имеющие высокую теплостойкость.

Повышение тактико-технических характеристик авиационных двигателей невозможно без применения керамических материалов.

Керамика специального назначения. К керамике специального назначения относятся сверхпроводящая керамика, керамика для изготовления контейнеров с радиоактивными отходами, броневой защиты военной техники и тепловой защиты головных частей ракет и космических кораблей.

Контейнеры для хранения радиоактивных отходов. Одним из сдерживающих факторов развития ядерной энергетики является сложность захоронения радиоактивных отходов. Для изготовления контейнеров применяют керамику на основе оксида B_2O_3 и карбида бора B_4C в смеси с оксидом свинца PbO или соединениями типа $2PbO \cdot PbSO_4$. После спекания такие смеси образуют плотную керамику с малой пористостью. Она характеризуется сильной поглощающей способностью по отношению к ядерным частицам – нейтронам и -квантам.

Ударопрочная броневая керамика. По своей природе керамические материалы являются хрупкими. Однако при высокой скорости нагружения, например в случае взрывного удара, когда эта скорость превышает скорость движения дислокаций в металле, пластические свойства металлов не будут играть никакой роли и металл будет таким же хрупким, как и керамика. В



Новые конструкционные материалы

этом конкретном случае керамика существенно прочнее металла.

Важными свойствами керамических материалов, обусловивших их применение в качестве брони, являются высокие твердость, модуль упругости, температура плавления (разложения) при в 2 – 3 раза меньшей плотности. Сохранение прочности при нагреве позволяет использовать керамику для защиты от бронепрожигающих снарядов.

Наиболее высокие защитные свойства имеют материалы на основе карбида бора. Их массовое применение сдерживается высокой стоимостью метода прессования. Поэтому плитки из карбида бора используют при необходимости существенного снижения массы броневой защиты, например для защиты кресел и автоматических систем управления вертолетов, экипажа и десанта. Керамику из диборида титана, имеющую наибольшую твердость и модуль упругости, применяют для защиты от тяжелых броневой и бронепрожигающих танковых снарядов.

Для массового производства керамики наиболее перспективен сравнительно дешевый оксид алюминия. Керамику на его основе используют для защиты живой силы, сухопутной и морской военной техники.

По данным фирмы «Morgan M. Ltd» (США), пластина из карбида бора толщиной 6,5 мм или из оксида алюминия толщиной 8 мм останавливает пулю калибром 7,62 мм, летящую со скоростью более 800 м/с при выстреле в упор. Для достижения того же эффекта стальная броня должна иметь толщину 10 мм, при этом масса ее будет в 4 раза больше, чем у керамической.

Наиболее эффективно применение композиционной брони, состоящей из нескольких разнородных слоев. Наружный керамический слой воспринимает основную ударную и тепловую нагрузку, дробится на мелкие частицы и рассеивает кинетическую энергию снаряда. Остаточная кинетическая энергия снаряда поглощается упругой деформацией подложки, в качестве которой может использоваться сталь, дюралюминий или кевларовая ткань в несколько слоев. Эффективно покрытие керамики легкоплавким инертным материалом, играющим роль своеобразной смазки и несколько изменяющим направление летящего снаряда, что обеспечивает рикошет.

Бронепанель состоит из отдельных последовательно соединенных керамических пластин размером 50 * 50 или 100 * 100 мм. Для защиты от броневой пули калибром 12,6 мм используют пластины из Al_2O_3 толщиной 15 мм и 35 слоев кевлара, а от пули калибром 7,62 мм – пластины из Al_2O_3 толщиной 6 мм



и 12 слоев кевлара.

Во время войны в Персидском заливе широкое использование армией США керамической брони из Al_2O_3 , SiC и B₄C показало ее высокую эффективность. Для броневой защиты также перспективно применение материалов на основе AlN, TiB₂ и полиамидных смол, армированных керамическими волокнами.

Керамика в ракетно-космическом машиностроении. При полете в плотных слоях атмосферы головные части ракет, космических кораблей, кораблей многоразового использования, нагреваемые до высокой температуры, нуждаются в надежной теплозащите.

Материалы для тепловой защиты должны обладать высокой теплостойкостью и прочностью в сочетании с минимальными значениями коэффициента термического расширения, теплопроводности и плотности.

Для повышения прочности, отражательной способности и абляционных характеристик внешней поверхности теплозащитных материалов их покрывают слоем эмали толщиной около 300 мкм. Эмаль, содержащую SiC или 94 % SiO₂ и 6 % B₂O₃, в виде шликера наносят на поверхность, а затем подвергают спеканию при 1470 К. Плиты с покрытиями используют в наиболее нагреваемых местах космических кораблей, баллистических ракет и гиперзвуковых самолетов. Они выдерживают до 500 десятиминутных нагревов в электродуговой плазме при температуре 1670 К.

Высокопористый волокнистый слой теплоизоляции на основе FRCI, AETB или HTR защищен облицовкой из слоя карбида кремния. Облицовочный слой предохраняет теплоизолирующий слой от абляционного и эрозионного разрушения и воспринимает основную тепловую нагрузку.

ТЕМА 10

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПЛАСТМАССЫ

Состав и строение полимеров

Полимерными материалами или полимерами называются высокомолекулярные химические соединения, состоящие из многочисленных маломолекулярных звеньев (мономеров) одинакового строения. Чаще всего для получения полимеров применяют следующие мономеры: этилен, винилхлорид, винилацетат, винилденхлорид, тетрафторэтилен, пропилен, метилметакрилат, сти-



рол, мочевины, фенол, меламин, формальдегид.

Особенностью молекул полимеров является их большая молекулярная масса ($M > 5 \cdot 10^3$). Соединения с меньшей молекулярной массой ($M = 500 - 5000$) называются олигомерами, у низкомолекулярных соединений $M < 500$.

Различают природные и синтетические полимеры. К полимерам, встречающимся в природе, относятся натуральный каучук, целлюлоза, слюда, асбест, шерсть и т. д. Однако ведущее место занимают синтетические полимеры, получаемые в процессе химического синтеза из низкомолекулярных соединений.

В зависимости от способа образования высокомолекулярных синтетических соединений различают полимеры, получаемые либо в процессе поликонденсации, либо в результате реакции присоединения.

Полимеризация – это процесс соединения низкомолекулярных соединений в высокомолекулярные с образованием длинных цепей. Величиной степени полимеризации является количество мер в молекуле полимера. В большинстве полимеров их количество составляет от 1000 до 10000 единиц. В результате полимеризации получают такие часто применяемые полимеры, как полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, политетрафторэтилен, полибутадиен и др.

Поликонденсация – это ступенчатая реакция, заключающаяся в соединении большого количества одинаковых мономеров или двух различных групп (А и В) мономеров в макромолекулы (поликонденсаты) с одновременным образованием побочных продуктов (вода, аммиак, хлороводород, диоксид углерода, метиловый спирт и др.).

С помощью реакции поликонденсации получают полиамиды, полиэстеры, фенопласты, аминопласты, поликарбонаты, полисульфоны, силиконы и другие полимеры.

Полиприсоединение – процесс образования полимера в результате реакции множественного присоединения мономеров, содержащих предельные реакционные группы, к мономерам, содержащим непредельные группы (двойные связи или активные циклы). В отличие от поликонденсации полиприсоединение протекает без выделения побочных продуктов.

К важнейшим реакциям полиприсоединения относятся получение поли-уретанов и процесс отверждения эпоксидных смол.

По составу все полимеры делятся на органические, элементоорганические и неорганические. Органические полимеры, составляющие наиболее обширную группу соединений,



состоят из атомов углерода, водорода, кислорода, азота, серы и галогенов. Элементоорганические соединения содержат в составе основной цепи, кроме перечисленных, атомы кремния, титана, алюминия и других элементов, сочетающихся с органическими радикалами. В природе таких соединений нет. Это чисто синтетические полимеры. Их характерными представителями являются кремнийорганические соединения, основная цепь которых построена из атомов кремния и кислорода. Неорганические полимеры (силикатное стекло, керамика, слюда, асбест и др.) не содержат атомов углерода. Основой их являются оксиды кремния, алюминия, магния и др.

Для получения материалов с заданными свойствами в технике часто используют не сами полимеры, а их сочетания с другими материалами как органического, так и неорганического происхождения (металлопласты, пластмассы, полимербетоны, стеклопластики и др.).

Своеобразие свойств полимеров обусловлено их структурой. Различают следующие типы полимерных структур: линейную, линейно-разветвленную, лестничную и пространственную с громоздкими молекулярными группами и специфическими геометрическими построениями

Полимеры с линейной структурой представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки. Их макромолекулы характеризуются повторениями вдоль цепи одной и той же структурной группы – звена или химической единицы цепи. Для полимеров с линейной структурой существенно наличие достаточно длинных макромолекул с резким различием характера связи вдоль цепи и между цепями (химические и межмолекулярные связи). Для макромолекул полимеров с линейной структурой характерна высокая гибкость. Гибкость – основное свойство полимерных цепей, приводящее к качественно новым свойствам: высокой эластичности и отсутствию хрупкости в твердом состоянии. Полимеры с линейно-разветвленной структурой помимо основной цепи имеют боковые ответвления. К типичным полимерам с линейной структурой относится полиэтилен, с линейно-разветвленной – полиизобутилен и полипропилен.

Молекула полимера с лестничной структурой состоит из двух цепей, соединенных химическими связями. Полимеры с лестничной структурой, к которым относятся, например, кремнийорганические полимеры, характеризуются повышенной термостойкостью, жесткостью, они нерастворимы в органических растворителях.



Полимеры с пространственной структурой образуют при соединении макромолекул между собой в поперечном направлении прочные химические связи. В результате такого соединения макромолекул образуется сетчатая структура с различной густотой сетки или пространственная сетчатая структура. Полимеры с пространственной структурой обладают большей жесткостью и теплостойкостью, чем полимеры с линейной структурой. Полимеры с пространственной структурой являются основой конструкционных неметаллических материалов.

По фазовому составу полимеры представляют собой системы, состоящие из кристаллических и аморфных областей.

Кристаллическая фаза полимеров способствует повышению их твердости, прочности, модуля упругости и других механических характеристик, одновременно снижая гибкость молекул. Аморфная фаза уменьшает жесткость, делает полимер более эластичным, т. е. способным к большим обратимым деформациям. Отношение объема всех кристаллических областей к общему объему называют степенью кристалличности. Высокую степень кристалличности (60 – 80 %) имеют фторопласты, полипропилен, полиэтилен высокой плотности. Меньшей степенью кристалличности обладают поливинилхлорид, полиэтилен низкой плотности.

В зависимости от того, как ведут себя полимеры при нагреве, они делятся на термопластичные и термореактивные.

Термопластичные полимеры при нагреве размягчаются и плавятся, а при охлаждении затвердевают. При этом материал не претерпевает химических превращений, что делает процесс плавления-затвердевания полностью обратимым. Термопластичные полимеры имеют линейную или линейно-разветвленную структуру макромолекул. Между молекулами действуют слабые силы и нет химических связей. К термопластам относятся полиэтилен, полистирол, полиамиды и др. Изделия из термопластичных полимеров изготавливают литьем под давлением в водоохлаждаемые формы, прессованием, экструзией, выдуванием и другими способами.

Термореактивные полимеры сначала имеют линейную структуру и при нагреве размягчаются, затем в результате протекания химических реакций приобретают пространственную структуру и превращаются в твердое вещество, сохраняя и в дальнейшем высокую твердость. Последующий нагрев не размягчает их и может привести только к их разложению. Готовый термореактивный полимер не плавится и не растворяется, поэтому в отличие от термопластичного не может подвергаться повторной пере-



работке. К термореактивным полимерам относятся фенолоформальдегидная, кремнийорганическая, эпоксидная и другие смолы.

Основные свойства полимеров

Полимеры могут находиться в твердом и жидком состояниях (газообразное состояние для них не характерно), кристаллическом и аморфном фазовых состояниях, а также в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем деформационных физических состояниях.

Полимеры имеют высокую стойкость в таких средах, как щелочи и концентрированные кислоты. В отличие от металлов они не подвержены электрохимической коррозии. С увеличением молекулярной массы снижается растворимость полимеров в растворителях органического происхождения. Полимеры с пространственной структурой практически не подвержены действию органических растворителей.

Большинство полимеров является диэлектриками. Полимеры в основном относятся к немагнитным веществам. Из всех применяемых конструкционных материалов полимеры имеют наименьшую теплопроводность и наибольшие теплоемкость и тепловую усадку. Тепловая усадка полимеров примерно в 10 – 20 раз больше, чем металлов. Причиной потери герметичности уплотнительными узлами при низких температурах является стеклование резины и резкое различие коэффициентов расширения металла и резины в застеклованном состоянии.

Для полимеров характерен широкий диапазон механических характеристик, сильно зависящий от их структуры. Кроме структурных параметров большое влияние на механические свойства полимеров оказывают внешние факторы: температура, длительность и частота или скорость нагружения, давление, вид напряженного состояния, термообработка, характер окружающей среды и др.

Особенностями механических свойств полимеров являются их удовлетворительная прочность, но малая жесткость по сравнению с металлическими материалами.

Для полимеров характерны ярко выраженная анизотропия свойств, снижение прочности и развитие ползучести при длительном нагружении. Вместе с тем полимеры обладают высоким сопротивлением усталости. Для полимеров характерна более резко выраженная температурная зависимость механических свойств по сравнению с металлами.

Одной из основных ха- рактеристик полимеров явля-



ется деформируемость. По деформируемости (или податливости) полимеров в широком температурном интервале чаще всего оценивают их основные технологические и эксплуатационные свойства.

Термомеханические кривые получают при нагреве нагруженного образца полимера с заданной скоростью. Действующая нагрузка должна быть постоянной по величине и малой по значению, чтобы механические воздействия на полимер не приводили к изменению его структуры.

В стеклообразном состоянии при малых напряжениях наблюдается только упругая деформация с высоким модулем упругости ($E = 2,2 - 5$ ГПа). Стеклообразное состояние является одной из форм твердого состояния высокомолекулярных веществ. Выше температуры стеклования к этой деформации добавляется высокоэластическая составляющая, которая значительно превосходит упругую и характеризуется модулем высокоэластичности $E = 0,1 - 1$ МПа. Выше температуры текучести проявляется еще одна составляющая деформации, которая приводит к постепенному накоплению остаточной деформации образца полимера. Границы между этими физическими состояниями характеризуются значениями температур стеклования T_c и текучести T_t . Критические температуры T_c и T_t являются основными характеристиками полимеров.

Важность этих характеристик хорошо иллюстрируется следующими примерами. Во многих случаях волокна и полимеры должны иметь высокую прочность. Поэтому лежащие в их основе полимеры должны находиться в стеклообразном состоянии. Резиновой промышленности, наоборот, необходимы высокоэластичные полимеры, сохраняющие это состояние в широком температурном интервале. Процесс технологической переработки полимеров происходит, как правило, в области вязкотекучего состояния. Поэтому для переработки они должны быть нагреты выше соответствующей температуры T_t .

Низкомолекулярные вещества не могут находиться в высокоэластическом состоянии, для них характерны только стеклообразное и вязкотекучее состояния. Высокоэластическое состояние занимает тем больший температурный интервал $T_c - T_t$, чем больше молекулярная масса полимера.

Все полимеры в большей или меньшей степени подвержены процессу старения во времени. Старением полимеров называют самопроизвольное необратимое изменение важнейших технических характеристик, происходящее в результате сложных



химических и физических процессов, развивающихся в материале при эксплуатации и хранении.

Старению способствуют свет, частая смена циклов нагрев – охлаждение, воздействие кислорода, озона и другие факторы. Старение ускоряется при многократных деформациях, менее существенное влияние на старение оказывает влага. При старении повышается твердость, хрупкость, теряется эластичность. При высоких температурах (200 – 250°C) происходит термическая деструкция – разложение органических полимеров, сопровождающееся испарением летучих веществ.

Для замедленного старения в полимерные материалы добавляют стабилизаторы. Обычно применяют стабилизаторы двух типов: термостабилизаторы (амины, фенолы) и светостабилизаторы (например, сажу).

Длительность эксплуатации стабилизированных полимеров значительно возрастает. Срок наступления хрупкости полиэтилена, стабилизированного сажой, составляет свыше 5 лет. Трубы из поливинилхлорида могут работать 10 – 25 лет.

Для определения механических свойств неметаллических материалов проводят статические испытания на растяжение, сжатие и изгиб; динамические испытания на удар; определение твердости, усталостной прочности, ползучести и др. С целью определения стойкости к старению проводят физико-механические испытания материалов после ускоренных климатических испытаний на фотостарение.

Кроме того, существуют методы определения массы, толщины, плотности материала, а также специальные виды испытаний:

для картона – на надлом, излом, продавливание, сжатие кольца, линейное сжатие;

гофрированного картона, гофропласта – на торцевое и плоскостное сжатие, расслаивание, продавливание и пробой;

резины – на стойкость при статической деформации сжатия;

древесностружечных плит – на прочность и модуль упругости при изгибе, удельное сопротивление выдергиванию гвоздей и шурупов.

Полимеры (искусственные материалы) в соответствии с международным стандартом (ISO) обозначают условными символами, которые облегчают маркировку торговых изделий. Ниже в алфавитном порядке представлен ряд международных обозначений важнейших полимеров, применяемых в технике:



Новые конструкционные материалы

Общая характеристика пластмасс. Свойства пластмасс

Пластмассы – это синтетические материалы, получаемые на основе органических и элементоорганических полимеров. Свойства пластмасс определяются свойствами полимеров, составляющих их основу.

Пластмассы состоят из нескольких компонентов: связующего вещества, наполнителя, пластификатора и др. Обязательным компонентом является связующее вещество. Такие простые пластмассы, как полиэтилен, вообще состоят из одного связующего вещества.

Наполнителями служат твердые материалы органического и неорганического происхождения. Они придают пластмассам прочность, твердость, теплостойкость, а также некоторые специальные свойства, например антифрикционные или, наоборот, фрикционные. Кроме того, наполнители снимают усадку при прессовании.

Пластификаторы представляют собой нелетучие жидкости с низкой температурой замерзания. Растворяясь в полимере, пластификаторы повышают его способность к пластической деформации. Их вводят для расширения температурной области высокоэластического состояния, снижения жесткости пластмасс и температуры хрупкости.

В качестве пластификатора применяют сложные эфиры, низкомолекулярные полимеры и др. Пластификаторы должны оставаться стабильными в условиях эксплуатации. Их наличие улучшает морозостойкость и огнестойкость пластмасс.

В состав пластмасс могут также входить стабилизаторы, отвердители, красители и другие вещества.

Стабилизаторы вводят в пластмассы для повышения долговечности. Светостабилизаторы предотвращают фотоокисление, а антиокислители – термоокислительные реакции.

Отвердители изменяют структуру полимеров, влияя на свойства пластмасс. Чаще используют отвердители, ускоряющие полимеризацию. К ним относятся оксиды некоторых металлов, уротропин и др.

Специальные химические добавки вводят с различными целями; например, сильные органические яды – фунгициды – для предохранения пластмасс от плесени и поедания насекомыми в условиях тропиков.

Смазывающие вещества (стеарин, олеиновая кислота) применяют для предотвращения прилипания пластмассы к оборудованию при производстве и эксплуатации изделий.



Новые конструкционные материалы

Красители и пигменты придают желаемую окраску пластмассам.

Для пластмасс характерны следующие свойства:

низкая плотность (обычно 1,0 – 1,8 г/см³, в некоторых случаях до 0,02 – 0,04 г/см³);

высокая коррозионная стойкость. Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии, на них не действуют слабые кислоты и щелочи. Есть пластмассы, стойкие к действию концентрированных кислот и щелочей. Большинство пластмасс безвредны в санитарном отношении;

высокие диэлектрические свойства;

хорошая окрашиваемость в любые цвета. Некоторые пластмассы могут быть изготовлены прозрачными, не уступающими по своим оптическим свойствам стеклам;

механические свойства широкого диапазона. В зависимости от природы выбранных полимеров и наполнителей пластмассы могут быть твердыми и прочными или же гибкими и упругими. Ряд пластиков по своей механической прочности превосходит чугун и бронзу. При одной и той же массе пластмассовая конструкция может по прочности соответствовать стальной;

антифрикционные свойства. Пластмассы могут служить полноценными заменителями антифрикционных сплавов (оловянистых бронз, баббитов и др.). Например, полиамидные подшипники скольжения длительное время могут работать без смазки;

высокие теплоизоляционные свойства. Все пластмассы, как правило, плохо проводят теплоту, а теплопроводность таких теплоизоляторов, как пено- и поропласты, почти в 10 раз меньше, чем у обычных пластмасс;

высокие адгезионные свойства;

хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии (без снятия стружки) – литьем, прессованием, формованием с применением невысоких давлений или в вакууме.

Недостатком большинства пластмасс является их невысокая теплоустойчивость (до 100 – 120°С). В настоящее время верхний температурный предел для некоторых видов поднялся до 300 – 400°С. Пластмассы могут работать при умеренно низких температурах (до –70°С), а в отдельных случаях – при криогенных температурах. Недостатками пластмасс также являются их низкая твердость, склонность к старению, ползучесть, нестойкость к большим статическим и динамическим нагрузкам. Однако положительные свойства значительно превосходят их недостатки, что обу-



словливает высокие темпы роста ежегодного производства пластмасс.

По характеру связующего вещества пластмассы подразделяются на термопластичные (термопласты), получаемые на основе термопластичных полимеров, и термореактивные (реактопласты), т. е. неразмягающиеся.

Термопластичные пластмассы (термопласты)

Широкое применение находят термопластичные пластмассы на основе полиэтилена, полипропилена, полистирола, поливинилхлорида, фторопластов, полиамидов и других полимеров

Полиэтилен является продуктом полимеризации этилена. Свойства полиэтилена зависят от условий полимеризации. По способу изготовления различают полиэтилен низкой плотности (0,918 – 0,930 г/см³), получаемый полимеризацией при высоком давлении, и полиэтилен высокой плотности (0,946 – 0,970 г/см³), получаемый полимеризацией при низком давлении. Полиэтилен высокой плотности имеет степень кристалличности до 75 – 95 %. Чем выше плотность и степень кристалличности полиэтилена, тем выше его прочность, модуль упругости и теплостойкость. Разрушающее напряжение при растяжении полиэтилена низкой плотности составляет 10 – 17 МПа, полиэтилена высокой плотности – 18 – 35 МПа.

Полиэтилен имеет высокие диэлектрические свойства, практически не поглощает влагу. Он химически стоек к действию кислот, щелочей и растворителей, нетоксичен, легко сваривается, технологичен (поддается экструзии, литью, напылению, заливке т. д.), стоит недорого и сочетает высокую прочность с пластичностью. Недостатком полиэтилена является склонность к старению под действием ультрафиолетовых лучей.

Полиэтилен выпускается в виде пленок толщиной 0,03 – 0,30 мм, шириной 1400 мм и длиной 30 м, а также в виде листов толщиной 1 – 6 мм и шириной до 1400 мм. Полиэтилен применяют для изоляции электропроводов и кабелей, в качестве упаковочного материала для пищевых продуктов, для защиты от коррозии магистральных нефте- и газопроводов, в качестве заменителя стекла, для изготовления предметов домашнего обихода, для защиты металлов от коррозии. Полиэтиленовые трубы могут работать при температурах до –60°С, они не подвержены почвенной коррозии. Из полиэтилена изготавливают крышки подшипников, уплотнительные прокладки, детали вентиляторов и насосов, гайки, шайбы, полые изделия вместимостью до 200 л, тару для хранения и транспортировки кислот и щелочей.



Новые конструкционные материалы

Полипропилен является полимером пропилена. По сравнению с полиэтиленом полипропилен имеет более высокую механическую прочность и жесткость, большую теплостойкость и меньшую склонность к старению. Разрушающее напряжение при растяжении полипропилена достигает 25 – 40 МПа. Недостатком полипропилена является его невысокая морозостойкость (-20°C).

Детали из полипропилена изготавливают штамповкой, литьем под давлением, пневматическим и вакуумным прессованием; полиэтилен можно сваривать, напылять на металл, ткань, картон. Он легко подвергается механической обработке на токарных, фрезерных, сверлильных станках.

Полипропилен применяют для изготовления антикоррозионной футеровки резервуаров, труб и арматуры трубопроводов, электроизоляционных деталей, а также для изготовления деталей, применяемых при работе в агрессивных средах. Из полипропилена изготавливают корпусные детали автомобилей и корпуса аккумуляторов, прокладки, трубы, фланцы, водонапорную арматуру, пленки, пленочные покрытия бумаги и картона, корпуса воздушных фильтров, конденсаторы, вставки демпфирующих глушителей, зубчатые и червячные колеса, ролики, подшипники скольжения, фильтры масляных и воздушных систем, рабочие детали вентиляторов, насосов, уплотнения, детали приборов и автоматов точной механики, кулачковые механизмы, детали телевизоров, магнитофонов, холодильников, стиральных машин, изоляцию проводов и кабелей. Отходы при производстве полипропилена и отработавшие изделия из него используют для повторной переработки.

Полистирол относится к числу наиболее известных и широко применяемых пластмасс.

Полистирол – твердый, жесткий, бесцветный, прозрачный, аморфный полимер, легко окрашиваемый в различные цвета. Обладает высокой водостойкостью, хорошей химической стойкостью в растворах солей, кислот и щелочей. По сравнению с другими термопластами более стоек к радиации. Недостатками полистирола являются повышенная хрупкость при ударных нагрузках, склонность к старению, невысокая тепло- и морозостойкость. Интервал рабочих температур от -40 до $+65^{\circ}\text{C}$. Полистирол применяют для изготовления деталей радио- и электроаппаратуры, предметов домашнего обихода, детских игрушек, трубок для изоляции проводов, пленок для изоляции электрических кабелей и конденсаторов, открытых емкостей (лотки, тарелки и др.), прокладок, втулок, светопленок, крупногабаритных изде-



Новые конструкционные материалы

лий радиотехники (корпуса транзисторных приемников), деталей электропылесосов (колодки, щелевые сопла, прокладки, ручки), мебельной фурнитуры, конструкционных изделий с антистатическими свойствами. Ударопрочным полистиролом (механическая смесь полистирола с каучуком) облицовывают пассажирские вагоны, салоны автобусов и самолетов. Из него изготавливают крупногабаритные детали холодильников, корпуса радиоприемников, телефонных аппаратов и др.

Его применяют для изготовления деталей машин и аппаратов, непосредственно контактирующих с пищевыми продуктами (молоком и молочными продуктами, вином, коньяком, шампанским и др.), а также для тары и упаковки. Его используют для изготовления пористых материалов.

В числе различных синтетических материалов широкое распространение получили так называемые газонаполненные пластики. Эти материалы разделяются на пенопласты и поропласты. У пенопластов микроскопические ячейки, наполненные газом, не сообщаются между собой, и плотность таких материалов, как правило, менее 0,3 г/см³. Ячейки у поропластов сообщаются между собой, и их плотность несколько выше. Пенопласты и поропласты выпускаются на основе полистирола, поливинилхлорида и различных эфирных полимеров.

Пенопласт применяют в качестве теплоизоляционного слоя в конструкциях судовых трюмов, кузовов автофургонов, холодильных камер на объектах мясомолочной и рыбной промышленности.

Пенополистирол получают из эмульсионного полимера прессовым и беспрессовым методами. Пенополистирол применяют для теплоизоляции холодильников и торгового оборудования. Для производства изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, используют обычно суспензионный полистирол. При получении пенополистирола прессовым методом (пенополистирол марок ПС-1 и ПС-4) используют эмульсионный тонкодисперсный полистирол, смешивают его с порообразующим компонентом, прессуют, а затем вспенивают в специальных обогреваемых камерах. Если же пенополистирол получают беспрессовым методом из блочно-суспензионного стирола, он называется стиропор. Его полимеризацию проводят при 70°C с непрерывным перемешиванием. Пенополистирол имеет структуру застывшей пены, он стоек к действию влаги, агрессивных минеральных сред (кроме концентрированной азотной кислоты). Пенополистирол, полученный беспрессовым методом, обладает более высокой химиче-



ской стойкостью. Устойчив он также и в биологическом отношении – не гниет, стоек к действию грибков и бактерий, не повреждается грызунами.

Прочность пенополистирола зависит от размера, формы и прочности стенок пор. Механические свойства беспрессового пенополистирола ниже, чем прессового. Пенополистиролы могут работать при температурах до 60 – 75°C. Недостатком пенополистирола является присутствие в нем горючего порообразователя, например изопентана. Уменьшить или вовсе устранить эту опасность удастся путем введения антипиренов, например оскида сурьмы.

Пенополистирол применяется в различных отраслях промышленности как термо- и звукоизоляционный материал, в пищевой промышленности – для изоляции трюмов для хранения продуктов питания при температуре от –15 до –35°C. Коэффициент теплопроводности пенополистирола близок к коэффициенту теплопроводности воздуха. Благодаря хорошим амортизационным свойствам и малой плотности пенополистирол используют в качестве упаковочного материала.

Пенопласт мипора изготавливается на основе эмульсионных карбамидоформальдегидных олигомеров. Он обладает исключительно малой плотностью (не более 0,02 г/см³; разрушающее напряжение при сжатии 2,2 – 5,0 МПа). Коэффициент теплопроводности мипоры близок к коэффициенту теплопроводности воздуха и равен 0,023 Вт/(м•К). Мипора в 10 раз легче пробки, имеет хорошую стойкость против горения. При контакте с пламенем мипора обугливается, но не загорается. В мипоре газонаполненные ячейки не сообщаются между собой. Это позволяет использовать мипору в качестве теплоизоляционного материала. Недостатками мипоры являются большая хрупкость и водопоглощение. Для уменьшения хрупкости к мипоре добавляют глицерин, но даже это не всегда помогает. От проникновения влаги мипору защищают водонепроницаемыми пленками.

В последнее время в промышленности начинают все шире использовать армированные газонаполненные пластмассы, что позволяет сочетать малую плотность с высокой прочностью, т. е. повышать удельную прочность. Газонаполненные пластмассы армируют листами металла или листами более прочных газонаполненных пластмасс.

Пластмассы, на основе поливинилхлорида имеют хорошие электроизоляционные свойства. Они стойки к воздействию химических, атмосферно-, водо-, масло-



и бензостойки. Непластифицированный поливинил-хлорид называется винипластом. Винипласты имеют высокую механическую прочность и упругость, но сравнительно малопластичны. Винипласты стойки к воздействию почти всех минеральных кислот, щелочей и растворов солей. Их недостатками являются склонность к ползучести, низкая ударная вязкость, малая теплостойкость, резкая зависимость от температуры.

Винипласт выпускается в виде листов, прутков, труб. Винипластовые детали хорошо механически обрабатываются и хорошо свариваются. Из него изготавливают трубы для транспортировки воды, агрессивных жидкостей и газов, коррозионностойкие емкости, защитные покрытия для электропроводки, детали вентиляционных установок, теплообменников, шланги вакуумпроводов, защитные покрытия для металлических емкостей, изоляцию проводов и кабелей. Поливинилхлорид используют для получения пенопластов, линолеума, искусственной кожи, объемной тары, товаров бытовой химии, вибропоглощающих материалов в машиностроении и на всех видах транспорта, водо-, бензо- и антифризостойких трубок, прокладок и т. д.

Фторопласты – полимеры фторпроизводных этиленового ряда. Фторопласты имеют прочность при растяжении 15 – 35 МПа, при изгибе 10 – 15 МПа; относительное удлинение при разрыве 250 – 350 %.

Наиболее широкое распространение получил фторопласт-4, или политетрафторэтилен (тефлон). Характеризуется высокой плотностью (2,1 – 2,3 г/см³), термо- и морозостойкостью. Интервал рабочих температур при эксплуатации изделий из фторопласта-4 составляет от –269 до +260 °С. Пленка из него не охрупчивается даже в среде жидкого гелия. Фторопласт-4 имеет хорошие диэлектрические свойства и высокую коррозионную стойкость. По химической стойкости фторопласт-4 превосходит все известные материалы, включая золото и платину. Он стоек к воздействию всех минеральных и органических щелочей, кислот, органических растворителей, не набухает в воде, не смачивается жидкостями и вязкотекучими средами пищевых производств – тестом, патокой, вареньем и т. д. При температуре 260°С невзрывоопасен, негорюч, при непосредственном контакте не оказывает влияния на организм человека, разрушается только под действием расплавленных щелочных металлов и элементарного фтора. Фторопласт-4 имеет низкий коэффициент трения и применяется для изготовления подшипников скольжения без смазки. Для уменьшения износа подшипников во фторопласт вводят 15 – 30 % напол-



нителя (графита, дисульфита молибдена, стеклянного волокна и др.).

Фторопласты широко применяются в электро- и радиотехнической промышленности, а также для изготовления химически стойких труб, кранов, мембран, насосов, подшипников, деталей медицинской техники, коррозионностойких конструкций, тепло- и морозостойких деталей (втулок, пластин, дисков, прокладок, сальников, клапанов), для облицовки внутренних поверхностей различных криогенных емкостей.

Полиамиды включают группу известных термопластичных пластмасс (таких, как найлон, капрон и др.). Ориентированные полиамиды характеризуются высокой прочностью на растяжение (более 400 МПа), ударпрочностью, способностью к поглощению вибрационных нагрузок. Они имеют низкий коэффициент трения и могут использоваться в качестве подшипников как без смазки, так и при применении смазочных материалов. Полиамиды используют для изготовления конструкционных и электроизоляционных изделий, эксплуатируемых при температурах от -60 до $+100^{\circ}\text{C}$ (зубчатые передачи, уплотнительные устройства, втулки, муфты, подшипники скольжения, лопасти винтов, стойкие к действию щелочей, масел, жиров и углеводов), технических изделий и товаров культурно-бытового назначения, антифрикционных покрытий металлов.

Полиуретаны – наиболее ценные и широко производимые промышленностью термопластичные полимеры. Они характеризуются высоким модулем упругости, износостойкостью, вязким коэффициентом трения, стойкостью к вибрациям, атмосферостойкостью, а также стойкостью к воздействию масла и бензина. Изделия из полиуретана можно эксплуатировать при понижении температуры до $-60 \dots -70^{\circ}\text{C}$. Волокна из полиуретана малогигроскопичны и имеют высокую химическую стойкость. Их используют для изготовления изоляции, фильтровальных и парашютных тканей.

Стекло органическое (плексиглас) получают полимеризацией сложных эфиров метакриловой кислоты. Обычно применяют полиметилметакрилат. Этот термопласт оптически прозрачен (светопрозрачность до 92 %), имеет низкую плотность, высокую атмосферостойкость, стоек к воздействию разбавленных кислот и щелочей, углеводородного топлива и смазок. Стекло органическое выпускается в виде листов толщиной до 25 мм. Его недостаток – низкая поверхностная твердость.

Поликарбонат – термопластичный полимер на основе



дифенилолпропана и фостена, выпускаемый под названием дифлон. Поликарбонат характеризуется низкой водопоглощаемостью и газопроницаемостью, хорошими диэлектрическими свойствами, высокой жесткостью, теплостойкостью и химической стойкостью, не имеет запаха и вкуса, физиологически безвреден, бесцветен, прозрачен, хорошо окрашивается. Стоек к световому старению и действию окислителей даже при нагреве до 120оС. Это один из наиболее ударопрочных термопластов, что позволяет использовать его в качестве конструкционного материала, заменяющего металлы. Из поликарбоната изготавливают шестерни, подшипники, корпуса, крышки, клапаны и другие детали, сосуды для транспортировки фруктовых соков, молока, вин и т. д. Его можно использовать в криогенной технике для работы в среде жидких газов.

Физико-механические свойства поликарбонатов улучшаются при введении в них армирующих волокон. Например, при введении в поликарбонат стекловолокна (до 30 %) его модуль упругости при растяжении увеличивается в 3 раза, а твердость по Бринеллю – в 1,5 раза. Теплостойкость материала также увеличивается, а термический коэффициент линейного расширения снижается в 3 раза, усадка материала уменьшается в 2 раза.

Армированные поликарбонаты с названием «Эстеран» нашли применение в производстве ответственных деталей машин, например подшипников качения, кулачков и т. д. Они сохраняют свои свойства и эксплуатационную надежность в интервале температур от –200 до +110°С, а также в вакууме.

В нашей стране кроме стеклонаполненного поликарбоната хорошо зарекомендовали себя наполненные стекловолокном полипропилен, полистирол и некоторые другие термопласты. Термопласты, армированные стекловолокном, имеют более высокие механические свойства и обеспечивают неизменность формы изделий в условиях повышенных температур. Производство таких термопластичных материалов с каждым годом растет на 25 – 30 %. Они применяются при изготовлении разнообразных деталей в электронной и электротехнической промышленности, оптическом и точном приборостроении, автомобилестроении, текстильном машиностроении и т. д.

Термореактивные пластмассы (реактопласты)

Основу всякого реактопласта составляет химически за-твердевающая термореактивная смола – связующее вещество. Кроме того, в состав реактопластов входят наполнители, пластификаторы, отвердители, уско-рители или замедлители и рас-



Новые конструкционные материалы

творители. Наполнителями могут быть порошковые, волокнистые и гибкие листовые материалы. В качестве порошковых наполнителей используют молотый кварц, тальк, графит, древесную муку, целлюлозу. К пластмассам с порошковыми наполнителями относятся: фенопласты и аминопласты. Из них изготавливают несилосые конструкционные и электроизоляционные детали (рукоятки, детали приборов, кнопки и т. д.), различные вытяжные и формовочные штампы, корпуса сборочных и контрольных приспособлений, литейные модели и другую оснастку.

Фенопласты (бакелиты, феноло-формальдегидные смолы) являются термоупрочняемыми пластмассами. Неупрочненные смолы получают при поликонденсации фенола с формальдегидом. Существует два основных типа феноло-формальдегидных смол: новолаки и резолы.

Для получения пластмассы с хорошими потребительскими свойствами в новолаки добавляют субстанцию (обычно уротропин), которая при нагревании разлагается с выделением формальдегида. Формальдегид, добавляемый к новолаковой смоле, образует упрочняющиеся гидроксиметильные группы.

Упрочнение термопластов в основном проводится в интервале температур 140 – 180°C, но благодаря соответствующим добавкам кислот некоторые резолы можно отвердить уже при 25°C и выше.

Резолы получают в спиртовых средах, применяя избыток формальдегида. Продукт содержит гидроксиметиленовые группы. Во время нагревания происходит необратимое упрочнение (реакция образования сетчатой структуры), поэтому резолы прессуют в формах.

Упрочненные феноло-формальдегидные смолы чаще носят название бакелитов. Эта пластмасса хорошо обрабатывается механически инструментами для обработки металла и может подвергаться полированию. Бакелит из ново лака имеет большую термостойкость (100 – 150°C), чем бакелит из резола, но худшие диэлектрические свойства.

Бакелит трудногорюч, а после извлечения из пламени сразу гаснет. Горящий бакелит дает желтый цвет пламени, коптящий в зависимости от вида наполнителя. Остаток, извлеченный из пламени, твердый, разбухший, потрескавшийся и обугленный. В процессе горения выделяются фенол и формальдегид с характерным запахом.

Бакелит стоек к воздействию разбавленных кислот и щелочей, а также большинства органических растворителей.



Новые конструкционные материалы

Для склеивания треснувших бакелитовых изделий можно применять нитроцеллюлозные клеи или жидкие фенольные смолы.

Из бакелита изготавливают изделия галантереи (пуговицы, пепельницы), электротехнические элементы (вилки, розетки), корпуса радио- и телефонных и аппаратов, детали стиральных машин, защитные шлемы, корпуса аккумуляторов, плиты, лаки, клеи.

Аминопласты являются термоупрочняемыми пластмасса-ми. К ним относятся карбамидо-формальдегидные смолы и мела-мино-формальдегидные смолы.

Неупрочненная смола получается при поликонденсации формальдегида с карбамидом (смола карбамидо-формальдегидная) или меламинам (смола меламина-формальдегидная). Эти смолы имеют реактивные группы — CH_2OH , которые под влиянием нагрева (или кислотных катализа-торов) способны к конденсации, в результате которой смолы упрочняются (приобретают пространственную сетчатую структу-ру).

Упрочненные аминопласты твердые и жесткие. Их можно полировать и механически обрабатывать инструментами по металлу, они имеют хорошие электроизоляционные свойства, легко окрашиваются.

Теплостойкость упрочненных аминопластов около 100 – 120 $^{\circ}\text{C}$. Образец, внесенный в огонь, начинает гореть не более чем через 1 минуту. Вынутый из пламени, он не гаснет, но горит медленно (в действительности горят наполнители, сама смола негорюча). Огонь имеет желтый цвет (меламинавая смола) или желтый с зеленовато-голубой каймой (карбамидная смола). Остаток после горения растрескавшийся, разбухший и покрыт по кра-ям характерным белым налетом. Во время горения отчетливо чув-ствуется запах формальдегида и карбамида.

Упрочненные аминопласты стойки к воздействию воды, кислот (в том числе серной и азотной), щелочей и органических растворителей. Для склеивания таких аминопластов можно при-менять феноло-формальдегидные или карбамидо-формальдегидные клеи.

Из аминопластов изготавливают клеи для дерева, электротехнические детали (розетки, выключатели) и галантерею, тонкие покрытия для украшения, лаки (так называемые печные), пенные материалы.

Реактопласты с волокнистыми наполнителями представ-ляют собой композиции, состо-ящие из связующего (смолы) и



Новые конструкционные материалы

волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка (волокниты), асбеста (асбоволокниты), стекловолокна (стекловолокниты).

Волокниты применяют для изготовления деталей с повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, работающих на изгиб и кручение (втулок, шкивов, маховиков и др.).

Асбоволокниты обладают хорошими фрикционными (тормозными) свойствами и теплостойкостью, но по водостойкости и диэлектрической проницаемости уступают пластмассам с порошковым наполнителем.

Стекловолокниты негорючи, стойки к действию ультрафиолетовых лучей, химически стойки, имеют стабильные размеры. Некоторые марки стекловолокнитов применяются для изготовления силовых электротехнических деталей в машиностроении, а также крупногабаритных изделий простых форм (кузовов автомашин, лодок, корпусов приборов и т. п.). Стекловолокниты имеют высокие физико-механические характеристики и применяются для изготовления деталей высокого класса точности и сложной конфигурации. Стекловолокниты могут работать при температурах от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$, имеют прочность при разрыве $80 - 500$ МПа.

В качестве связующих смол волокнитов и стекловолокнитов применяются полиэфировые и эпоксидные смолы.

Полиэстры (полиэфировые, или полиэфирные смолы) являются полимерами, полученными из полиосновных кислот и полигидроксильных спиртов путем поликонденсации.

Перед отверждением смола имеет вид густого сиропа золотистого цвета. Отверждение проводят в форме при комнатной температуре после добавления инициатора (обычно перекись бензоила) в количестве около 4 %. Механические свойства отвержденного продукта зависят от строения исходной смолы и способа ее отверждения. Изделие может быть гибким, эластичным или твердым и хрупким. Твердые изделия можно подвергать механической обработке инструментами по дереву, а также полировать.

Термическая стойкость под напряжением отвержденных смол лежит в пределах $55 - 60^{\circ}\text{C}$, а без нагрузки превышает 150°C . Образец ламината (полиэфировая смола со стеклотканью), помещенный в пламя, горит очень плохо. После извлечения из пламени чаще всего гаснет. После сгорания остается обугленный скелет стекловолокна.

Отвержденные полиэстры нерастворимы в органических кислотах, в ацетоне легко рас-



Новые конструкционные материалы

Из полиэфиров, упрочненных стекловолокном, изготавливают спасательные лодки, части автомобилей, мебель, корпуса планеров и вертолетов, гофрированные плиты для крыш, плафоны ламп, мачты для антенн, лыжи и палки, удочки, защитные каски и т. п. В виде текучих смол полиэферы применяют для заливки частей электронной аппаратуры, мумификации анатомических препаратов, изготовления лаков и т. п.

Эпоксидные смолы. Неотвержденные эпоксидные смолы получают реакцией поликонденсации эпоксидов (эпихлоргидрина) с дифенилолпропаном (дианом). Процесс отверждения является реакцией суммирования (полиприсоединения), в которой роль отвердителя играет полиамин.

Характерной чертой эпоксидных смол является совершенная прилипаемость почти ко всем пластмассам, к металлам; они имеют хорошие механические и электрические свойства.

Термостойкость под напряжением упрочненных эпоксидов лежит в пределах 55 – 120°C в зависимости от вида упрочнителя, а без нагрузки превышает 150°C. Упрочненная эпоксидная смола горит в огне так же, как и полиэфировые ламинаты: она трудно загорается, после чего начинает коптить. В отличие от полиэфиров эпоксидная смола сильно пахнет во время горения.

Эпоксидные смолы служат для изготовления лаков, клеев, а также производства ламинатов.

Большую группу реактопластов составляют слоистые пластмассы, которые содержат листовые наполнители, уложенные слоями. В качестве наполнителей для слоистых пластиков используют материалы органического (бумагу, картон, хлопчатобумажные ткани, древесный шпон, ткани из синтетических волокон) и неорганического (асбестовую бумагу, стеклянную ткань, ткань из кварцевых или кремнеземных волокон) происхождения. В зависимости от вида наполнителя различают следующие слоистые пластики: гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, древесно-слоистые пластики. Связующими при производстве слоистых пластиков служат феноло-формальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические и некоторые другие смолы.

Свойства слоистых пластиков зависят от соотношения компонентов (наполнителя и связующего), характера подготовки наполнителя, режимов прессования и термообработки и других технологических факторов. Благодаря слоистому расположению армирующего наполнителя слоистые пластики обладают анизотропией механических, физических и диэлектрических свойств.

Механические свойства слоистых пластиков определя-



Новые конструкционные материалы

ются прежде всего видом используемого наполнителя. Наибольшей механической прочностью обладают слоистые пластики на основе стеклянной ткани или стеклянных жгутов. Эти материалы, а также слоистые пластики на основе асболокнистых наполнителей имеют более высокую теплостойкость по сравнению с теплостойкостью пластиков на основе органических наполнителей.

Физические и диэлектрические свойства слоистых пластиков зависят в основном от типа используемого полимерного связующего.

Пластик на основе бумаги – гетинакс – применяют в качестве электро-изоляционного материала, работающего длительно при температурах от -65 до $+105^{\circ}\text{C}$, а также как конструкционный и декоративный материал. Гетинаксы широко применяют в электрических машинах, трансформаторах (в качестве высоковольтной изоляции) и других аппаратах, при производстве телефонной арматуры, в радиотехнике (для изготовления печатных схем). Из гетинакса изготавливают панели, щитки, прокладки, крышки, шайбы, малонагруженные изделия и т. д.

Древесно-слоистые пластики (ДСП) используют при изготовлении мебели, для внутренней облицовки пассажирских поездов, судов, самолетов, при строительстве – в качестве облицовочного материала.

ДСП обычно изготавливают в форме плит или тонких листов. Их получают горячим прессованием лушеного древесного шпона, пропитанного полимерным связующим. При производстве ДСП чаще используют березовый или буковый шпон, в качестве связующего используют водно-спиртовые растворы олигомеров. Древесно-слоистые пластики выпускают различных марок и маркируют ДСП-А, ДСП-Б, ДСП-В и т. д. Они различаются направлением волокон шпона в различных слоях. В ДСП-А – во всех слоях волокна шпона расположены параллельно (иногда четыре слоя с параллельным расположением волокон чередуются с одним слоем, повернутым на $20 - 25^{\circ}$). В ДСП-Б расположение слоев смешанное. Через каждые 5 – 20 слоев с параллельным расположением волокон укладывают слой, повернутый на 90° . В ДСП-В осуществляется звездообразная укладка слоев, при которой соседние слои волокон смещают на 30° . Максимальной прочностью в продольном направлении ($= 280$ МПа) обладает ДСП-А. ДСП-Б имеет прочность, одинаковую во взаимно перпендикулярных направлениях (140 МПа).

ДСП обладают хорошими антифрикционными свойствами. В некоторых случаях они заменяют высокооловянистую



Новые конструкционные материалы

бронзу, баббит, текстолит. Химическая стойкость ДСП не очень высока, но выше, чем у обычной древесины. Теплостойкость ДСП достигает 140°C. Их недостатком является набухание, обусловленное поглощением воды.

Пластики на основе хлопчатобумажных тканей – текстолиты – применяют для изготовления различных конструкционных деталей, электроизоляционного материала, вкладышей подшипников прокатного оборудования, прокладок, герметизирующих фланцевые соединения. Текстолитовые детали могут работать не только в воздушной среде, но и в масле, керосине или бензине и т. д. Текстолит производят в виде листов, плит, стержней и трубок. Температура эксплуатации изделий из текстолита от –60 до +60°C.

Стеклотекстолитами называют слоистые пластики на основе тканых стекловолоконистых материалов. Они характеризуются высокой тепло- и хладостойкостью, стойкостью к действию окислителей и других химически активных реагентов, высокими механическими свойствами. Стеклотекстолиты применяют для изготовления крупногабаритных изделий, радиотехнических и электроизоляционных деталей, длительное время работающих при температуре 200°C и кратковременно – при 250°C. Стеклопластики являются конструкционными материалами, применяемыми для изготовления силовых изделий в различных отраслях техники (несущих деталей летательных аппаратов, кузовов и кабин машин, железнодорожных вагонов, корпусов лодок, судов и т. п.).

РЕЗИНЫ. СТЕКЛО

Резинотехнические изделия получают при специальной термической обработке (вулканизации) прессованных деталей из сырой резины, являющейся смесью каучука с серой и другими добавками

Резина состоит из смеси каучука (основа), наполнителя (сажа, оксид кремния, оксид титана, мел, барит, тальк), мягчителя (канифоль, вазелин), противостарителя (парафин, воск) и агентов вулканизации (сера, оксид цинка).

Главным исходным компонентом резины, придающим ей высокие эластические свойства, является каучук. Каучуки бывают натуральные (НК) и синтетические (СК). Натуральный каучук получают коагуляцией латекса (млечного сока) каучуконосных деревьев, растущих в Бразилии, Юго-Восточной Азии, на Малайском архипелаге. Синтетические каучуки (бутадиеновые, бутадиенстирольные и др.) получают методами полимеризации.



Новые конструкционные материалы

Впервые синтез бутадиенового каучука полимеризацией бутадиена, полученного из этилового спирта, осуществлен в 1921 г. русским ученым С. В. Лебедевым. Разработаны методы получения синтетических каучуков на основе более дешевого сырья, например нефти и ацетилена.

Каучуки являются полимерами с линейной структурой. При вулканизации они превращаются в высокоэластичные редкосетчатые материалы – резины. Вулканизирующими добавками служат сера и другие вещества. С увеличением содержания вулканизатора (серы) сетчатая структура резины становится более частой и менее эластичной. При максимальном насыщении серой (до 30 – 50 %) получают твердую резину (эбонит), при насыщении серой до 10 – 15 % – полутвердую резину. Обычно в резине содержится 5 – 8 % S. Для ускорения вулканизации вводят ускорители, например оксид цинка.

Кроме серы в состав резин входят наполнители, пластификаторы, противостарители и красители.

Введение этих компонентов позволяет существенно менять специальные свойства резины, увеличивая ее износо-, морозо-, масло- и бензостойкость. Резиновые изделия часто армируют тканью или металлической сеткой. Для улучшения адгезии металлической арматуры к резине на поверхность металла наносят клеевую пленку.

Резина имеет высокие эластические свойства, высокую упругость и сопротивляемость разрыву. Кроме того, резина обладает малой плотностью, высокой стойкостью против истирания, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами.

Совокупность химических, физических и механических свойств позволяет использовать резиновые материалы для амортизации, демпфирования, уплотнения, герметизации, химической защиты деталей машин, при производстве тары для хранения масла и горючего, различных трубопроводов (шлангов), для изготовления покрышек и камер колес автотранспорта, декоративных изделий и т. д. Номенклатура резиновых изделий чрезвычайно разнообразна.

В зависимости от условий эксплуатации различают резины общего и специального назначения. Резины общего назначения применяют для изготовления камер и шин, ремней, транспортных лент, рукавов, изоляции кабелей и проводов, производства товаров народного потребления и др. Из резин специального назначения различают бензомасло-стойкие, морозостойкие, теп-



лостойкие, стойкие к действию агрессивных сред. Нижней границей рабочих температур резин специального назначения является температура до -80°C , резин общего назначения – до $-35 \dots -50^{\circ}\text{C}$.

В последнее время остро стоит вопрос об очистке территории наших городов от свалок старой резиновой продукции, которая в ходе длительного, иногда в течение десятков лет, хранения выделяет в атмосферу и в почву значительное количество вредных химических соединений.

На автопредприятиях страны, шиноремонтных заводах, в портах находятся десятки миллионов вышедших из строя автомобильных шин. Их утилизация практически не осуществляется, поскольку при сжигании в атмосферу выделяется значительное количество экологически вредных веществ, а стоимость механической утилизации весьма высока. В то же время продукт вторичной переработки шин – резиновая крошка различной дисперсности применяется в различных отраслях техники: при строительстве дорог, в качестве тепло- и звукоизоляторов и т. д. Особенно широко резиновая крошка используется в странах Западной Европы и Юго-Восточной Азии, где она производится в основном методом механического измельчения.

Стекло – это однородное аморфное вещество, получаемое при затвердевании расплава оксидов. В составе стекла могут присутствовать оксиды трех типов: стеклообразующие, модифицирующие и промежуточные. Стеклообразующими являются оксиды кремния, бора, фосфора, германия, мышьяка. К модифицирующим оксидам, введение которых понижает температуру плавления стекла и существенно меняет его свойства, относятся оксиды щелочных (Na, K) и щелочноземельных (Ca, Mg, Ba) металлов. Промежуточными являются оксиды алюминия, свинца, титана, железа. Они могут замещать часть стеклообразующих оксидов. Стеклообразующий каркас стекла представляет собой непрерывную пространственную решетку, в узлах которой расположены ионы, атомы или группировки атомов. Химический состав стекла можно изменять в широких пределах. Поэтому и свойства стекла могут быть различными.

По химическому составу в зависимости от природы стеклообразующих оксидов различают силикатное, алюмосиликатное, боросиликатное, алюмоборосиликатное и другие виды стекла.

В зависимости от содержания модификаторов стекло может быть щелочным и бесщелочным.

По назначению различают строительное (оконное,



Новые конструкционные материалы

стеклоблоки), бытовое (стеклотара, посуда) и техническое (оптическое, электротехническое, химическое и др.) стекло.

Структура и свойства стекла определяются его химическим составом, условиями варки, охлаждения и обработки.

Стекло – термопластичный материал, при нагреве оно постепенно размягчается и переходит в жидкость. Плавление происходит в некотором температурном интервале, величина которого зависит от химического состава стекла. Ниже температуры стеклования T_c стекло приобретает хрупкость. Для обычного силикатного стекла $T_c = 425 - 600^\circ\text{C}$. Выше температуры плавления стекло становится жидкостью. При этих температурах стекломасса перерабатывается в изделия.

Плотность стекла составляет $2,2 - 8,0$ г/см³. Стекло высокой плотности содержит значительные количества оксидов свинца и бария.

Стекло – жесткий, твердый, но очень хрупкий материал. Стекло хорошо сопротивляется сжатию ($= 400 - 600$ МПа), но характеризуется низким временным сопротивлением при испытаниях на растяжение ($30 - 90$ МПа) и изгиб ($50 - 150$ МПа). Более прочным является бесщелочное и кварцевое стекло.

Механические свойства стекла повышаются при термической и химической обработке. Термическая закалка стекла состоит в нагреве до температур, близких к точке размягчения, и быстром равномерном охлаждении поверхности в потоке воздуха или в масле. При этом в поверхностных слоях возникают напряжения сжатия, и прочность стекла возрастает в $2 - 4$ раза. Для изготовления приборов, работающих при повышенном давлении, применяют безосколочное стекло – триплекс.

Триплекс представляет собой комбинированное стекло, состоящее из двух и более закаленных слоев, склеенных прозрачной эластичной пленкой. Химическая обработка состоит в травлении поверхностного слоя раствором плавиковой кислоты с уничтожением поверхностных дефектов. Еще больший эффект достигается при комбинированной химико-термической обработке.

Важнейшим свойством стекла является прозрачность в диапазоне длин волн видимого света. Обычное листовое стекло пропускает до 90% , а отражает около 8% и поглощает около 1% видимого света. Ультрафиолетовые лучи почти полностью поглощаются оконным стеклом.

Стекло имеет высокую химическую стойкость в агрессивных средах (за исключением плавиковой кислоты и щело-



чей). Вода постепенно разрушает стекло вследствие образования щелочных растворов. Чем выше температура и концентрация щелочных оксидов в стекле, тем сильнее проявляется действие воды. Стекло как технический материал широко используется в разных областях техники и народного хозяйства. Это объясняется благоприятным сочетанием физико-химических и механических свойств, возможностью изменять эти свойства в широких пределах в зависимости от состава стекла и способов термического воздействия, а также способностью стекла легко поддаваться разным способам горячей и холодной обработки.

Кварцевое стекло, состоящее практически из чистого кремнезема (99 % SiO_2), в зависимости от способа получения бывает двух типов: оптически прозрачное и непрозрачное. Кварцевое стекло отличается от всех известных стекол высокими физико-химическими свойствами: высокой жаростойкостью (1400°C), низким температурным коэффициентом линейного расширения [$(0,5 - 0,55) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$], высокой термической (выдерживает перепад температур $800 - 1000^\circ\text{C}$) и химической стойкостью, особенно к действию кислот (кроме плавиковой) и воды. Кварцевое стекло имеет высокие диэлектрические характеристики, прозрачно в видимой, ультрафиолетовой и частично инфракрасной областях. Кварцевое стекло, имеющее особенно высокую термическую и химическую стойкость в сочетании с низким температурным коэффициентом линейного расширения, применяется для изготовления тиглей, термопар, электровакуумных изделий, химически стойкой тары, труб, лабораторной посуды. Для защиты деталей от коррозии при температурах до $500 - 600^\circ\text{C}$ в машиностроении применяют стеклоэмали.

Пеностекло получают вспениванием жидкой стекольной массы при высокой температуре за счет введения газотворных веществ – измельченных известняка, мела, угля. Пеностекло имеет малую плотность, низкую теплопроводность и характеризуется высоким звукопоглощением. Это негорючий, термостойкий и химически стойкий материал.

Стеклокристаллические материалы (ситаллы) получают из стекла путем его полной или частичной кристаллизации. Название «ситаллы» образовано из слов «стекло» и «кристаллы». Ситаллы иногда называют стеклокерамикой. Содержание кристаллической фазы в ситаллах может составлять до 95 %. Размер кристаллов обычно не превышает $1 - 2 \text{ мкм}$.

Ситаллы – плотные, непрозрачные, газонепроницаемые, жесткие и твердые материалы. Их механическая прочность в 2



– 3 раза выше, чем прочность стекла. Они хорошо сопротивляются абразивному износу. Сочетание низкого температурного коэффициента линейного расширения и высокой механической прочности придает им высокую термостойкость. Ситаллы характеризуются высокой химической стойкостью к действию кислот и щелочей и не подвержены коррозии при нагреве до высоких температур. Ситаллы совершенно не поглощают влагу.

Благодаря сочетанию легкости, прочности, твердости и технологичности ситаллы находят широкое применение в машиностроении. Из них изготавливают подшипники скольжения, работающие без смазки при температуре до 550°C, поршни и детали выхлопа двигателей внутреннего старания, химическую аппаратуру» фильеры для вытягивания синтетических волокон, рабочие колеса и лопатки насосов, перекачивающих агрессивные жидкости с абразивами. Ситаллы используют в качестве жаро- и износостойких эмалей для защиты металлических деталей. Ситалловые эмали могут работать при температурах до 800 – 900°C.

ПОКРЫТИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Общая характеристика покрытий и способов их нанесения

В зависимости от требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам деталей, различают три вида покрытий:

защитные покрытия, назначением которых является защита от коррозии деталей в различных агрессивных средах, в том числе при высоких температурах;

защитно-декоративные покрытия, служащие для декоративной отделки деталей с одновременной защитой их от коррозии;

специальные покрытия, применяемые с целью придания поверхности специальных свойств (износостойкости, твердости, электроизоляционных, магнитных свойств и др.), а также восстановления изношенных деталей.

Для оценки сопротивления покрытия коррозии обычно применяют испытания, при которых коррозионная нагрузка на деталь близка к условиям ее эксплуатации. Эффективность сопротивления коррозии определяется по растворению покрытия и взвешиванию.

Горячее погружение в расплав – один из самых старых методов нанесения покрытий. Металлы ванны имеют низкую температуру плавления – это цинк, олово, алюминий. Они обеспечивают защиту основного металла от коррозии.

Напыление осуществляется мелкими частицами



териала, образующимися при пропускании проволоки или порошка через кислородно-ацетиленовое пламя, с последующим осаждением на холодную основу. Для нагрева можно использовать электродуговую или плазменную металлизацию. Это способствует улучшению адгезии и снижению пористости покрытия.

Наплавка осуществляется сплавлением осаждаемого материала с поверхностным слоем основы. Наплавка широко применяется для ремонта отдельных деталей, поврежденных или износившихся в процессе эксплуатации. Для нанесения покрытий методом наплавки могут использоваться все основные сварочные процессы: газопламенный, электродуговой, плазменный, электроннолучевой и др.

Электрохимическое осаждение металлов из растворов солей обычно применяется для получения гальванических покрытий из хрома и никеля толщиной 0,12 – 0,60 мм.

Электролитическое нанесение покрытий из сплавов Ni – P и Ni – В осуществляется вследствие химического взаимодействия. В этом случае покрытия формируются по всей поверхности деталей с одинаковой скоростью толщиной до 0,12 мм, тогда как гальванические покрытия прежде всего формируются на выступающих местах – кромках, ребрах, гранях.

Химико-паровое осаждение, или процесс CVD (chemical vapour deposition), является процессом, при котором устойчивые продукты реакции зарождаются и растут на подложке в среде с протекающими в ней химическими реакциями (диссоциация, восстановление и др.). Благодаря высокой температуре на поверхности образуются очень тонкие слои, например, карбида или нитрида титана. CVD-процесс используется для нанесения покрытий на инструмент и штампы.

Физическое осаждение из паровой фазы (physical vapour deposition, PVD) протекает в несколько стадий:

- 1) нагрев материала в вакууме до испарения;
- 2) перенос паров от источника к подложке;
- 3) конденсация паров на основе – подложке.

Метод PVD обладает высокой гибкостью, и с его помощью можно наносить любые металлы, сплавы, оксиды, карбиды и нитриды. Например, его с успехом применяют для нанесения износостойкой пленки TiN на стальной инструмент. Достоинством метода PVD является высокая чистота поверхности и превосходная связь с основой.

Механическое нанесение покрытий используют для получения цинковых, кадмиевых и оловокадмиевых покрытий.



Новые конструкционные материалы

Детали перемешивают в сосудах с соответствующими тонкими металлическими порошками, активаторами и стеклянными шариками.

Ионная имплантация предусматривает ионизацию атомов с последующим ускорением ионов в электрическом поле в вакууме.

Ионы тормозятся при соударении с мишенью и распределяются по глубине мишени. Хотя глубина проникновения ионов обычно не превышает 0,1 – 0,2 мкм, свойства металла могут меняться существенно.

Цинковые покрытия

Среди методов, улучшающих антикоррозионные свойства, цинкование занимает первое место. Ежегодно в мире оцинковывается около 25 млн. т стали. Основными методами для нанесения цинковых покрытий на сталь являются электролитический и погружение в расплав (огневое или горячее цинкование). Хотя в качестве материала основы можно использовать любые марки, для цинкования обычно применяют углеродистые и низколегированные стали. Цинковые покрытия характеризуются коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, в пресной воде и в закрытых помещениях с умеренной влажностью.

Цинковые покрытия имеют удовлетворительную поверхность твердость, износостойкость, водостойкость, прочность на изгиб. Долговечность оцинкованных труб зависит от толщины покрытия. Для серийно выпускаемых труб на 1 м² расходуется 400 г цинка, толщина покрытия составляет 43 – 46 мкм. Отечественная промышленность выпускает оцинкованные водогазопроводные трубы диаметром 10 – 159 мм, длиной до 8 м.

Скорость коррозии оцинкованных труб в 3 – 4 раза ниже, чем у стальных труб без покрытия в одних и тех же агрессивных средах. Для повышения коррозионной стойкости оцинкованных листов в состав цинкового покрытия вводят медь (0,08 – 0,82%) и алюминий (до 1 %). Коррозионная стойкость листов с электролитическим покрытием ниже, чем горячеоцинкованных. Для повышения коррозионной стойкости оцинкованного листа его дополнительно покрывают лакокрасочным или цветным полимерным покрытием.

Цинковые покрытия применяют для защиты от коррозии запорной арматуры и подземных трубопроводов сточной воды и воды, используемой для технических целей.

Соединения цинка токсичны и при нагреве неустойчивы в кислотах. Цинковые покрытия не применяют для защиты от



коррозии деталей, находящихся в непосредственном контакте с пищевыми продуктами.

Алюминиевые покрытия

Для стальных деталей с алюминиевым покрытием характерно сочетание высокой прочности и коррозионной стойкости. Нанесение покрытий производят путем горячего алюминирования в расплавах (алитирование), плакированием стальных листов и напылением в вакууме. Среди способов покрытия стальных листов алюминием наибольшее распространение имеет горячее алюминирование.

Коррозионная стойкость стальных деталей с алюминиевым покрытием обусловлена высокими защитными свойствами образующейся на поверхности пленки Al_2O_3 толщиной менее 0,1 мкм. Этот оксидный слой отличается высокой плотностью и при повреждении быстро образуется заново. Защитное действие пленки оксида алюминия на алюминиевом покрытии особенно сильно выражено при высокотемпературном нагреве.

Алюминиевые покрытия устойчивы в водных растворах агрессивных пищевых сред и органических кислот. Нетоксичность, инертность ко многим средам, хорошие грунтовочные свойства для последующего нанесения полимерных и стеклоэмалевых покрытий обуславливают достаточно широкое применение алюминиевых покрытий в разных отраслях машиностроения.

Оловянные и хромсодержащие покрытия

Покрытие оловом производят методами погружения в расплав и электролитическим осаждением. При погружении стальных и чугунных изделий в расплав на поверхности образуется тонкий слой соединения $FeSn_2$, над которым после вытягивания из расплава затвердевает более толстый слой олова. Более широко используют метод электролитического лужения. Листовой прокат, полученный этим методом, толщиной менее 0,5 мм, называют белой жестью. Толщина оловянных покрытий составляет 30 – 35 мкм.

В качестве заменителя белой жести применяется холоднокатаный тончайший лист, который покрыт электролитически нанесенным покрытием оксида хрома. Оловянные покрытия широко применяются в различных отраслях техники, прежде всего в пищевой и мясомолочной промышленности, особенно для защиты от коррозии различных стальных емкостей типа баков, цистерн, фляг. Оловом защищают не только стальные, но и медные емкости.

Электролитически хромированную жесть используют вместо белой жести при изготовлении упаковочной тары для



Новые конструкционные материалы

консервов (овощных, молочных, мясных, рыбных), а также фруктовых соков, пива, безалкогольных напитков, при производстве крышек для стеклотары и колпачков для бутылок, тары для упаковки сухих пищевых продуктов.

Покрытия плакированием

При плакировании происходит послойное соединение стали с одним или многими металлами с образованием многослойного материала. Плакирование осуществляется разными методами. Используют процессы горячей и холодной прокатки, метод двухслойного литья заготовок, плакирование взрывом и наплавку плакирующего слоя.

В качестве материала для плакирования низколегированных сталей применяют коррозионностойкие ферритные или аустенитные стали, медь и никель или их сплавы, а также алюминий, титан, ниобий или молибден. При плакировании коррозионностойкой сталью предварительно создают гальваническое никелевое покрытие. Этим устраняется окисление горячей стали перед прокаткой и одновременно интенсифицируются процессы диффузионного сваривания, необходимые для сцепления материалов.

Биметаллы являются не только заменителями однородных дорогостоящих материалов. Во многих случаях благодаря сочетанию свойств своих компонентов они имеют более благоприятные показатели, чем однородные дорогостоящие материалы сами по себе.

Плакированные изделия отличаются более высокой прочностью. При использовании в качестве основного материала сталей с высоким пределом текучести может быть снижена масса изделия и получена дополнительная экономия металла по сравнению с требуемым количеством при изготовлении тех же изделий целиком из нержавеющей сталей.

Осаждение в вакууме или из газовой фазы

Ранее отмечалось, что в основе технологии напыления металлических сплавов в вакууме лежит принцип испарения за счет нагрева и понижения давления и конденсация на материале основы с получением заданного слоя. Высокий вакуум благоприятствует процессу испарения. Для эффективного протекания процесса конденсации изделие, на которое наносится покрытие, должно интенсивно охлаждаться.

При осаждении металлов из газовой фазы на стальную поверхность используют свойство некоторых металлов легко образовывать летучие галогениды, которые вступают в реакцию с железом на стальной поверхности. При этом металл покры-



тия становится свободным и может диффундировать в глубь стальной детали. Наряду с алюминием, для осаждения из газовой фазы используется также хром и кремний.

Высокое содержание хрома на поверхности (до 25 %) придает материалу отличную стойкость против окисления и коррозии.

Неметаллические покрытия

Неорганические покрытия и способы их нанесения

К неорганическим неметаллическим материалам, применяемым для защиты от коррозии металлических поверхностей, относятся эмали, стекло и цемент.

Эмалью называют стекловидную застывшую массу, полученную в результате полного или частичного расплавления и состоящую в основном из кварца и других оксидов. На изделие эмаль наносят одним или несколькими слоями.

Различают два основных способа эмалирования. Наряду с эмалированием, при котором изделие покрывается грунтовкой и покровными эмалями и при этом дважды обжигается, широко используется в последние годы однослойное прямое эмалирование, при котором слой эмали (0,2 – 0,3 мм) может быть уменьшен наполовину. При специальном эмалировании, применяемом в химическом и пищевом машиностроении, обычно наносится многослойная эмаль.

Перед нанесением эмали поверхность стальной детали должна быть обезжирена и протравлена. При этом удаляется некоторое количество металла и поверхность листа становится шероховатой, что способствует адгезии эмалевого покрытия.

С целью снижения пористости при обжиге за счет образования CO_2 для эмалирования применяют низкоуглеродистые стали.

Стеклоэмалевое покрытие обладает не только высокой химической стойкостью, износостойкостью, но и обеспечивает незначительное налипание остатков продукта, благодаря чему аппаратура легко моется. Покрытие имеет высокую адгезию к металлу. Общая толщина эмалевого покрытия 0,8 – 1,0 мм.

При эксплуатации эмалированной аппаратуры не допускается превышать давление или резко повышать его даже в пределах рабочего давления, резко нагревать и заполнять переохлажденным продуктом или водой, производить местные термические и механические воздействия, оставлять аппараты открытыми, использовать в качестве моющих и дезинфицирующих средств щелочные растворы.



Недостатки стеклоэмалевых покрытий: чувствительность к ударам, резкой смене температуры, местным перегревам, воздействию щелочей.

Высокую долговечность водопроводных труб обеспечивают цементные покрытия. Для покрытий используется портландцемент с наполнителем в виде мелкого песка.

Органические полимерные покрытия

Рассмотренные выше методы защиты металлов от коррозии более дороги, менее эффективны, и возможности их ограничены. Поэтому использование органических покрытий по-прежнему остается важным средством борьбы с коррозией.

Полимерные покрытия не только защищают металлы от воздействия агрессивных сред, но и повышают их износостойкость, снижая прилипаемость различных веществ к рабочим поверхностям, позволяют экономить цветные металлы и другие дефицитные материалы.

В различных областях промышленности для защиты внутренних поверхностей аппаратов, трубопроводов и арматуры применяются винилхлоридные, фторопластовые, пентапластовые, полиолефиновые, полиуретановые, феноло-формальдегидные, кремнийорганические, каучуковые, эпоксидные и другие покрытия.

Полиолефиновые покрытия. К наиболее распространенным полиолефинам относятся полиэтилен, полипропилен и их сополимеры.

Покрытия из полиолефинов отличаются высокой химической стойкостью к действию многих агрессивных сред. Полиэтилен используют в качестве упаковочного материала для хранения продуктов и получения антикоррозионных покрытий. Свойства полиэтилена и полипропилена практически не меняются при воздействии концентрированными соляной и серной кислотами при 20°C, а также растворами щелочей. Однако органические растворители при комнатной температуре вызывают некоторое набухание, а при температурах выше 100 – 120°C растворяют полиолефины.

Полиолефины имеют низкую проницаемость по отношению к жидким и газообразным агрессивным средам.

Полиолефины используются для нанесения покрытий почти всеми известными методами, включая напыление порошкообразных полимеров, плакирование пленками и листами, футерование литьем под давлением, а также формирование покрытий из дисперсий в водноорганических средах.



Новые конструкционные материалы

Полиамиды. К полиамам относятся капрон и капролон. Покрытия из полиамидов обладают высокими антифрикционными характеристиками. По износостойкости при сухом и жидкостном трении полиамиды превосходят не только другие классы полимеров, но и многие металлы, применяющиеся в антифрикционных целях. Низкий коэффициент трения при высоких нагрузках позволяет использовать полиамиды в тяжело нагруженных узлах трения, о чем свидетельствуют значения коэффициентов трения покрытий из полиамидов при трении со смазкой по стали. Недостатком полиамидных покрытий является склонность к старению и значительное водопоглощение. С повышением температуры гигроскопичность возрастает.

Полиамидные покрытия наносят на поверхность изделий напылением порошков, литьем под давлением, а также из растворов.

Следует отметить низкую стойкость полиамидов к окислению, что препятствует длительной эксплуатации полиамидных покрытий на воздухе при температурах выше 60 – 100°C. В целях повышения термостабильности полиамидов применяют различные стабилизирующие добавки органического и минерального происхождения. Для улучшения адгезионных и когезионных свойств, повышения эксплуатационных характеристик в покрытия из полиамидов вводят различные наполнители. Введение небольших количеств оксидов титана, меди, железа, свинца и алюминия способствует росту прочности и твердости, несущей способности и износостойкости покрытий при незначительном изменении коэффициента трения. Повышение теплостойкости и несущей способности подшипников с полиамидными покрытиями достигается введением порошков металлов (алюминия, свинца, бронзы и др.). Снижению коэффициента трения также способствует добавка фторопласта-4, дисульфида молибдена, графита.

Модифицированные покрытия на основе полиамидных слоев применяют для изготовления таких деталей как шестерни, подшипники и т. д. Полиамидные смолы используют для получения защитных покрытий, а полиамидные порошки – для нанесения тонкого антифрикционного износостойкого покрытия.

Поливинилхлорид (ПВХ). Благодаря низкой стоимости сырья, высокой химической стойкости, хорошим физико-механическим и удовлетворительным электрическим свойствам, ПВХ является самым распространенным материалом, применяющимся для создания защитно-декоративных, химически стойких и электроизоляционных покрытий.



Новые конструкционные материалы

В состав поливинилхлоридных композиций, предназначенных для покрытий, помимо пластификаторов, входят стабилизаторы, наполнители, смазки, пигменты и другие добавки, концентрация и природа которых оказывают существенное влияние на свойства покрытий.

Материалом для покрытий в основном служит пластифицированный поливинилхлорид, реже используется непластифицированный ПВХ, типичным представителем которого является винипласт. Листовой и пленочный винипласт применяются в химической промышленности для футеровки металлической аппаратуры и трубопроводов, эксплуатирующихся в агрессивных средах.

Пластифицированный поливинилхлорид обычно наносят на поверхность обрабатываемых деталей в виде порошка или пленки.

Высокая химическая стойкость поливинилхлорида позволяет успешно использовать покрытия на его основе в агрессивных средах.

Поливинилхлорид является основным компонентом для изготовления лакокрасочных материалов. Путем обработки ПВХ получают винипласт, листы которого легко поддаются механической обработке и хорошо свариваются. Это позволяет использовать их для нанесения сплошного покрытия на фундаменты, цокольные части и другие конструкции. Поливинилхлоридный пластикат применяют как обкладочный материал для защиты аппаратуры от коррозии, устройств полов в помещениях, где требуется герметичность. Для устройства химически стойких полов, а также для гидроизоляции используют поливинилхлоридную пленку.

Пентапласт обладает высокой водостойкостью, прочностью, низким коэффициентом трения по стали. Он стоек к воздействию грибковой плесени, устойчив к воздействию растворов щелочей, кислот и солей.

Пентапласт наносят на поверхность защищаемых изделий в порошкообразном виде и из дисперсий в органических средах. Кроме того, производится защита изделий футеровочными листами и готовыми вкладышами из пентапласта.

Фторопласты. Для изготовления различных деталей и для защитных покрытий применяются фторопласт-4 и фторопласт-3. Фторопластовые покрытия исключительно устойчивы к агрессивным средам и в этом отношении превосходят даже благородные металлы и сплавы. На покрытия из фторопласта-4 не действуют окислительные среды, включая и царскую водку, кипящие ще-



Новые конструкционные материалы

лочи, растворы солей. Фторопластовые покрытия вполне устойчивы по отношению к жирам, маслам, влаге, кислотам и т. д.

Покрытия из фторопластов применяют для защиты различных технологических емкостей.

Кремнийорганические полимеры отличаются многими ценными свойствами, из которых наиболее характерны термостойкость, а также стойкость к воздействию целого ряда химических агентов и растворителей. По термостойкости они значительно превосходят органические полимеры.

Кремнийорганические полимеры сравнительно инертны по отношению к большинству реагентов за исключением сильных оснований и концентрированных кислот. Разбавленные сильные кислоты и щелочи, а также слабые кислоты и основания оказывают на них незначительное действие.

К недостаткам кремнийорганических полимеров следует отнести их невысокую химическую стойкость к действию органических растворителей и окислительных сред.

Эпоксидные смолы в своем составе имеют реакционноспособные эпоксидные и гидроксильные группы, способные вступать в химические реакции с различными веществами с образованием более сложных соединений. При введении в них отвердителей холодного или горячего отверждения такие смолы способны переходить в неплавкое и нерастворимое состояние. В качестве отвердителей могут применяться органические и неорганические кислоты, ангидриды кислот, амины и амиды, а также синтетические смолы.

Свои ценные физико-механические свойства эпоксидные смолы приобретают при взаимодействии с отвердителями. Отвердители аминного типа выполняют функции сшивающих реагентов. Реакционноспособные группы отвердителей взаимодействуют с эпоксидными группами смолы. Скорость процесса отверждения зависит от температуры. Некоторые отвердители реагируют со смолой при комнатной температуре, другие – лишь при нагревании. Наиболее полное отверждение полиаминами достигается при температуре выше 100°C. Долговечность материалов, полученных отверждением при комнатной температуре, ограничена. Материалы, полученные отверждением эпоксидной смолы при нагревании, более долговечны.

На основе эпоксидных смол изготавливают лакокрасочные материалы, применяемые для защитных покрытий.

Покрытия на основе эпоксидных смол с такими наполнителями, как уголь, графит, кремнезем, кварцевая мука,



измельченный мрамор, в пищевой промышленности использовать нельзя по санитарным нормам.

Для защиты сепараторов перспективны комплексные покрытия, состоящие из одного слоя грунта, двух слоев эмали и одного слоя лака на основе эпоксидной смолы. Отвержденное покрытие промывается раствором уксусной кислоты, затем раствором соды и ополаскивается водой. Полимерные покрытия на основе виниловых, каучуковых и эпоксидных смол применяются для защиты сепараторов, в которых технологические процессы протекают под избыточным давлением.

Для защиты некоторых железобетонных (бетонных) внутренних поверхностей стационарных баков используют эпоксидное покрытие, состоящее из 82 % смолы, 13 % этилового спирта и 5 % полиэтиленполиамиона. Покрытие затвердевает при комнатной температуре, но для ускорения процесса повышают температуру до 70°C. Перед нанесением покрытия железобетонная поверхность обязательно должна быть хорошо очищена, просушена и прогрета электрообогревателем любого типа. Покрытие четырехслойное, общей толщиной до 0,6 – 0,8 мм. Эпоксидные смолы также используют для защиты внутренней поверхности железных чанов и цистерн.

Для защиты железобетонных емкостей, применяемых для хранения пищевых продуктов, используют трехслойное эпоксидное покрытие: первый слой грунта и два покровных слоя. Сушка каждого слоя осуществляется в воздушно-сухих условиях в течение 24 ч с последующей сушкой всех трех слоев в течение 28 суток. Высушенное покрытие промывают раствором соды с последующим ополаскиванием.

Резиновые покрытия. В качестве материалов для покрытий применяются резины на основе натурального и синтетических каучуков. В состав композиций входят стабилизаторы, вулканизирующие агенты и другие добавки. В процессе вулканизации образуется трехмерная структура, обеспечивающая покрытиям хорошие механические свойства.

Для футеровки изделий простой формы используют листовые материалы из сырой резины с последующей вулканизацией на подложке. Для защиты изделий сложной конфигурации находят применение жидкие материалы в виде дисперсий или растворов.

Высокой эластичностью и хорошими адгезионными свойствами обладают покрытия из резин на основе натурального кау-



Новые конструкционные материалы

чука, которые используются для защиты от минеральных кислот и щелочей.

Мягкие резины в основном применяются для покрытия различных аппаратов, деталей, цистерн, труб. Они представляют собой полимерные композиции сложного состава на основе эластомеров линейного или разветвленного строения (каучуков) в виде латексов или клеев.

Например, для футеровки емкостей внутреннюю поверхность подвергают дробеструйной обработке и оклеивают листовой смесью резины с феноло-формальдегидной смолой. После этого поверхность облицовывают кислотоупорной плиткой на диабазовой замазке.

Разработку теплостойких резин ведут с учетом специфики свойств агрессивных сред. Наибольший интерес представляют жидкие силоксановые каучуки, которые обладают высокой теплостойкостью (до 250°C) и нетоксичны.

Благодаря высокой сопротивляемости истиранию резины применяют для аппаратов, работающих с жидкостями, содержащими взвешенные вещества (насосы, трубопроводы). Иногда применяют твердые резины – эбониты. Эбониты по сравнению с резинами имеют более высокую химическую стойкость.

Износостойкие покрытия. Одним из необходимых условий при выборе материалов для покрытий является высокая износостойкость защитных покрытий.

Полимерные покрытия являются эффективным средством для повышения износостойкости. Долговечность покрытий зависит от плотности материалов, из которых они изготовлены, их адгезионной способности к подложке, трибометрических свойств, равномерности распределения в них модификаторов и наполнителей. Большинство полимерных материалов характеризуется высокой износостойкостью. Использование тонких полимерных слоев в сочетании с теплостойкостью металлического основания позволяет создавать надежно работающие износостойкие покрытия.

С повышением молекулярной массы и регулярности макромолекул в ряду одного типа полимера износостойкость покрытий увеличивается. Свойства износостойких покрытий во многом определяются составом композиции, изменяя который можно регулировать износостойкие характеристики в широких пределах и получать покрытия различного назначения как с низким, так и с высоким коэффициентом трения.

Чаще других полимеров для износостойких покрытий используют полиуретаны, пен-тапласт, политетрафторэтилен,



Новые конструкционные материалы

полиамиды, эпоксидные композиции. Хорошо противостоят абразивному износу, например, трубы, покрытые изнутри полиуретаном.

Покрытия на основе ненаполненных полиуретановых эластомеров по стойкости к абразивной эрозии превосходят ряд марок нержавеющей стали. Одним из перспективных износостойких материалов является поливинилденфторид (ПВДФ). Он применяется как в качестве покрытий и футеровок элементов насосных агрегатов, так и для изготовления насосов для перекачивания агрессивных сред.

Одним из рациональных способов повышения износостойкости покрытий является модифицирование полимерных композиций неорганическими и минеральными наполнителями, например дисульфидом молибдена, тальком, аморфным бором, корундом, оксидом цинка, карбидом кремния и др.

Сжижению износа покрытий способствует наполнение полимерных композиций стекловолокном, графитом, цементом, асбестом, маршаллитом, повышающими прочность, теплостойкость и другие характеристики полимеров.

Перспективно использование полимерного износостойкого покрытия на основе эпоксидной смолы и шламов – отходов предприятий черной металлургии с содержанием общего железа более 60 %. Использование шламов расширяет сырьевую базу, удешевляет стоимость покрытия и повышает его физико-механические свойства в условиях воздействия коррозионно-эрозионных сред.



РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И КОНТРОЛЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ



Общие положения.

Внедрение в практику учебных программ с повышенной долей самостоятельной работы студентов активно способствует модернизации учебного процесса.

В настоящее время актуальными являются требования к личностным качествам студента, касающиеся умения самостоятельно пополнять объем знаний, вести самостоятельный поиск необходимых учебных, научно-методических материалов. Решение этой задачи невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов над учебным материалом. Важная роль в развитии навыков самостоятельной работы отводится преподавателю, отвечающему за организацию и контроль самостоятельной работы студентов.

1. Цель, функции и виды самостоятельной работы студентов

Цель организации и контроля самостоятельной работы студентов определяется необходимостью разрешения противоречия между трансляцией знаний и их усвоением во взаимосвязи теории и практики.

Функции самостоятельной работы: развивающая, информационно-обучающая, ориентирующая и стимулирующая, воспитательная, исследовательская.

В основе самостоятельной работы студентов лежат принципы: самостоятельности, развивающие творческую направленность и целевого планирования.

Самостоятельная работа студентов способствует:

— систематизации и закреплению полученных теоретических знаний и практических умений студентов;

— углублению и расширению теоретических знаний;

— формированию умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;

— развитию познавательных способностей и активности студентов, творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;

— формированию самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;

— развитию исследовательских умений.



Новые конструкционные материалы

В этой связи студенты на основе плана самостоятельной работы должны решать следующие задачи:

- изучить рекомендуемые литературные источники, включая поиск в сети Интернет;
- изучить основные понятия, представленные в глоссарии;
- ответить на контрольные вопросы;
- решить предложенные задачи;
- выполнить контрольные задания.

Работа студентов в основном складывается из следующих элементов:

Изучение и усвоение в соответствии с учебным планом материала по учебной дисциплине, выполнение письменных работ, подготовка и сдача промежуточных рейтингов и итоговой аттестации.

Самостоятельная работа включает следующие формы:

-индивидуальное занятие (домашние занятия) - важный элемент в работе студента по расширению и закреплению знаний;

- конспектирование лекций;
- получение консультаций для разъяснений по вопросам изучаемой дисциплины;
- подготовка ответов на вопросы тестов;
- подготовка к экзамену;
- подготовка научных докладов, рефератов и др.

Содержание внеаудиторной самостоятельной работы определяется в соответствии с рекомендуемыми видами заданий согласно рабочей программе учебной дисциплины. Распределение объема времени в режиме дня на внеаудиторную самостоятельную работу студента не регламентируется расписанием.

Видами заданий для внеаудиторной самостоятельной работы могут быть:

Для овладения знаниями:

- чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы);
- составление плана текста;
- графическое изображение структуры текста;
- конспектирование текста;
- выписки из текста;



Новые конструкционные материалы

- работа со словарями и справочниками;
- ознакомление с нормативными документами;
- исследовательская работа;
- использование аудио- и видеозаписи;
- работа с электронными информационными ресурсами и ресурсами Internet;

Для закрепления и систематизации знаний:

- работа с конспектом лекции (обработка текста);
- повторная работа над учебным материалом (учебника, первоисточника, дополнительной литературы, аудио и видеозаписей);
- составление плана и тезисов ответа;
- составление альбомов, схем, таблиц для систематизации учебного материала; изучение нормативных документов;
- выполнение тестовых заданий;
- ответы на контрольные вопросы;
- аннотирование, реферирование, рецензирование текста;
- подготовка сообщений к выступлению на семинаре, конференции; подготовка рефератов, докладов;
- составление глоссария или библиографии по конкретной теме;
- работа с компьютерными программами;
- подготовка к сдаче экзамена;

Для формирования умений:

- решение задач и упражнений по образцу;
- решение вариативных задач и упражнений;
- выполнение чертежей, схем;
- решение ситуационных производственных (профессиональных) задач;
- подготовка к деловым играм;
- участие в научных и практических конференциях;
- составление памяток, рекомендаций, советов;
- экспериментальная работа, участие в НИР;
- подготовка рейтинговых работ.

Правильная организация самостоятельных учебных занятий, их систематичность, целесообразное планирование рабочего времени позволяет привить студентам умения и навыки в овладении, изучении, усвоении и систематизации приобретаемых знаний в процессе обучения, обеспечивать высокий уровень успеваемости в период обучения, привить навыки повышения профессионального уровня в течении всей трудовой деятельности.



2. Планирование самостоятельной работы студента

В учебном процессе ДГТУ выделяют два вида самостоятельной работы: аудиторная и внеаудиторная. Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданиям. Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется студентом по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия.

Сущность самостоятельной работы студентов, как специфической педагогической конструкции определяется особенностями поставленных в ней учебно-познавательных задач. Следовательно, самостоятельная работа - не просто самостоятельная деятельность учащегося по усвоению учебного материала, а особая система условий обучения, организуемая преподавателем.

При планировании внеаудиторной самостоятельной работы студентов особое внимание уделено: нормам времени, затрачиваемым на выполнение отдельных типовых заданий; соответствию планируемой трудности реальному еженедельному бюджету времени студентов; равномерности нагрузки на протяжении всего учебного года (скоординированы сроки выполнения заданий и контрольные мероприятия с другими параллельно изучаемыми дисциплинами).

Организация внеаудиторной самостоятельной работы студентов

Приступая к изучению дисциплины, студент должен внимательно ознакомиться с методическими рекомендациями по освоению учебной дисциплины, требованиями программы по данному курсу.

Методическими материалами, направляющими самостоятельную работу студентов являются:

- основная образовательная программа направления;
- методические указания к лабораторным занятиям;
- часть учебно-методического комплекса по дисциплине (примеры решения домашних заданий, оформления рабочих тетрадей и отчетов по лабораторным работам, использования электронных информационных ресурсов);
- методические указания по выполнению работ;



Новые конструкционные материалы

-списки основной и дополнительной литературы в рабочей программе дисциплины.

Методические указания обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой. Все это облегчают подготовку к выполнению всех видов работ и сдаче экзаменов.

Эффективность всей самостоятельной работы студентов во многом определяется уровнем самоконтроля. Основным объектом самоконтроля студентов в системе их труда могут быть: планирование самостоятельной работы и выполнение индивидуального плана; изучение предмета в соответствии с тематическим планом учебной программы; выполнение контрольных, тестовых и иных работ.

Организация самостоятельной работы включает в себя следующие этапы:

Составление плана самостоятельной работы студента по дисциплине.

Разработка и выдача заданий для самостоятельной работы.

Организация консультаций по выполнению заданий (устный инструктаж, письменная инструкция).

Контроль выполнения и результатов самостоятельной работы студента

При составлении плана самостоятельной работы обязательно указывается количество часов, выделенных на каждую тему. При этом ряд тем могут быть полностью отнесены на самостоятельную работу, другие могут содержать минимум самостоятельной работы или вовсе не содержать ее. Некоторые темы могут быть переадресованы к изучению самостоятельного курса, тем самым выдерживается междисциплинарная связь учебного процесса.

Заданиями для самостоятельной работы студентов, которые разрабатываются преподавателем, могут быть ссылки на конкретный учебник, сборник задач, учебное пособие, нормативно-справочную литературу.

Перед выполнением студентами внеаудиторной самостоятельной работы преподаватель проводит инструктаж по выполнению задания, который включает цель задания, его содержание, сроки выполнения, ориентировочный объем работы, основные требования к результатам работы, критерии оценки. В процессе инструктажа преподаватель предупреждает студентов о



возможных типичных ошибках, встречающихся при выполнении задания. Инструктаж проводится преподавателем за счет объема времени, отведенного на изучение дисциплины.

Средства для организации самостоятельной работы: рабочие тетради, бланки заданий, тексты, конспекты лекций, сборники задач, учебные пособия, таблицы, схемы, тесты, компьютерные классы, лаборатории и методические кабинеты.

Управление самостоятельной работой студентов

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов может осуществляться в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине и внеаудиторную самостоятельную работу студентов по дисциплине, может проходить в письменной, устной или смешанной форме, с представлением продукта творческой деятельности студента.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы семинарские занятия, зачеты, тестирование, самоотчеты, контрольные работы, защита творческих работ и др.

Контроль самостоятельной работы студента может быть установлен в следующих формах:

- включение предлагаемого для изучения вопроса в перечень вопросов экзаменационных билетов;
- тестовый контроль;
- защита письменных работ, в том числе рефератов, курсовых и контрольных работ;
- выступление на семинарском занятии, конференции и т.п.

Критерии оценки письменных работ:

- требуемый объем и структура работы;
- логика изложения материала;
- использование соответствующей терминологии, стиля изложения;
- повествование от третьего лица;
- наличие ссылок на источники информации;
- постановка вопросов и степень их раскрытия;
- выполнение необходимых расчетов;
- формулировка выводов по итогам работы.

В случае несоответствия письменной работы студента указанным критериям найденные расхождения должны быть отра-



Новые конструкционные материалы

жены в рецензии и приняты во внимание при выставлении оценки студенту за работу.

Критериями оценок результатов внеаудиторной самостоятельной работы студента являются:

- уровень освоения студентами учебного материала.
- умения студента использовать теоретические знания при выполнении практических задач.

- обоснованность и четкость изложения ответа.

Управление самостоятельной работой студентов осуществляется через различные формы контроля и обучения:

- Консультации (установочные, тематические), в ходе которых студенты должны осмысливать полученную информацию, а преподаватель определить степень понимания темы и оказать необходимую помощь.

- Следящий контроль осуществляется на лекциях, семинарских, практических и лабораторных занятиях. Он проводится в форме собеседования, устных ответов студентов, контрольных работ, тестов, организации дискуссий и диспутов, фронтальных опросов. Преподаватель фронтально просматривает наличие письменных работ, упражнений, задач, конспектов.

- Текущий контроль осуществляется в ходе проверки и анализа отдельных видов самостоятельных работ, выполненных во внеаудиторное время. Это, как правило, работы индивидуального характера: доклады, рефераты и иные работы.

- Итоговый контроль осуществляется через систему зачетов и экзаменов, предусмотренных учебным планом. Формы контроля должны быть адекватны уровням усвоения: уровню понимания, воспроизведения, реконструкции, творчества. Наряду с устными ответами по экзаменационным билетам могут быть использованы письменные формы итогового контроля.



Новые конструкционные материалы

Календарно-тематический план самостоятельной работы студента по дисциплине " НКМ "

№ раздела	Название раздела	Время, отводимое на изучение раздела, час.	Виды учебной работы, рекомендуемое время на выполнение, час.	
1	2	3	4	5
1.	Введение. Классификация новых конструкционных материалов и их свойства. Порошковые материалы и способы изготовления изделий из порошков	12	Изучение теоретических материалов	5
			Ответы на вопросы для самопроверки	1
			Выполнение практического задания	5
			Промежуточное тестирование	1
2.	Современные неметаллические материалы. Полимеры и пластмассы.	12	Изучение теоретических материалов	5
			Ответы на вопросы для самопроверки	1
			Выполнение практических заданий	45
			Промежуточное	1
3.	Композиционные материалы. Сплавы специального назначения	12	Изучение теоретических материалов	5
			Ответы на вопросы для самопроверки	1
			Выполнение практических заданий	5
			Промежуточное	1
4.	Материалы для поверхностного упрочнения деталей и процессов соедине-	12	Изучение теоретических материалов	5
			Ответы на вопросы для самопроверки	1



Новые конструкционные материалы

	ния деталей		Выполнение практических заданий	5
			Промежуточное тестирование	1

Итого: 48 часа.

Каждое практическое занятие необходимо начинать с проработки перечня основных вопросов для обсуждения по конкретной теме, ответив на которые студент получает возможность более четко структурировать собственное понимание содержания отдельных переделов металлургического производства. Предполагается, что для этого студент будет использовать не только курс лекций, но и дополнительную литературу, список которой приведен в соответствующем разделе рабочей программы и рекомендуемого учебного пособия.

Для развития необходимых навыков в области получения и обработки материалов студенту может быть рекомендовано написание реферата по одному из разделов календарно-тематического плана.

Указания по написанию реферата.

Тема реферата, как правило, выдается студенту преподавателем с учетом дифференцированного подхода к знаниям, умениям и навыкам студента.

Типовая структура реферата включает: содержание работы, введение, основной раздел, разбитый на 3-4 подраздела, объемом не менее 5 и не более 10 стр. печатного текста каждый, заключение, список литературы, приложения (при необходимости).

Содержание должно включать порядковый перечень всех имеющихся в тексте реферата наименований разделов и подразделов, справа от которых необходимо указать номера страниц, на которых они начинаются.

Во введении (1-2 стр. печатного текста) реферата обосновывается актуальность исследуемой темы в теоретическом и практическом плане, определяется объект и предмет исследования, цель и задачи реферата.



Новые конструкционные материалы

В основной части (15-20 стр. печатного текста) реферата рассматривается научное содержание темы на основе обобщения литературных источников и дается анализ современного состояния исследуемого предмета. Студенту в реферате необходимо представить собственную оценку знаний по выбранной теме, которыми располагает современная наука, и привести примеры из практической деятельности зарубежных и российских организаций, подтверждающие выводы исследования. Выполняя работу, необходимо продемонстрировать умение правильно, кратко и четко излагать усвоенный материал, выделяя основные положения. Не следует включать материалы, не имеющие прямого отношения к рассматриваемой теме, что снижает ценность реферата.

В целом, между подразделами основной части реферата необходимы смысловые связки, чтобы текст был логически выстроен и не содержал разрывов в изложении материала.

В заключении (1-2 стр. печатного текста) реферата подводятся итоги исследования, формулируются основные выводы.

В списке литературы (не менее 5 источников) приводятся только те источники, которые реально были использованы в процессе написания реферата и с момента издания которых прошло не более десяти лет, по тексту работы обязательны ссылки на источники информации согласно данному списку литературы. В случае использования Internet и/или мультимедийных источников список литературы должен включать адрес электронного сайта и/или название мультимедийного диска.

Приложения позволяют облегчить восприятие работы и могут включать: дополнительные материалы, иллюстрации вспомогательного характера, анкеты, документы, содержащие первичную информацию и пр.

Оформление реферата должно соответствовать следующим основным требованиям.

Объем реферата - не менее 20 и не более 25 страниц печатного текста (кегель - 14, межстрочный интервал - 1,5, выравнивание по ширине, абзац, отступ - 1,25). Необходимо соблюдать равномерную плотность, контрастность и четкость изображения текста по всей работе, не должно быть помарок, подчеркиваний, сокращений слов, за исключением общепринятых.

Текст реферата располагается на одной стороне каждого листа белой бумаги формата А4 с соблюдением следующих размеров полей: верхнее и нижнее - 20 мм; левое - 30 мм; правое - 1,5 мм.



Каждая основная структурная часть реферата начинается с нового листа. Названия всех структурных частей располагаются на отдельных строках, пишутся симметрично основному тексту, отделяются от него 1-2 межстрочными интервалами и имеют порядковую нумерацию, обозначенную арабскими цифрами. Заголовки основных структурных частей печатаются прописными буквами, прочие заголовки - строчными буквами. Заголовки всех структурных частей не подчеркиваются, точка в конце названия не ставится, переносы слов не допускаются.

Страницы нумеруются арабскими цифрами в правом верхнем углу. На титульном листе и содержании номер страницы не ставится, но включается в общую нумерацию. Таким образом, впервые нумерация проставляется на листе введения как 3 страница работы.

Таблицы, рисунки, диаграммы должны иметь название, ссылку на источник, из которого заимствовались и сквозную нумерацию.

Ссылки на источники, используемые в тексте реферата, следует приводить непосредственно по тексту в квадратных скобках с указанием порядкового номера источника по списку использованной литературы и номера страницы, на которой в данном источнике находится заимствованный материал. В случае отсутствия ссылок при фактическом использовании материалов из сторонних источников, реферат к проверке приниматься не будет.

При оформлении списка использованной литературы применяется алфавитный способ группировки, то есть все источники, включая нормативные, законодательные акты, учебники, сборники, статьи и пр., располагаются в алфавитном порядке с учетом требований ГОСТ.

Приложения помещаются на страницах, следующих за списком использованной литературы, располагаются в порядке появления на них ссылок в тексте реферата. Каждое приложение должно начинаться с новой страницы, иметь содержательный заголовок и порядковый номер.

Реферат в большей степени носит теоретический характер, следовательно, важнейшее требование - самостоятельность его выполнения. Если в процессе рецензирования обнаружится, что это требование не соблюдено, работа будет возвращена на доработку.

Сроки сдачи рефератов. Так как сдача реферата является допуском к экзамену, то он должен быть сдан не позднее двух недель до проведения итоговой аттестации.



Указания по подготовке к текущему контролю знаний, промежуточной и итоговой аттестациям

Текущий контроль знаний по дисциплине «ТМП» предполагает прохождение тестов для самоконтроля.

Промежуточная аттестация по дисциплине может заключаться, в том числе, и в защите студентом реферата, подготовленного в соответствии календарно-тематическим планом дисциплины.

Список вопросов для подготовки к итоговой аттестации по дисциплине можно найти в папке УМКД «Оценочные материалы».

Указания к промежуточной и итоговой аттестациям с применением балльно-рейтинговой системы оценки знаний студента

Промежуточная и итоговая аттестации по дисциплине могут быть проведены по балльно-рейтинговой системе.

Примечание. За отличный ответ (работу) преподаватель может начислить премиальные 5 баллов, или, наоборот (за неудовлетворительный ответ, работу) уменьшить рейтинг на 5 баллов.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ
ДИСЦИПЛИНЫ**





Новые конструкционные материалы

При работе с настоящим учебно-методическим комплексом особое внимание следует обратить на тематический план дисциплины (Табл.1), в котором указана тематика лекционных занятий и их основное содержание.

Тематический план дисциплины

Таблица 1

Раздел (название)	Название темы, литература	Содержание
Введение. Классификация новых конструкционных материалов и их свойства	1.1 Классификация новых материалов [7.1.1] 1.2 Свойства материалов [7.1.1, 7.1.2]	Общая характеристика современных машиностроительных отраслей промышленности. Классификация современных конструкционных материалов. Свойства новых материалов, металлов и сплавов (физические и химические, механические, эксплуатационные и технологические). Понятие о конструкционной прочности и долговечности в экстремальных условиях эксплуатации современных машин и агрегатов.



<p>Порошковые материалы и способы изготовления изделий из порошков</p>	<p>2.1. Строение и свойства порошковых материалов [7.1.1, 7.1.2] 2.2. Современные технологии производства деталей из порошков [7.1.1, 7.1.2, 7.2.4]</p>	<p>Строение и свойства конструкционных материалов и современных металлических порошковых материалов. Порошковая металлургия. Методы получения порошков и изготовление из них изделий. Варианты получения готовых изделий по схеме «прессование-спекание». Сквозные технологические схемы гранульной металлургии высоколегированных сталей и сплавов с капсулированием и горячей деформацией капсул (изостатическая прессование, изостатическая штамповка, экструзия). Получение интегральных изделий. Антифрикционные и фрикционные материалы. Пористые фильтрующие элементы. Порошковые интерметаллиды. Интерметаллиды титана с алюминием и железа с алюминием. Механическое легирование. Понятие о наноматериалах и нанотехнологиях. Ультрадисперсные материалы. Области применения. Свойства. Получение ультрадисперсных порошков, нанокристаллов и нановолокон. Применение нанотехнологий для получения новых конструкционных материалов.</p>
--	--	---

<p>Современные неметаллические материалы. Полимеры и пластмассы</p>	<p>3.1 Полимеры и пластмассы [7.1.1, 7.1.3] 3.2. Новые неметаллические материалы [7.1.1, 7.1.3, 7.1.4] .</p>	<p>Виды полимеров. Их свойства. Технология получения полимеров и области применения. Понятие о терморезактивных и термопластичных полимерах. Пластмассы – классификация, свойства и области применения. Особенности технологий производства изделий и деталей из пластмасс. Резины и резинотехнические изделия и уплотнения. Керамика, стекло и технологии производства изделий из таких материалов. Использование керамических материалов как заменителей традиционных материалов.</p>
<p>Композиционные материалы</p>	<p>4.1 Металлические композиционные материалы [7.1.1, 7.1.2, 7.1.4]. [7.1.1, 7.1.2] 4.2. Неметаллические композиционные материалы [7.1.1, 7.1.2, 7.1.4]</p>	<p>Дисперсноупрочненные искусственные и естественные композиты. Композиты на базе никеля, алюминия, титана. Керамические композиты. Волокнистые и слоистые композиты. Механизм упрочнения. Области применения. Технология получения конструкционных композитов. Слоистые металлоорганические пластики. Углепластики. Композиты с керамической матрицей. Армированные стали. Волокнистые композиты со специальными свойствами. Использование композиционных материалов как заменителей традиционных металлов.</p>



Новые конструкционные материалы

<p>Сплавы специального назначения</p>	<p>5.1. Современные жаростойкие, жаропрочные, хладопрочные и коррозионностойкие сплавы [7.1.1, 7.2.1, 7.2.2] 5.2. Металлы и сплавы с особыми свойствами [7.2.2]</p>	<p>Критерии жаростойкости, жаропрочности и хладопрочности. Понятие коррозионной стойкости. Структура, свойства новых материалов и сплавов, предназначенных для работы в подобных условиях эксплуатации. Суперсплавы. Сплавы криогенной техники. Тугоплавкие металлы. Радиационно-стойкие материалы. Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами. Металлы с памятью формы. Аморфные и нанокристаллические сплавы.</p>
<p>Материалы для поверхностного упрочнения деталей и процессов соединения деталей</p>	<p>6.1. Материалы для поверхностного упрочнения деталей [7.1.1, 7.2.3] 6.2. Материалы для процессов соединения деталей [7.1.1, 7.2.3]</p>	<p>Современные технологии получения покрытий технологиями наплавки и напыления. Металлические и неметаллические покрытия. Осаждение в вакууме или из газовой фазы. Органические полимерные покрытия. Применение покрытий в современном машиностроении Материалы для пайки и склеивания. Современные припои, флюсы, клеи. Современные виды клеевых и паяных соединений и технологий пайки и склеивания.</p>

Вопросы, указанные в разделе "Содержание" тематического плана (табл. 1), могут использоваться студентами для контроля результатов самостоятельного изучения тем, показанных в табл. 2.



Самостоятельная работа студентов

Таблица 2

№ п.п.	Вид самостоятельной работы	Общий объем времени, час				Рекомендуемая литература
		Норм.		Сокр.		
		очная	заочная	очная	заочная	
1	2	3	4	5	6	7
1	Усвоение текущего учебного материала (работа с литературой и интерактивными материалами)	32				[7.1.1, 7.1.2, 7.1.3, 7.1.4, 7.2.1, 7.2.2, 7.2.3, 7.2.4]
2	Подготовка к практическим работам	16				7.4.1 – 7.4.12
3	Подготовка к экзамену	16				[7.1.1, 7.1.2, 7.1.3, 7.1.4, 7.2.1, 7.2.2]
Всего		64				

Темы, предлагаемые студентам для самостоятельного изучения:

- Классификация современных конструкционных материалов.
- Методы получения порошков и изготовление из них изделий.
- Пористые фильтрующие элементы.
- Получение ультрадисперсных порошков, нанокристаллов и нановолокон.
- Резины и резинотехнические изделия и уплотнения.
- Использование керамических материалов как заменителей традиционных материалов.
- Композиты на базе никеля, алюминия, титана.
- Композиты с керамической матрицей.
- Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами.
- Аморфные и нанокристаллические сплавы
- Осаждение в вакууме или из газовой фазы.



Рекомендуемая литература для самостоятельного изучения тем приведена в табл. 1. Электронные версии учебных материалов доступны на сайтах:

- 1) <http://lib.misis.ru/elbib.html>
- 2) <http://www.gpntb.ru>.
- 3) <http://www.rsl.ru>.
- 4) <http://www.de.dstu.edu.ru>
- 5) <http://www.ec.dstu.edu.ru>

Рекомендации по организации и контролю самостоятельной работы студентов (PCPC) даны в отдельном приложении.

Перечень практических работ приведен в табл. 3, а их содержание в отдельном приложении.

Практические занятия

Таблица 3

№ практического занятия	Тема практического занятия, литература из карты методического обеспечения	№ темы из раздела 2	Объем времени, час			
			Норм.		Сокр.	
			очная	заочная	очная	заочная
1	2	3	4	5	6	7
3.3.1	Классификация, маркировка и свойства современных конструкционных материалов	1.1.	4			
3.3.2	Технология получения материалов и изделий методами порошковой металлургией	2.1., 2.2.	4			
3.3.3.	Определение и расчет свойств композиционных материалов, применяемых в машиностроении	4.1., 4.2.	4			



Новые конструкционные материалы

3.3.4.	Расчет прочности и устойчивости конструкционных материалов на основе сэндвичевых структур	5.1., 5.2.	4			
3.3.5.	Особенности применения и расчет металлополимерных самосмазывающихся материалов в подшипниках скольжения	6.1.	4			
Итого			20			

Контрольно-измерительные материалы даны в отдельном приложении.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО
ВЫПОЛНЕНИЮ
ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**



ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация

В методических указаниях изложены основные сведения, необходимые для формирования умения выбирать композиционный материал, его структуру и свойства и оценивать удельные показатели прочности и жёсткости. Предназначены для направлений 150700 «Металлургия» и 151000 «Технологические машины и оборудование» очной формы обучения магистерской подготовки

Составили:

проф. С.Д. Колотиенко
проф. В.В. Рубанов
проф. В.А. Кохановский





Цель работы. Ознакомление со структурой и свойствами основных композиционных материалов, определение и расчет удельных показателей прочности и жесткости.

1. Общие сведения

Композиционный материал (композит или **КМ**) – это материал, который имеет объемную гетерогенную структуру из двух или более компонентов, представляющих собой сильно различающиеся по свойствам и химсоставу вещества. КМ позволяют получить комплексное сочетание разнородных свойств, присущих отдельным материалам: высокие значения удельных прочности и жесткости, теплозащитных свойств, жаропрочности, износостойкости, антифрикционности и т.д. Основной компонент КМ, непрерывный по всему объёму, называется **матрицей**. Он выполняет роль связки для остальных компонентов КМ, которые имеют прерывистый объем и выполняют роль **армирующих элементов** или наполнителя. Армирующий элемент может исполнять упрочняющую роль, может служить элементом, снижающим существенно усадку КМ при его получении и т.п.

1.1 Структура КМ

КМ различают по морфологии и расположению компонентов, т.е. по структуре, по виду материалов матрицы и армирующих элементов, т.е. по составу, по способам и технологиям получения. По структуре КМ бывают следующих типов (см. рис. 1):

- Дисперсноупрочненные КМ
- Волокнистые КМ
- Слоистые КМ

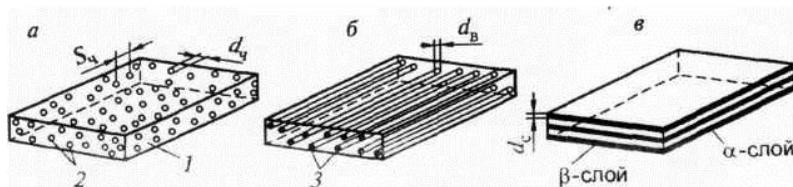


Рис.1. Типы структур композитов.: а - дисперсноупрочненный композит, б – волокнистый композит, в – слоистый композит, (1 – матрица, 2 – армирующие частицы, 3 – армирующие волокна).



Новые конструкционные материалы

По составу матрицы КМ могут быть следующих видов:

- КМ на основе металлов и сплавов (цветные металлы и их сплавы, тугоплавкие металлы и их сплавы и пр.)
- КМ на основе интерметаллидов, т.е. веществ – соединений металлов друг с другом (Ti3Al, NiAl и др.), которые обладают жаропрочными свойствами
- КМ на основе керамики (оксиды, нитриды, карбиды с жаропрочными свойствами)
- КМ на основе неметаллических веществ (к примеру, углерод) или полимеров

По составу армирующих веществ:

- Металлы и их сплавы (вольфрам, бериллий и их соединения с другими элементами, высокопрочная сталь и др.)
- Неметаллы (углерод и бор)
- Керамика (Al₂O₃, SiC, TiC и др.)
- Стекло
- Органические вещества (полиэтилен, лавсан, кевлар-арамид)

1.2 Определение основных механических свойств КМ

Кроме абсолютных значений жесткости (модуль упругости – E) и прочности (напряжения разрушения – σ_B) для некоторых современных областей машиностроения, таких как, самолетостроение, автомобилестроение, космическая техника имеет смысл подбор материалов по этим показателям, но отнесенным к их удельному весу или плотности.

Таким образом, **удельная жесткость материала** определяется отношением

$$E_{уд} = E/\rho, \quad (1)$$

где: E – модуль упругости, ГПа, ρ – плотность материала, т/м³,

а **удельная прочность материала** определяется отношением

$$\sigma_{уд} = \sigma_B/\rho, \quad (2)$$

где: σ_B – предел прочности при разрушении, МПа.

Композиционные материалы, которые могут обладать удельной прочностью в 5-6 раз превышающей удельную прочность алюминиевых сплавов, заменяют их успешно в самолето-



строении и других областях применения, где критичен вес деталей и конструкций.

1.3 Определение номинальной толщины изделия из КМ

В качестве примера рассмотрим свойства слоистых КМ на основе полимеров. За критический показатель принимается жесткость материала, которая и определяет номинальную толщину изделия из КМ:

$$tkm = tct * \sqrt[3]{E_{ст} / E_{км}} , \quad (3)$$

где: tkm – толщина изделия из КМ, мм, tct – толщина изделия из стали, мм,

$E_{км}$ – модуль упругости КМ, ГПа, $E_{ст}$ – модуль упругости стали, ГПа.

Таким образом, зная значения модуля упругости КМ, можно рассчитать толщину изделия при любом способе формования конкретного КМ из стеклопластика (ручной укладкой или напылением). Возможно решение также и «обратной» задачи: по заданной величине $E_{км}$ подобрать соответствующую композицию, которая должна обеспечить получение изделия. Однако следует подчеркнуть, что предложенная методики справедлива только для несильно нагруженных изделий.

Для корпусных изделий с более высокими нагрузками (например, баки высокого давления) расчет окружной толщины стенки определяют по формуле

$$to = pd / (2 \sigma) , \quad (4)$$

где: to – окружная толщина стенки бака, мм, p – давление в баке, МПа,

d – диаметр бака, мм, σ – предел прочности КМ с пятикратным запасом, МПа.

1.4 Расчет основных характеристик и несущей способности подшипника скольжения из полимерных композиционных материалов и покрытий

Данные материалы представляют из себя композит толщиной 0,2 – 0,8 мм из армирующих элементов в виде тканей полимерных волокон и фенолкаучуковой матрицы. Такого рода материал закрепляется на втулке подшипника скольжения. Волокна армирующих элементов изготавливают из фторопласта и полиимида, которые выполняют роль соответственно антифрикционную и



прочностную.

Для подшипника в виде втулки среднее контактное напряжение (по проекции шейки вала) определяется по формуле:

(5)

где: F - нагрузка, Н, и b , ширина и диаметр, м.

По эмпирическим формулам можно определить абсолютную деформацию ползучести диаметральном направлении

(6)

где: T - температура, δ - зазор в подшипнике, мм, средние нормальные контактные напряжения (по дуге контакта)

(7)

где: α - полуугол дуги контакта подшипник – вал, радиан,

радиальный модуль упругости покрытия

(8)

И несущую способность покрытия

(9)

где: $\sigma_{\text{уд}}$ - напряжения, которые вызывают при данной температуре вынужденную высокую эластичность покрытия.

2. Примеры выполнения расчетов

2.1 Расчет удельной жесткости и прочности КМ

Исходные данные (см. таблицу 3, Приложение): материал (композит) – стекловолокно E, материал для сравнения – мартенситно-стареющая сталь.

Определяем удельные значения жесткости и прочности по формулам (1 и 2), при этом модуль упругости, прочность и плотность определяются по таблице 1.

Например (для композита стекловолокно E):

$$E_{\text{уд}} = 72,3 \text{ ГПа} / 2,55 \text{ т м}^{-3} = 28,3 \text{ ГПа/т м}^{-3},$$

$$\sigma_{\text{уд}} = 3170 \text{ МПа} / 2,55 \text{ т м}^{-3} = 1240 \text{ МПа/т м}^{-3}.$$

Для сравнения определим подобные характеристики для обычного конструкционного материала (мартенситно-стареющая сталь):

$$E_{\text{уд}} = 193 \text{ ГПа} / 8,0 \text{ т м}^{-3} = 24 \text{ ГПа/т м}^{-3},$$

$$\sigma_{\text{уд}} = 2070 \text{ МПа} / 8,0 \text{ т м}^{-3} = 258 \text{ МПа/т м}^{-3}.$$

Из проведенных расчетов очевидно, что удельные характе-



Новые конструкционные материалы

ристики жесткости и прочности КМ лучше, чем аналогичные показатели для мартенситно-старееющей стали, выбранной для сравнения. Дальнейшие расчеты, выполненные самостоятельно, должны привести к соответствующим выводам и для других сравниваемых материалов.

2.2 Расчет толщины изделия из КМ

Расчет производится по формуле(3) для слабонагруженного изделия и по формуле (4) для сосуда/бака высокого давления. Исходные данные определяются из таблицы 2 Приложения. Результаты расчета свести в общую таблицу.

2.3 Расчет основных параметров подшипника скольжения с полимерным композиционным покрытием

Исходные данные берутся из таблицы 4 в Приложении. Расчет проводится по формулам 5 – 8.

3. Задание для самостоятельной домашней работы

Используя литературные источники и поиск по Интернету определить основные свойства, структуру и области применения конкретной группы композитов в соответствии с заданием (см. таблицу 5, Приложение). Результаты поиски, анализа литературных и справочных источников обобщить и представить в виде таблицы по форме:

Тип КМ, марка, фирма и страна производитель	Структурные составляющие КМ		Основные свойства	Области применения
	Матрица	Армирующий элемент, наполнитель		



4. Контрольные вопросы

- Что такое КМ?
- Основная классификация КМ по структуре и свойствам
- Привести примеры КМ и области их применения
- Для чего необходимо знать удельные значения жесткости и прочности материалов?
- Простейшие способы расчета толщины изделий из КМ
- Определение характеристик и несущей способности полимерных композиционных материалов в подшипниках скольжения

5. Литература

1.1. Новые материалы. Под редакцией Карабасова Ю.С. – М: Изд-во МИСИС, 2002.

1.2. Бобович Б.Б. Неметаллические конструкционные материалы Учебное пособие. – М: Изд-во МГИУ, 2009

1.3. Справочник по композиционным материалам. Под ред. Дж.Любича. В 2-х томах. – М: Машиностроение, 1988.

1.4. Кохановский В.А. и др. Расчет металлополимерных самосмазывающихся подшипников скольжения. ДГТУ, Ростов-на-Дону, 2006.



ПРИЛОЖЕНИЕ

Табл.1. Основные механические свойства некоторых материалов

Материал	E , ГПа	σ_B , МПа	ρ , т/м ³
Стекловолокно:			
E^*	72,3	3170	2,55
S^*	82,7	4130	2,50
E^{**}	51,7	1380	1,94
S^{**}	51,7	2070	1,94
Арамидное волокно *	137,8	3445	1,69
Арамидное волокно **	82,7	1930	1,40
Углеродное волокно:			
высокомодульное *	379	2070	1,90
высокопрочное *	241	2410	1,77
высокомодульное **	207	930	1,61
высокопрочное **	152	1410	1,50
Волокно:			
AS или T-300 *	207	2760	1,85
AS или T-300 **	117	1580	1,55
Борное волокно *	143	2760	2,63
Борное волокно **	214	1420	2,08
Мартенситно-стареющая сталь	193	2070	8,00
Алюминий 7075	68,9	565	2,77
Титановый сплав Ti-6Al-4V	103	1070	4,29
Бериллий	241	620	1,83

* Испытывали только волокна без матрицы.

** Испытывали волокно в эпоксидной матрице.



Новые конструкционные материалы

Табл.2. Исходные данные для определения толщины стенки изделия из КМ

Расстояние от верха l , м	Толщина стенок и днища t , мм, при диаметре резервуара d , м							
	0,6	0,75	0,9	1,1	1,2	1,35	1,5	1,7
0,6	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
1,2	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
1,8	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
2,4	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
3,0	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	6,35
3,6	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	6,35	6,35
4,2	4,76	4,76	4,76	4,76	6,35	6,35	6,35	6,35
4,8	4,76	4,76	4,76	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
5,4	4,76	4,76	4,76	6,35	6,35	6,35	6,35	7,94
6,0	4,76	4,76	6,35	6,35	6,35	6,35	7,94	7,94
6,6	4,76	6,35	6,35	6,35	6,35	7,94	7,94	7,94
7,3	4,76	6,35	6,35	6,35	6,35	7,94	7,94	7,94

Табл.3. Варианты заданий

Вариант	Армирующий элемент в композите	Материал для сравнения	Диаметр бака, мм	Давление в баке, МПа
1	Стекловолокно E	Al сплав	600	500
2	Стекловолокно S			600
3	Углеродное волокно VM	МС сталь	1200	700
4	Углеродное волокно VP			800
5	Волокно AS	Ti сплав	1700	1000
6	Борное волокно			1200

Табл.4. Варианты заданий для расчета характеристик подшипника



Табл.5. Варианты заданий для самостоятельной домашней работы

Вариант	Композиционные материалы
1	Стеклопластики на основе смол различного типа
2	КМ, армированные арамидными волокнами, кевлар
3	Углепластики, карбон
4	КМ, армированные борным волокном
5	КМ на основе интерметаллидов
6	КМ на основе керамики

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация

В методических указаниях изложены основные сведения, необходимые для формирования умения определять свойства порошковых материалов области их применения и оценивать параметры процесса прессования. Предназначены для направлений 150700 «Машиностроение» и 151000 «Технологические машины и оборудование» очной формы обучения магистерской подготовки.

Составители: проф. А.Ю.Кем
проф. С.Д. Колотиенко
доц. Э.К. Синолицин





Цель работы. Ознакомление с основными порошковыми материалами, применяемыми для изготовления деталей и изделий методами порошковой металлургии. Определение их основных свойств и параметров прессования.

1. Общие сведения

Порошковой металлургией называют область науки техники, охватывающей разработку и исследование методов получения порошков металлов, сплавов и металлоидов и изготовления из них или их смесей с неметаллическими порошками (в том числе органическими) разнообразных материалов и изделий, консолидация которых происходит без расплавления основного компонента.

Суть порошковой металлургии заключается в том, что из отдельных порошков или их смесей *формируют* заготовки, которые затем с целью обеспечения требуемых свойств подвергают термической обработке – *спеканию*. Полученные по такой технологии – «*прессования-спекания*» - изделия, называют также спеченными. Эти изделия, в зависимости от назначения и предъявляемым к ним требованиям, непосредственно поступают в эксплуатацию в узлы машин и механизмов или подвергаются дополнительной обработке – калибровке, мехобработке, пропитке маслом, химико-термической обработке и нанесению покрытий, сборке в комплекты и т.п. Иногда целесообразно совмещать операции прессования и спекания, что достигается при горячем формировании: статическом и динамическом горячем прессовании, штамповке, экструзии (выдавливании), взрывном и горячем изостатическом прессовании и др. В промышленности используются порошковые композиционные материалы и изделия различных классов и назначения: одно- и поликомпонентные, высокоплотные и каркасные (пористые), керамико-металлические и металлопластиковые, структурно-неоднородные и функционально-градиентные, эффективное изготовление которых возможно благодаря развитию технологии порошковой металлургии.

1.1 Состав, свойства и маркировка металлических порошков

Составы, свойства и область применения порошков регламентированы соответствующими стандартами (российскими и международными) и отраслевыми техническими условиями (ТУ). В



соответствии с Государственными стандартами РФ большинство порошков обозначаются буквой П, затем следует буква, указывающая на материал порошка. В обозначение обычно входят буквы и цифры, характеризующие химический и гранулометрический состав порошка и их технологические свойства.

Алюминиевые порошки и пудра. В ГОСТ 5494-95 и ГОСТ 10096-76 регламентируются свойства порошков и алюминиевой пудры. Промышленно выпускаются алюминиевые порошки и пудра различных видов. Пудру используют при производстве красителей и материалов типа САП, порошки - для изготовления деталей машин. Основную массу порошков алюминия изготавливают методом распыления расплава.

Железные порошки. Основными марками железных порошков для изготовления порошковых деталей являются ПЖЗ и ПЖ4. Порошки марок ПЖО и ПЖ1 используют для изготовления конструкций сложной формы (тонкостенные, высокопористые и пр.), а порошки марок ПЖ5 и ПЖ6 - при изготовлении малонагруженных деталей и для сварочного производства. Химический, гранулометрический состав и насыпная плотность железных порошков регламентирована ГОСТ 9849-86. Свойства карбонильных порошков регламентированы ГОСТ 13610-79. Допустимый разброс значений насыпной плотности в пределах одной партии железных порошков устанавливается в зависимости от класса (К, С, М, ВМ - крупный, средний, мелкий, весьма мелкий соответственно) крупности порошка. Группа насыпной плотности обозначается римскими цифрами I и II и в обозначение марки порошка не входят.

Порошки никеля регламентированы ГОСТ 9722-97. Свойства порошков никеля, полученных методом диспергирования, регламентированы ГОСТ 14086-68. В промышленном производстве для получения порошков никеля используют карбонильный и электрохимический методы. Получаемые этими методами порошки обозначаются буквами ПНК и ПНЭ. По химическому составу их разделяют на группы (0, 1, 2), а по насыпной плотности на группы (Т, II, К) и подгруппы.

Кобальтовые порошки изготавливают электролизом. Их используют при производстве жаропрочных деталей, твердых сплавов и быстрорежущих сталей. Марки и технические требования кобальтового порошка регламентированы ГОСТ 9721-79. Массовая доля влаги в порошке не должна превышать 0,15 %. Насыпную плотность устанавливают по соглашению сторон.

Медные порошки обозначаются буквами ГГМ и в зависимости от физико-химических свойств буквами С (стабилизи-



рованный), К (конопаточный), Н (низкодисперсный), буквами А, у, В обозначаются специальные свойства. Марки и технические требования медных порошков регламентированы ГОСТ 4960-75.

Титановые порошки применяют для изготовления порошковых деталей конструкционного и фильтрующего назначения. Содержание примеси в порошках не должно превышать, % мас.: Fe - 0,1; Si - 0,03; Ni - 0,06; С - 0,04; (Си + V + Al) — 0,15. Порошки титана получают специальными методами, оговоренными в технических условиях на получение той или иной марки порошка.

Порошки легированных сталей и сплавов (ГОСТ 13084-88) изготовляют методом восстановления гидридом кальция смесей оксидов и металлических порошков, а также методами диффузионного насыщения и распыления энергоносителями (нержавеющие стали).

1.2 Определение основных параметров прессования порошковых металлических материалов

Прессование порошка – это формование порошка в пресс-форме под воздействием давления. Прессовка – это порошковая формовка, полученная прессованием порошка. Сущность процесса прессования заключается в деформировании некоторого объема сыпучего порошкового тела обжатием, при котором происходит уменьшение первоначального объема и формирование заготовки (прессовки) заданных формы, размеров, и свойств. Объем порошкового тела при прессовании изменяется в результате смещения отдельных частиц, заполнения пустот между ними и деформации частиц.

Методы прессования. Под прессованием порошков понимается операция, при которой из порошка в свободно насыпанном состоянии, получают транспортабельные прессовки, имеющие форму и размеры готовых порошковых изделий с учетом изменения размеров после выталкивания прессовки из пресс-формы (упругие последствия) и после спекания (усадка или рост).

Упругие последствия a_{np} по линейным размерам в справочной литературе приводятся в %. Для определения их в «мм» при проектировании чертежа прессовки используется выражение:

$$l_{np} = \frac{a_{np}}{100} \cdot X, \text{ где } X - \text{размер прессовки (D, d, H), мм.}$$

Прессование проводится в пресс-формах; используется, как правило, двустороннее прессование (равное по величине

приложение усилия прессования к верхнему и нижнему пуансонам). При этом обеспечивается равномерная плотность (пористость) прессовки в направлении прессования.

Спекание прессовок производят при температурах от 0,7 до 0,9 от абсолютной температуры плавления основного металлического компонента порошковой шихты. Длительность выдержки при заданной температуре определяется эмпирически.

Спекание прессовок обуславливает проявление так называемой **усадки**, т.е. изменений геометрических параметров спекаемого изделия. Изменение β по линейным размерам после спекания выражаются в %. Для перевода их в «мм» используется выражение:

$$\varepsilon = \pm \frac{\beta}{100} \cdot X$$

Знак (+) соответствует усадке, знак (-) –

росту порошкового материала.

Плотность γ_k компактного двухкомпонентного материала определяем по соотношению:

$$\gamma_k = \alpha_1 \gamma_1 + \alpha_2 \gamma_2, \text{ г/см}^3, \quad (1)$$

где: плотность первого компонента и его доля α_1 в материале γ_1 г/см³

плотность второго компонента и его доля α_2 в материале γ_2 г/см³

$$\text{плотность прессовки } \gamma_{\text{прес}} = \gamma_k - \Pi \gamma_k = \gamma_k (1 - \Pi) \quad , \quad (2)$$

где Π - пористость, %.

Количественная зависимость плотности прессовки и давления прессования p представляется в случае идеального прессования (т.е. при отсутствии внешнего трения) следующим выражением:

$$p = p_{\text{max}} / \beta^m \quad , \quad \text{МПа} \quad (3)$$

где: p_{max} – максимальное (критическое) давление прессования для получения беспористого тела, численно это твердость материала, МПа,

m – показатель прессования,

β – относительный объем прессовки.

Показатель прессования, m , для большинства металлических порошков составляет приблизительное значение равное 4.

Относительный объем прессовки, β при давлении p характеризует свойства порошка и может быть рассчитан по формуле:

$$\beta = 1/\gamma_{отн} \quad (4)$$

где: $\gamma_{отн}$ – относительная плотность спрессованного материала при давлении p .

Алгоритм проектирования геометрических параметров прессовки, расчета технологических режимов прессования и спекания может быть представлен следующим образом:

1. Определение размеров прессовки (D , d , H) производится на основе номинальных размеров порошковой детали, представленных в индивидуальном задании, мм:

$$D_{np} = D_{\partial} - l_{np} \pm \varepsilon;$$

$$d_{np} = d_{\partial} - l_{np} \pm \varepsilon;$$

Нарисовать эскиз прессовки (рис.1).

$$H_{np} = H_{\partial} - l_{np} \pm \varepsilon.$$

2. Определение объема прессовки – V , мм³;
3. Определение массы прессовки, кг: $m = V\rho_{ПМ}$, где $\rho_{ПМ}$ – заданная плотность порошкового материала;
4. Определение истинной плотности порошкового материала заданного химического состава, г/см³:

$$\rho_{ПМВСТ} = \frac{1}{\frac{\alpha_1}{\rho_1} + \frac{\alpha_2}{\rho_2} + \frac{\alpha_3}{\rho_3}},$$

где α_1 , α_2 , α_3 – массовое содержание отдельных компонентов в шихте (в долях);

ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 – плотность отдельных компонентов шихты.

5. Определение величины пористости порошковой детали, %:

$$П = \left(1 - \frac{\rho_{ПМ}}{\rho_{ПМист}}\right) \cdot 100\%$$

6. Определение усилия прессования, МН:

$$P_{ПР} = S_{ПР}p,$$

где $S_{ПР}$ – площадь прессования, м²; p – величина удельного усилия прессования, МПа.



2. Пример выполнения задания

2.1 Нахождение состава, свойств и области применения заданного материала

Используя литературные источники, сведения из соответствующих Государственных стандартов, поиск по Интернету определить состав, основные свойства, и области применения конкретной группы материалов в соответствии с заданием (см. таблицу 1, Приложение). Результаты поиски, анализа литературных и справочных источников обобщить и представить в виде таблицы по форме:

Тип порошкового материала, марка, фирма и страна производитель	Состав материала (химический элемент и его доля, %)		Свойства порошка		Свойства прессовки			Области применения
	Основа	Легирующие элементы и примеси						
			γ_k	$\gamma_{нас}$	P	σ_e / HB	ρ_{max}	
			г/см ³	г/см ³	%	МПа	МПа	

2.2 Расчет параметров прессования (задание см. табл.2 Приложения)

Рассмотрим пример для порошкового материала, состоящего из 70% ($\alpha_1 = 0,7$) железного порошка и 30% ($\alpha_2 = 0,3$) порошка хрома ($\rho_{max} = 2100$ МПа).

Плотность компактного материала определяем по соотношению (1):

$$\gamma_k = \alpha_1 \gamma_{Fe} + \alpha_2 \gamma_{cr} \quad , \quad \text{г/см}^3 \quad ,$$

где: плотность железа $\gamma_{Fe} = 7,87$ г/см³

плотность хрома $\gamma_{cr} = 7,19$ г/см³

тогда: $\gamma_k = 0,7 * 7,87 + 0,3 * 7,19 = 7,67$ г/см³

Пористость определяем по варианту задания, например, $P = 24\% = 0,24$.

Значит плотность прессовки по формуле

$$(2) \gamma_{прес} = \gamma_r - P \gamma_k = \gamma_k (1 - P) \quad ,$$

$$\text{т.е. } \gamma_{\text{прес}} = 7,67(1-0,24) = 5,83$$

И относительная плотность

$$\gamma_{\text{отн}} = \gamma_{\text{прес}} / \gamma_{\text{к}} = 5,83 / 7,67 = 0,76$$

В этом случае относительный объем прессовки по формуле (4)

$$\beta = 1 / \gamma_{\text{отн}} = 1 / 0,76 = 1,32$$

Зная значение β , p_{max} , m , для заданного материала, можно рассчитать по формуле (3) значение давления прессования:

$p = 2100 / 1,32^4 = 690$ МПа. Это значение требуется для расчета усилия прессования.

2.3. Расчет размеров, пористости прессовки и усилия прессования

Исходные данные (задание см. табл.3 Приложения):

Номинальные размеры детали: $D = 35$ мм; $d = 15$ мм; $H = 20$ мм.

Материал – порошковая латунь, плотность – $7,85$ г/см³.

В процессе спекания наблюдается усадка (+) по линейным размерам.

Решение.

1. Определение размеров прессовки с учетом упругих последствий и усадки в процессе спекания.

Наружные диаметр прессовки

$$D = D_H - l_{\text{уп}} + \varepsilon = 35 - \frac{1,0}{100} 35 + \frac{2,0}{100} 35 = 35 - 0,35 + 0,70 = 35,35(\text{мм})$$

(здесь 1,0 и 2,0 – соответственно величины упругого последствия и усадки для $D=35$ мм, выбираемые из таблицы индивидуальных заданий);

Внутренний диаметр прессовки:

$$d = d_H - l_{\text{уп}} + \varepsilon = 15 - \frac{0,5}{100} 15 + \frac{1,5}{100} 15 = 15 - 0,075 + 0,225 = 15,15(\text{мм})$$

Высота прессовки:

$$H = H_H - l_{\text{уп}} + \varepsilon = 20 - \frac{1,0}{100} 20 + \frac{2,0}{100} 20 = 20 - 0,20 + 0,40 = 20,20(\text{мм})$$

По полученным данным проектируем прессовку (рис. 1).

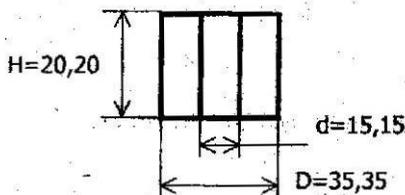


Рис.1.Эскиз прессовки

2. Определение объема прессовки.

$$V = \frac{\pi H}{4} (D_{\text{ПР}}^2 - d_{\text{ПР}}^2) = \frac{3,14 \cdot 20,2}{4} (35,35^2 - 15,15^2) = 16175,68 (\text{мм}^3) = 16,175 (\text{см}^3)$$

3. Определение массы прессовки.

$$m = V \rho_{\text{ПМ}} = 16,175 \times 7,85 = 126,97 (\text{г}) = 0,0127 (\text{кг})$$

4. Определение истинной плотности порошковой латуни, содержащей 69% меди, 27% цинка и 4% олова.

$$\rho_{\text{ПМист}} = \frac{1}{\frac{\alpha_1}{\rho_1} + \frac{\alpha_2}{\rho_2} + \frac{\alpha_3}{\rho_3}} = \frac{1}{\frac{0,69}{8,96} + \frac{0,27}{7,133} + \frac{0,04}{7,298}} = 8,33 (\text{г} / \text{см}^3)$$

5. Определение пористости порошковой детали.

$$П = \left(1 - \frac{\rho_{\text{ПМ}}}{\rho_{\text{ПМист}}} \right) 100\% = \left(1 - \frac{7,85}{8,33} \right) 100\% = 6\%$$

6. Определение усилия прессования:

$$P_{\text{нр}} = S_{\text{нр}} \rho = \frac{\pi (D_{\text{нр}}^2 - d_{\text{нр}}^2)}{4} \rho = 0,0008 \cdot 615 = 0,492 (\text{МН})$$

$S_{\text{нр}}$ - (м^2); ρ - удельное усилие прессования (МПа), определяется по таблице 2.



3. Контрольные вопросы

- Что такое порошковая металлургия?
- Виды порошковых материалов и их свойства
- Привести примеры материалов и области их применения
- Простейшие способы расчета параметров прессования

4. Литература

1.1. Новые материалы. Под редакцией Карабасова Ю.С. – М: Изд-во МИСИС, 2002.

1.2. Процессы порошковой металлургии. В 2-х т. Т.2. Формование и спекание: учебник для вузов./ Либенсон Г.А. и др. – М.:МИСИС, 2002.

1.3. О.В.Ротан, И.П. Габриелов. Справочник по порошковой металлургии. – Минск: Беларусь, 1988.

1.4. Металлические порошки и порошковые материалы: Справочник; под ред. Ю.В.Левинского. – М.: ЭКОМЕТ, 2005.

1.5. Справочник по композиционным материалам. Под ред. Дж. Любича. В 2-х томах. – М: Машиностроение, 1988.



ПРИЛОЖЕНИЕ

Табл. 1. Задание для определения состава, свойств и области применения порошковых материалов и прессовок (самостоятельная домашняя работа)

Вариант	Порошковые материалы	Спеченное изделие (прессовка)
1	Железные	Железо (97%) углерод (3%)
2	Алюминиевые	Железо (85%) углерод (15%)
3	Хромовые	Кобальт (80%) карбид Мо (20%)
4	Медные	Титан (92%) оксид Al (8%)
5	Бронзовые	Железо (100%)
6	Стальные	Латунь (100%)

Табл. 2. Задание для расчета основных свойств прессовки и давления прессования

Вариант	Материал, %	Пористость, %	ρ_{max} МПа
1	Порошок железа (80%) и хрома (20%)	90	2200
2		80	2000
3	Порошок железа (97%) и углерода (3%)	90	1150
4		80	1100
5	Порошок железа (97%) и меди (3%)	90	1300
6		80	1200

Табл.3. Задание для расчета размеров и пористости прессовки

№ п/п	Номинальные размеры детали: D×d×H, мм	Хим. состав порошковой, %: Cu-Zn-Sn	Плотность $\rho_{ПМ}$, г/см ³	Усадка (+), рост (-), %, по размерам: D×d×H	Упругие последствия, % по размерам: D×d×H
1	60×30×45	70-24-6	6,68	(+)1,5;1,0;1,5	2,0;1,5;2,0
2	50×20×30	69-25-6	6,63	(+)1,5;1,0;1,5	2,0;1,5;2,0
3	40×15×20	70-25-5	6,64	(+)1,5;1,0;1,5	2,0;1,5;2,0
4	55×25×35	68-26-6	6,66	(+)1,0;0,5;0,9	1,5;1,0;1,5
5	50×30×20	64-35-1	6,62	(-)1,0;0,5;0,9	1,5;1,0;1,5
6	40×20×25	62-35-3	6,60	(-)1,0;0,5;0,9	1,5;1,0;1,5
7	35×15×20	60-35-5	7,85	(-)2,0;1,5;2,0	1,0;0,5;1,0
8	30×10×15	59-35-6	7,83	(-)2,0;1,5;2,0	1,0;0,5;1,0
9	30×10×10	69-26-5	7,80	(+)2,0;1,5;2,0	1,0;0,5;1,0
10	60×40×30	70-26-4	7,84	(+)0,9;0,4;0,8	1,4;0,9;1,4
11	50×30×35	67-27-6	7,81	(+)0,9;0,4;0,8	1,4;0,9;1,4
12	40×20×30	28-27-5	7,86	(+)0,9;0,4;0,8	1,4;0,9;1,4

Табл. 4. Плотность компонентов порошковой латуни

Материал	Плотность, г/см ³
Медь	8,96
Цинк	7,133
Олово	7,298

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ СЭНДВИЧЕВЫХ (СОТОВЫХ) МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

В методических указаниях изложены основные сведения, необходимые для формирования умения выбирать композиционный сэндвичевый материал, его структуру и свойства, оценивать показатели прочности, жёсткости и устойчивости. Предназначены для направлений 150700 «Машиностроение» и 151000 «Технологические машины и оборудование» очной формы обучения магистерской подготовки.

Составитель: проф. С.Д. Колотиенко





Цель работы. Ознакомление со структурой и свойствами основных композиционных материалов на основе сэндвичевых (сотовых) структур, определение и расчет показателей прочности и устойчивости элементов из этих материалов.

1. Общие сведения

1.1 Строение и основные свойства композиционных материалов на основе сэндвичевых (сотовых) структур

Структура сэндвичевых конструкций состоит из следующих элементов (рис.1): двух тонких прочных облицовочных пластин – обшивок, толстой легкой сердцевины – заполнителя, разделяющего несущие пластины и распределяющие нагрузку между ними, и адгезионных слоев, связывающих пластины с заполнителем и передающих нагрузку от заполнителя к облицовкам и обратно. Сэндвичевую конструкцию материала обычно рассматривают как двутавровую балку, одна из горизонтальных полок пластин которая работает на сжатие, другая – на растяжение. Сотовый заполнитель, связывающий пластины, аналогичен вертикальной полке балки, работает на сдвиг и повышает изгибную жесткость структуры, в противоположность двутавру, основным его назначением является опора для пластин облицовки.

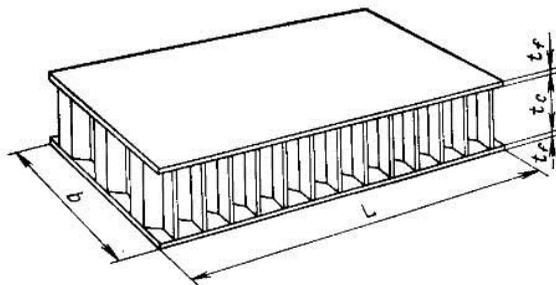


Рис.1. Схематическое изображение композиционного материала в виде плоской сэндвичевой структуры

Структурные сэндвичевые конструкции были одним из самых первых композиционных материалов, получивших широкое признание и применение. Практически для всех видов гражданских самолетов и вертолетов, а также военных летательных аппаратов и ракет используются сэндвичевые конструкции.



Новые конструкционные материалы

Главными функциями несущих облицовочных материалов для создания конструкций являются обеспечение их жесткости относительно изгиба и сдвига в плоскости пластин, а так же передача нагрузок в той же плоскости. В самолетостроении чаще всего используют стекловолоконистые препреги, препреги на основе углеродных волокон, алюминиевые сплавы марок , титановые или стальные листы.

В табл.1 в Приложении приведены механические свойства некоторых наиболее распространённых материалов несущих пластин.

Сотовые, структуры являются общим видом материалов, использующие непропитанные и пропитанные связующим крафт-бумаги, различные алюминиевые сплавы, арамидные бумаги, стеклопластики на основе различных видов тканей и связующих. В меньших количествах для этих целей используются титановые и стальные листы. Виды ячеистых структур на основе адгезионных соединенных полос тонкого материала показаны на рис.2. Существуют два основных процесса производства сотовых структур:

1) процесс растяжения: предварительно соединенный по исходным линиям пакет растягивается, одновременно образуя ячеистую структуру; преимущества процесса - одностадийность операции:

2) процесс рифления: листы исходного материала предварительно подвергаются рифлению; это могут быть листовые металлы, пластики, бумага, армированные пластики и т. д., причем некоторые материалы термофиксируются, а затем склеиваются или соединяются другим способом.

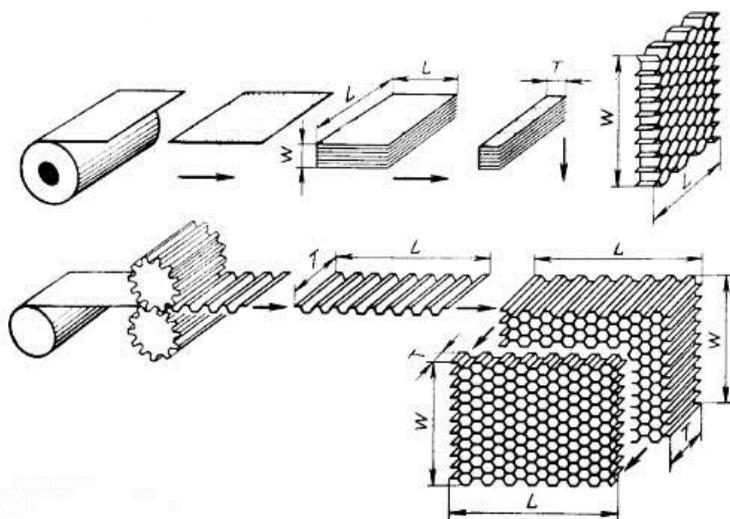


Рис.2. Две основные схемы изготовления сотового наполнителя.

Все сотовые структуры являются анизотропными и их свойства в выбранном направлении имеют различия, например, в прочностных характеристиках при сдвиге в направлениях L или W .

1.2 Области применения

Сотовые структуры на основе бумаг

Бумажные сотовые структуры - это, наверное, самый древний вид сотовых наполнителей. Сотовые структуры из этих материалов, используемые сегодня для заполнения сэндвичевых конструкций, состоят из арочной крафт-бумаги и 35 % фенольной смолы для повышения механических свойств и уменьшения влагопоглощения. Наибольшее применение эти материалы находят не в самолетостроении, а там, где уменьшение стоимости материалов весьма существенно. Такие композиты находят все большее применение в оборудовании для индустрии отдыха, для дверей стен и перегородок. Для кухонных шкафов. Для строительства веранд, для панелей сдвижных стен и для откатывавшихся перегородок в коммерческих зданиях. Механические свойства некоторых видов бумажных сотовых конструкций приведены в табл. 2.



Сотовые наполнители на основе алюминия

Это семейство материалов начало широко распространяться в 50-х годах. Алюминиевые сотовые структуры включают на сегодня четыре вида сплавов, пять видов ячеек и большое число толщин (калибров) фольги. Большинство алюминиевых сплавов используется для получения сотовых наполнителей методом рифления, рифления с усиливающими элементами для получения, сотового наполнителя с предельно вытянутой ячеистой структурой и со специальными формами ячейки. Часть материалов на основе алюминия используется при раскрое деталей слоистых геометрических форм - цилиндров переменного радиуса, сфер и т. д. Некоторые виды алюминиевой фольги используются для наполнителей в виде намотанной рифленой спирали.

Теклопластиковые сотовые структуры

Этот вид материалов широко используется, когда необходимо создать материалы со специальными электрофизическими свойствами (для антенн радиолокаторов) или когда к изделию предъявляются требования теплостойкости и низкой теплопроводности. Такие структуры были эффективно использованы в космических кораблях. Производятся стекловолоконные наполнители на основе полиэфирного нейлон-фенольного связующего, высокотемпературного фенольного и полиамидного связующего. Механические свойства большинства коммерческих стекловолоконных наполнителей приведены в табл. 3.

1.3. Требования к композиционным материалам на основе сэндвичевых (сотовых) структур:

Проектирование сэндвичевых структур может осуществляться исходя из следующих критериев:

- несущие пластины должны иметь достаточную толщину, чтобы выдерживать заданные напряжения растяжения, сжатия и сдвига;
- наполнитель должен обладать достаточной прочностью, чтобы выдерживать заданные сдвиговые нагрузки;
- наполнитель должен иметь достаточную толщину и модуль упругости при сдвиге, чтобы обеспечить неразрушение сэндвичевой конструкции при изгибных нагрузках:
 - модуль упругости при сжатии наполнителя и предел прочности несущей пластины при сжатии должны быть достаточными, чтобы набежать смятия поверхности под нагрузкой;
 - размер ячеек наполнителя должен быть достаточно мал,



чтобы избежать возникновения потери устойчивости несущих пластин между ячейками при заданных нагрузках на конструкцию;

- наполнитель должен иметь достаточно высокий предел прочности при сжатии, чтобы противостоять, смятию при приложении нагрузок нормально к несущей поверхности или напряжению сжатия, возникающих при изгибе.

2. Последовательное проектирование сэндвичевых конструкций

1. Определение нагрузок.

2. Выбор типа балки. В табл.4 приведены данные для начальных расчётов. Особое внимание необходимо обратить на тип заделки и приложения нагрузки

3. Определение предельных прогибов, Для большинства применений предел прогиба структур обычно не превышает величины $L/360$.

4. Выбор материала для несущих пластин (облицовок). В табл.1 приведены данные по физико-механическим свойствам несущих (облицовочных) материалов. Выбор этих материалов должен учитывать задачи снижения массы, возможность перегрузок, локальные (вминающие) нагрузки, коррозионные свойства и декоративные требования, а также стоимость материала. Обычно выбирают стандартную толщину материала и делают расчет, как будет показано ниже.

5. Расчет первого приближения, определив толщину сэндвичевой структуры h , выбирают величины T , и E . Большинство сэндвичевых структур имеют толщину 1,5 ... 150 мм.

6. Выбор наполнителя. Проводят расчеты сдвиговых напряжений в наполнителе $\tau_{с.с.}$. Исходя из данных табл. 2 и 3 предварительно выбирают материалы. Необходимо дополнительно обратить внимание на то, что сдвиговые свойства в направлениях L и W не одинаковы. После этого проводят вторичный выбор наполнителя с учетом совместимости материалов, размеров и типа ячеек. Исходя из графиков на рис.3, определяют поправки к прочностным характеристикам в зависимости от толщины. Расчетные предельные напряжения сверяют с запасом прочности, вносят корректировки в допустимые напряжения

7. Стрела прогиба. В большинстве применений при расчетах прогиба не учитывают влияния сдвига при прогибе, считая его



малым. Для очень малых стрел прогиба сэндвичевых конструкций при большой толщине этих материалов или при очень малой базе сдвиговая компонента должна учитываться и выбор заполнителя должен осуществляться с учетом влияния модуля сдвига.

Для конструкторских расчетов необходимы следующие данные

о свойствах сэндвичевых структур:

D - жесткость при продольном изгибе:

$$D = E_c t_f^2 / \lambda_f, \text{ Н}\cdot\text{м/м}, \quad (1)$$

E_c - модуль упругости сотового заполнителя при сжатии, Па

E_f - модуль упругости несущей пластины, Па

G_c - модуль сдвига сотового заполнителя, Па

K_b - коэффициент нелинейности при изгибе

K_s - коэффициент нелинейности при сдвиге

L - длина пролета балки, или высота колонны (база), мм

b - ширина балки, мм

P - нагрузка, Н; удельная нагрузка, Н/м

$P_{кр}$ - критическая удельная нагрузка на единицу длины колонны, Н/м

R - удельная нагрузка, вызывающая пластическую деформацию несущей пластине в колонне, Н/м

V - максимальное удельное усилие сдвига в расчете на 1 м ширины, Н/м

d - общая толщина сэндвичевой конструкции (готового заполнителя), мм

h - расстояние между средними осями несущих пластин, мм, $h = t_c + t_f$

s - размер ячейки сотового заполнителя, мм

T - толщина детали, мм;

t_c - толщина сотового заполнителя (рис.1), мм

t_f - толщина несущей пластины (облицовки, обшивки), мм

w - распределённая нагрузка в балке, Па

Δ - максимальная стрела прогиба балки, мм

λ_δ - квадрат коэффициента Пуассона материала несущей пластины,

$$\text{т. е. } (1 - \nu^2)$$

ν - коэффициента Пуассона несущей пластины

σ_f - максимальное напряжение (предел прочности) в материале несущей пластины, Па



σ_y – напряжение пластической деформации (предел текучести) в материале несущей пластины, Па

$T_{с.с}$ – максимальное напряжение сжатия в заполнителе, Па

$T_{с.д}$ – максимальное сдвиговое напряжение в заполнителе.

Па

3. Простейшие формулы, используемые при расчетах

Напряжение изгиба в несущих пластинах:

$$\sigma_{из} = \frac{M}{t_f h} \quad (2)$$

где M определяется по табл.4.

Напряжение при сдвиге в заполнителе:

$$\tau_{с.д} = \frac{V}{h}, \quad (3)$$

где V определяется по табл.15.

Прогиб:

$$\Delta = \frac{2K_b P L^3}{E_{из} t_f h^2} + \frac{K_s P L}{h G_c}, \quad (4)$$

где K_b и K_s определяются по табл.4.

Для большинства балок вторичные эффекты относительно малы, но необходимо оговаривать пределы прогиба или величину базы.

Потеря устойчивости несущей пластины:

$$\sigma_{f кр} = \frac{2E_f}{\lambda} \left[\frac{t_f}{s} \right]^2 \quad (5)$$

Предел прочности при отрыве несущей пластины:

$$\sigma_{f кр} 0,82 = E_{из} \left[\frac{E_c t_f}{E_{из} t_c} \right] \quad (6)$$

Запас прочности:

$$ЗП = \frac{\text{Возможные или типичные напряжения}}{\text{Расчетные напряжения}} \quad (7)$$

Определение параметра

$$h = \frac{K_b P' L^4 2\lambda^{1/2}}{t_f \Delta \cdot E_f} \quad (8)$$



4. Пример расчета сэндвичевой структуры материала плоской прямоугольной балки

Рассмотрим конструкцию плоской прямоугольной балки (например, крыша автобусной стоянки). Пусть нагрузка создается выпавшим снегом и давление составляет 5,7 кПа. Для расчетов будем рассматривать простую балку с пролетом 2,4 м. Предельный прогиб будем считать равным $L/270$, а запас прочности должен быть больше двукратного. Материал несущей пластины - стеклопластик с полиэфирным связующим, а наполнитель - сотовая структура КР-318-БО (25).

При нагрузке $P' = 5,7$ кПа и пролете $L = 2,4$ м выберем из табл.3 следующие значения: $K_b = 0,013$; $K_s = 0,125$; $M = 10,8$; $V = 8,9$.

Выберем толщину несущей пластины $t_f = 2,3 \cdot 10^{-3}$ м.

Для стеклопластиков из табл.1 возьмем $\lambda = 0,98$; $E_f = 29,6$ ГПа.

Вычисляем параметр по формуле (8):

$$h = \frac{K_b P' L^4 2\lambda^{1/2}}{t_f \Delta \cdot E_f} = 0,14 \text{ м.}$$

Толщина наполнителя $t_c \sim 0,135$ м.

Если выбрать толщину несущей пластины $t_f = 3,8$ мм, то расстояние между осевыми линиями пластин $h = 108,6$ мм $\sim 0,109$ м. Если взять за основу общую толщину сэндвичевой конструкции $T = 0,102$ м, то $h = 0,098$ м. Для практической конструкции определим предельно допустимые напряжения в несущей пластине и наполнителя. Для несущих пластин разных толщин имеем с учетом формулы (2) и коэффициентов из таблицы 4:

$$\sigma_f = \frac{P' L^2}{t_f h M_c} = 13,5 \text{ МПа при } t_f = 2,3 \text{ мм}$$

$$\sigma_f \approx 11,45 \text{ МПа при } t_f = 3,8 \text{ мм}$$

Зная напряжения в несущих пластинах, определяем запас прочности в обоих случаях соответственно 19 и 22.

Максимальные сдвиговые напряжения для наполнителя с учетом формулы (3) и коэффициентов из таблицы 4 будут соответственно

$$\tau_{сд} = \frac{P' L}{h V} = 50,9 \text{ кПа;}$$

$$\tau_{сд} = 71,5 \text{ кПа.}$$

Необходимо заметить, что напряжения в заполнителе оказываются очень низкими в обоих случаях, и это не позволяет сделать выбор из двух предложенных вариантов толщины несущей пластины. Для выбора материала заполнителя обратимся к табл.4. Для КР-318-БО (25) предел прочности при сдвиге в W-направлении равен 414 кПа.

Из графика на рис.3 следует, что фактор толщины равен 0,42, а модуль сдвига в W-направлении равен 39,9 МПа.

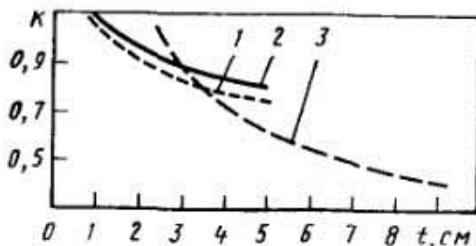


Рис.3. Зависимость поправочного коэффициента K от толщины сотового заполнителя t, 1 – неметаллическая структура, 2 – алюминий, 3 – бумага

Уточненный предел прочности при сдвиге в W-направлении равен $414 \cdot 0,42 = 174$ кПа. Запас прочности ЗП по формуле (7) составит примерно 2,4.

Использование сотового заполнителя КР-3/8-БО (25) с запасом прочности 2,4 является предельным. Типичные значения, приведенные в табл.3, могут значительно меняться для разных материалов. Другие свойства, такие как предел прочности при сжатии и плотность, находятся в пределах допустимого. Необходимо заметить, что может быть использован сотовый заполнитель КР-112-80 (11) с $t_{сд} = 202$ кПа в L-направлении.

Расчет прогиба:

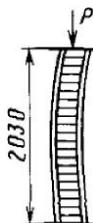
Для сэндвичевой конструкции по формуле (4) с толщиной $t = 0,14$ м определяем реальный фактический прогиб

$$\Delta = \frac{K_b P' L^4}{t_f h^2 E_x} + \frac{K_s P' L^2}{G_c h} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Что не превышает допустимое значение. (Для конструкции толщиной 0,102 м допустимый прогиб $\Delta = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м). Заметим также, что деформация сдвига составляет только 9 % от прогиба.

5. Пример расчета сэндвичевых материалов на устойчивость

Рассмотрим пример расчета колонны с незакрепленными концами:



Несущие пластины из стеклопластика с $\sigma_f = 2,07$ МПа. Из табл.1 имеем: $\nu = 0,98$; $E_f = 29$ ГПа.

Заполнитель: полиуретановый пенопласт плотностью $96,1$ кг/м³ и толщиной $t_c = 0,076$ м. Из табл.3 имеем: $\lambda_{сд} = 0,62$ МПа; $\lambda_{с-с} = 1,1$ МПа; $G_c = 10,3$ МПа.

Нагрузки (при пределе текучести) на материал облицовочной пластины составляют: $P_y = 2t_f$; $\sigma_y = 0,315$ кН/м.

Предельная нагрузка при потере устойчивости (при продольном изгибе):

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 D}{L^2 + \frac{\pi^2 D}{t_c G_c}} = 19,6 \text{ кН/м}$$

где D – жесткость при продольном сдвиге определяется по формуле (1) и составляет:

$D = E_f t_f h^2 / (2\lambda) = 46,3$ кН·м из расчета на 1 м ширины колонны.

Предельная нагрузка разрушения с образованием гофры при сдвиге составит:

$P_{кр} = t_c G_c = 171$ кН·м из расчета на 1 метр ширины колонны.

Таким образом, относительно предельных нагрузок при локальной потере устойчивости с образованием морщины, лунок и пуклей отметим, что поскольку несущие пластины достаточно толстые, а заполнитель - пенопласт, то проблем локальной потери устойчивости не существует.



6. Контрольные вопросы

- Что такое композиционные материалы на основе сэндвичевых структур?
- Основная классификация этих материалов по строению и свойствам
- Привести примеры композиционных материалов на основе сэндвичевых структур и области их применения
- Какие свойства и параметры необходимо знать для определения прочности этих материалов?
- Простейшие способы расчета прочности и устойчивости элементов из композиционных материалов на основе сэндвичевых структур

7. Литература

1. Новые материалы. Под редакцией Карабасова Ю.С. – М: Изд-во МИСИС, 2002.

2. Бобович Б.Б. Неметаллические конструкционные материалы Учебное пособие. – М: Изд-во МГИУ, 2009

3. Справочник по композиционным материалам. Под ред. Дж.Любича. В 2-х томах. – М: Машиностроение, 1988.



ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица.1. Типичные механические свойства материалов несущих пластин сэндвичевых конструкций

Материал облицовочного слоя	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, Е, ГПа	Квадрат коэф. Пуассона, $\lambda_{\delta} = (1-\nu^2)$	Масса 1 м ² , толщиной 1мм
Алюминиевые сплавы:				
2024-Т3	800	160	0,89	2,69
7075-Т6	1169	160	0,89	2,69
Углеродистая сталь	800	480	0,91	7,68
Титановый сплав	1290	240	0,94	4,52
Углепластик	3500	320	0,99	1,54
Стеклопластик	608	29,6	0,98	1,35
Стеклопластиковые препреги на основе смол:				
эпоксидной	1009	56	0,98	1,83
фенольной	769	56	0,98	1,61
полиэфирной	769	56	0,98	1,92
полиамидной	961	56	0,98	1,83
кевлар	961	70	0,99	1,35



Новые конструкционные материалы

Таблица 2. Свойства сотовых структур из крафт-бумаги

Заполнитель с шестигранными ячейками	ρ , кг/м ³	Сжатие скрепленных ячеек		Сдвиг в плоскости слоя			
				L-направление		W-направление	
		$\sigma_{ск}$	$E_{ск}$	$T_{сд}$	$G_{сдL}$	$T_{сд}$	$G_{сд}$
		кПа	МПа	кПа	МПа	кПа	МПа
кр 1/4-80 (11)	80	2758	461	13 24	208	593	45
кр 3/8-60 (25)	31	1379	310	75 8	101	414	400
кр 1/2-60(25)	30	896	241	62 1	83	317	34
кр 1/2-80 (H)	30	862	200	48 3	72	248	26
кр 1/2-80 (18)	35	965	234	54 5	82	283	30
кр 3/4-80 (11)	21	496	110	30 3	44	165	16
КР3/4 -80 (18)	24	621	138	31 0	45	193	21
кр 3/4- 99 (11)	24	462	62	35 9	44	193	26
кр 3/4-99 (18)	24	462	66	35 9	36	214	24



Новые конструкционные материалы

Таблица 3. Свойства некоторых специальных видов сотовых структур на основе стеклопластиков

Размер шестигранной ячейки, плот- ность	Сдвиг в плоскости пластины					
	L-направление			W-направление		
	$\tau_{сд}$ кПа		G $G_{сд}$ МПа	$\tau_{сд}$ кПа		$G_{сд}$ МПа
	тип.	МИН.		тип.	Мин.	
			ТИП.	тип.	Мин.	Тип.
HRH 327-3/16-4,0	.1930		199	896		68
HRH 327-3/16-4.5	2206	1516	227	1034	758	75
HRH 327-3/16-5,0	2551		255	1241		86
HRH 327-3/16-6,0	3171	2378	310	1585	117 2	103
HRH 327-3/16-8,0	4481	3447	427	2826	227 5	151
HRH 327-3/8-4.0	1930	1344	199	1034	689	82
HRH 327-3/8-7.0	3792		365	2137		127

Табл.4. Данные для расчета основных конструкционных элементов из сэндвичевых материалов

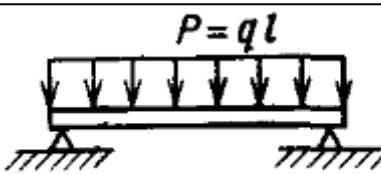
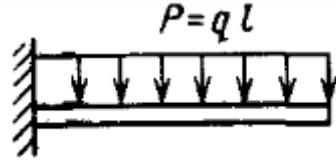
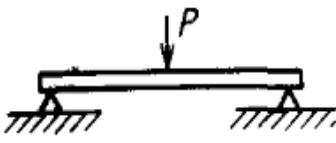
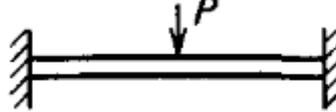
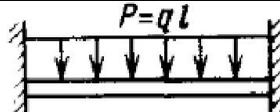
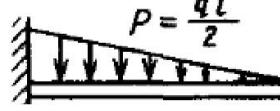
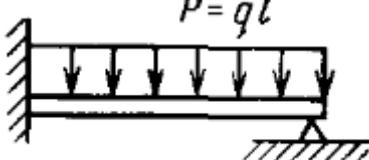
Опора и нагрузка	Тип элемента	V	M	K_b	K_c
Простая опора, распределённая нагрузка		$P/2$	$PL/8$	$5/384$	$1/8$
заделка концов, распределённая нагрузка		$P/2$	$PL/12$	$1/384$	$1/8$
Простая опора, сосредоточенная нагрузка		$P/2$	$PL/4$	$4/192$	$1/4$
Заделка концов, сосредоточенная нагрузка		$P/2$	$PL/8$	$1/192$	$1/4$
Консоль, распределенная нагрузка		P	$PL/2$	$1/8$	$1/2$
Консоль, линейно падающая нагрузка		P	$PL/3$	$1/15$	$1/3$
Консоль с простой опорой, распределенная нагрузка		$5P/8$	$PL/8$	$1/185$	$1/142$



Табл.5. Задание для расчета

Вариант	Материал пластин	Толщина пластины t_f , мм	Материал сотового заполнителя	Размер конструктивного элемента, L, м	Нагрузка, P, кН	Давление, P^1 , кН/м
1	Al-сплав	1,0	кр 1/4-80 (11)	2,0		
2	Ti-сплав	2,0	кр 1/2·60(25)	3,0		
3	сталь	3,0	кр 1/2-80 (18)	2,0		
4	углепластик	1,0	КРЗ/4 -80 (18)	3,0		
5	стеклопластик	2,0	HRH 327-3/16-4,0	2,0		
6	кевлар	3,0	HRH 327-3/16-4.5	3,0		
7	Al-сплав	0,5	HRH 327-3/16-5,0	2,0		
8	Ti-сплав	1,5	HRH 327-3/8-4.0	3,0		
9	сталь	2,5	кр 3/4-80 (11)	2,0		
10	углепластик	0,5	кр 3/4- 99 (11)	3,0		
11	стеклопластик	1,5	HRH 327-3/16-6,0	2,0		
12	кевлар	2,5	HRH 327-3/8-7.0	3,0		

РАСЧЕТ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Аннотация

Изложены сведения, необходимые студентам для выполнения индивидуального задания по практическим занятиям.

Методические указания предназначены для специальностей 050501, 080502, 150001 – 150003, 151000, 190206, 190603, 220401 – 220402, 260601, 280202 всех форм обучения.

Составители: проф. Кохановский В.А.
проф. Журавлев Л.А.





Целью практического занятия является закрепление теоретического материала и приобретение знаний методики и умения рассчитывать подшипники скольжения с композиционным полимерным самосмазывающимся покрытием.

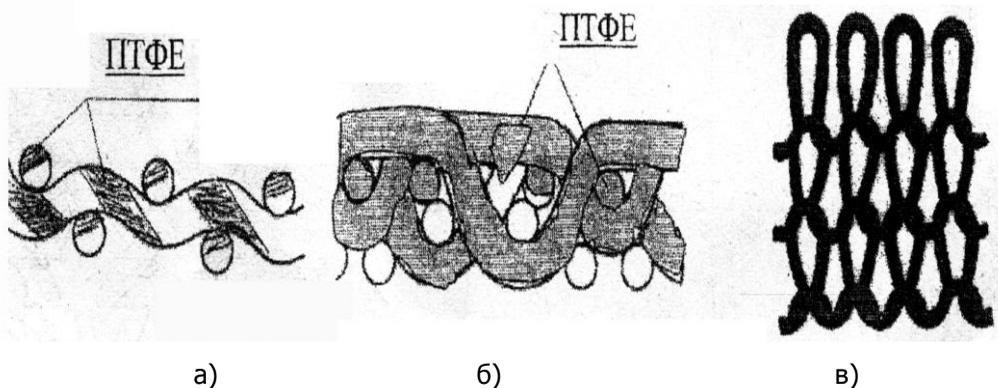
1. Общие положения.

Металлополимерные подшипники скольжения с композиционным самосмазывающимся покрытием предназначены для относительно низких скоростей скольжения (до $0,4 \text{ м/с}$) и высоких нормальных контактных напряжений (до 250 МПа).

Покрытие представляет собой композит толщиной 0,2-0,8 мм, состоящий из армирующей компоненты в виде специальной технической ткани из полимерных волокон и непрерывной фазы - матрицы, представляющей собой фенолкаучуковое связующее. Закрепление покрытия на субстрате (подложке) производится матричным связующим.

Армирующая компонента покрытия (см. рис.) представляет собой ткань саржевого, атласного переплетения или трикотажа, у которых на рабочую лицевую поверхность выведено 60 - 100% фторопластовых нитей «полифен» (товарное наименование) а на изнанку, приклеиваемую к субстрату - до 80% полиимидных нитей «аримидТ». Фторопласт выполняет трибофункции, полиимид – прочностные.

Полимерные материалы весьма чувствительны к температурному воздействию, поэтому расчет начинается с определения температуры.



Армирующий каркас
 а) однослойная ткань; б) полуторослойная ткань; в) кулирный трикотаж.

2. Исходные данные.

2.1. Индивидуальное задание.

Таблица 1

№ п/п	Диаметр d, мм	Ширина b, мм	Нагрузка P, кН	Частота вращения n, мин ⁻¹
1	2	3	4	5
1	20	25	30	110
2				100
				90
3			26	100
				90
				80
4		30	30	110
				100
				90
5			26	100



Новые конструкционные материалы

6				90
				80
7	30	30	24	90
8				80
9				70
10			22	80
11				70
12				60
13		45	24	90
14				80
15				70
16			22	80
17				70
18				60
19	40	40	20	70
20				60
21				50
22			25	60
23				50
24				40
25		50	20	70
26				60
27				50
28			25	60
29				50
30				40

2.2. Дополнительные исходные данные.

- 1) Толщина покрытия - $\delta = 0,55\text{мм}$;
- 2) Окружающая температура - $t_c = 25^\circ\text{C}$;
- 3) Допустимый износ подшипника - $[h] = 0,4\text{мм}$;
- 4) Коэффициент неравномерности нагрева - $K_T = 0,9$;



5) Средний коэффициент теплоотдачи $\alpha = 12 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

6) Монтажный зазор в подшипнике $2\Delta = 0,03\text{мм}$.

7) Коэффициент трения $f \approx 0,025$.

8) Параметры материала стальной втулки и вала:

Плотность - $\rho_1 = 7850 \frac{кг}{м^3}$;

Удельная теплоемкость - $C_1 = 469 \frac{Дж}{кг \cdot К}$;

Коэффициент теплопроводности - $\lambda_1 = 48,15 \frac{Вт}{м \cdot К}$

9) Параметры материала покрытия:

Плотность - $\rho = 1350 \frac{кг}{м^3}$;

Удельная теплоемкость - $C = 1200 \frac{Дж}{кг \cdot К}$;

Коэффициент теплопроводности - $\lambda = 0,25 \frac{Вт}{м \cdot К}$

2.3. Данные для примера

1) $t_c = 22^\circ\text{C}$; 2) $d = 24 \text{ мм}$; 3) $b = 30 \text{ мм}$;

4) $P = 30 \text{ кВт}$; 5) $n = 100 \text{ мин}^{-1}$.

3. Порядок расчета.

3.1. Наружный диаметр подшипниковой втулки

$$D = (1,2 - 1,3)d \text{ (мм)} ;$$

Пример: $D = 24 \cdot 1,3 = 31,2 \text{ мм}$, принимаем 30мм.

3.2. Площадь наружной поверхности подшипниковой

штуки. Площадью торцов пренебрегаем.

$$F = \pi D b \quad (\text{м}^2); \text{ Пример: } F = \pi \cdot 0,03 \cdot 0,03 = 0,00283 \text{ м}^2$$

3.3. Скорость скольжения

$$V = \frac{\pi d n}{60000} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right); \text{ Пример:}$$

$$V = \frac{\pi \cdot 24 \cdot 100}{60000} = 0,126 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

3.4. Коэффициент распределения тепловых потоков (для потока, идущего через полимер)

$$\beta = 1 - \frac{\sqrt{\lambda_{cp}}}{\sqrt{\lambda_{cp}} + \sqrt{\lambda_1 c_1 p_1}};$$

Пример:

$$\beta = 1 - \frac{\sqrt{7850 \cdot 469 \cdot 48,15}}{\sqrt{7850 \cdot 469 \cdot 48,15} + \sqrt{1350 \cdot 1200 \cdot 0,25}} = 0,046$$

3.5. Количество генерируемого тепла

$$Q = \beta \cdot f \cdot P \cdot V \quad (\text{Вт})$$

$$\text{Пример: } Q = 0,046 \cdot 0,025 \cdot 30000 \cdot 0,126 = 4,25 \text{ Вт.}$$

3.6. Температура в зоне трения

$$t_0 = t_c + Q \cdot \left[\frac{1}{2\pi b} \cdot \left(\frac{2\delta}{\lambda d} + \frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{D}{d + 2\delta} \right) + \frac{1}{\alpha K_T F} \right] \leq 250^\circ \text{C}$$

Если температура превышает 250°C, то необходимо увеличить ширину подшипника «b».

Пример:



$$t_0 = 22 + 4,35 \cdot \left[\frac{1}{2\pi \cdot 0,03} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,55 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 0,024} + \frac{1}{48,15} \ln \frac{0,03}{0,0251} \right) + \frac{1}{12 \cdot 0,9 \cdot 0,03} \right]$$

3.7. Среднее нормальное контактное напряжение (по проекции шейки вала)

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{b \cdot d} \quad (\text{МПа}); \quad \text{Пример:}$$

$$\sigma = \frac{30000}{0,024 \cdot 0,03} = 41,67 \text{ МПа}$$

3.8. Абсолютная деформация ползучести в диаметральной сечении вала

$$\delta = 0,022 \bar{\sigma}^{0,295} \Delta^{0,027} 1,4^T \quad (\text{мм}), \quad \text{где } T - \text{температура в } \text{K} \cdot 10^{-2}$$

$$\text{Пример: } \delta = 0,022 \cdot 41,67^{0,295} \cdot 0,02^{0,027} \cdot 1,4^{4,42} = 0,26 \text{ мм}$$

3.9. Полуугол дуги контакта вал - подшипник

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \delta};$$

$$\text{Пример: } \cos \varphi_0 = \frac{0,015}{0,015 + 0,26} = 0,055, \quad \text{а } \varphi_0 =$$

1,51 радиан.

3.10. Средние нормальные контактные напряжения (по дуге контакта)

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{b \cdot d \cdot \varphi} \quad (\text{МПа}); \quad \text{Пример:}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{30000}{0,024 \cdot 0,03 \cdot 1,51} = 27,6 \text{ МПа}$$



Новые конструкционные материалы

3.11. Установившейся радиальный модуль покрытия

$$E = 10,57 \cdot 1,003^{-T} \sigma^{1,02-0,02T} \text{ (МПа)} ;$$

$$\text{Пример: } E = 10,57 \cdot 1,003^{-4,42} \cdot 27,6^{1,02-0,02 \cdot 4,42} = 229,44 \text{ МПа}$$

3.12. Несущая способность покрытия

$$\sigma_{\text{вв}} = 1137,4 - 217,16 T \text{ (МПа)} ;$$

где $\sigma_{\text{вв}}$ – напряжения, вызывающие при данной температуре вынужденную высокоэластичность покрытия.

$$\text{Пример: } \sigma_{\text{вв}} = 1137,4 - 217,16 \cdot 4,42 = 177,6 \text{ МПа}$$

3.13. Допустимый угол перекоса вала в подшипниках

$$\psi = \frac{2 \cdot (\sigma_{\text{вв}} - \bar{\sigma}) \cdot \delta}{b \cdot E} \text{ (рад)} ;$$

Пример:

$$\psi = \frac{2 \cdot (177,6 - 27,6) \cdot 0,55}{30 \cdot 229,44} = 0,0436 \text{ рад} = 2,5 \text{ градуса}$$

3.14. Коэффициент трения

$$f = 12,27 \bar{\sigma}^{-0,722} \cdot T^{-2,691} ; \text{ Пример: } f = 12,27 \cdot 27,6^{-0,722} \cdot 4,42^{-2,691} = 0,02$$

Примечание: При отличии полученного f от принятого в п.п. 3.6, 3.8 – 3.14. 5 более чем на 50% следует пересчитать п.п. 3.6, 3.8 – 3.14.

3.15. Интенсивность изнашивания

$$J = 9,36 \cdot 10^{-14} \cdot \sigma^{2,61} \cdot \nu^{1,41} \cdot e^{1,79T} ;$$

$$\text{Пример: } J = 9,36 \cdot 10^{-14} \cdot 27,6^{2,61} \cdot 0,126^{1,41} \cdot e^{1,79 \cdot 4,42} = 7,936 \cdot 10^{-8}$$

3.16. Ресурс всего покрытия

$$R = 91955,6 \cdot 10^6 \bar{\sigma}^{-2,51} \nu^{0,136} \lg \sigma^{-2,75} e^{-1,88T} \text{ (циклов нагружения)} ;$$



Пример:

$R = 91955,6 \cdot 10^6 \cdot 27,6^{-2,51} \cdot 0,126^{0,136} \lg 27,6^{-2,75} e^{-1,88 \cdot 4,42} = 1,09 \cdot 10^6$
цикл. нагр.

3.17. Ресурс подшипника

$$R_n = \frac{[h]R}{60\delta \cdot n} \quad (\text{час}) ; \text{Пример:}$$

$$R_n = \frac{0,4 \cdot 1,09 \cdot 10^6}{60 \cdot 0,55 \cdot 100} = 132,12 \text{ час}$$

3.18. Вывод о работоспособности подшипника

Пример:

Подшипник обеспечивает при принятых эксплуатационных режимах непрерывную работу в течении 132,12 часа.

4. Контрольные вопросы.

1. Что такое напряжения вынужденной высокоэластичности?
2. Какой эксплуатационный параметр оказывает наибольшее влияние на полимерные материалы?
3. Что представляет собой непрерывная фаза полимерного композита- покрытия?
4. Какой полимер в композиционном покрытии выполняет антифрикционные функции?

5. Литература

1. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров / Г.М.Бартенев, В.В.Лаврентьев. – Л.:Химия,1972. – 237с.
2. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый, А.И. Свириденюк, Н.И. Петроковец и др. – Минск: Наука и техника,1976. – 431с.



ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «НКМ»

1. Общая характеристика современных машиностроительных отраслей промышленности. Классификация современных конструкционных материалов. Свойства новых материалов, металлов и сплавов (физические и химические, механические, эксплуатационные и технологические).
2. Понятие о конструкционной прочности и долговечности в экстремальных условиях эксплуатации современных машин и агрегатов.
3. Строение и свойства конструкционных материалов и современных металлических порошковых материалов. Порошковая металлургия. Методы получения порошков и изготовление из них изделий.
4. Варианты получения готовых изделий по схеме «прессование-спекание». Сквозные технологические схемы гранульной металлургии высоколегированных сталей и сплавов с капсулированием и горячей деформацией капсул (изостатическая прессование, изостатическая штамповка, экструзия).
5. Получение интегральных изделий. Антифрикционные и фрикционные материалы. Пористые фильтрующие элементы.
6. Порошковые интерметаллиды. Интерметаллиды титана с алюминием и железа с алюминием. Механическое легирование.
7. Понятие о наноматериалах и нанотехнологиях. Ультрадисперсные материалы. Области применения. Свойства. Получение ультрадисперсных порошков, нанокристаллов и нановолокон. Применение нанотехнологий для получения новых конструкционных материалов.
8. Виды полимеров. Их свойства. Технология получения полимеров и области применения. Понятие о термореактивных и термопластичных полимерах.
9. Пластмассы – классификация, свойства и области применения. Особенности технологий производства изделий и деталей из пластмасс.
10. Резины и резинотехнические изделия и уплотнения.
11. Керамика, стекло и технологии производства



Новые конструкционные материалы

лия из таких материалов. Использование керамических материалов как заменителей традиционных материалов.

12. Дисперсноупрочненные искусственные и естественные композиты. Композиты на базе никеля, алюминия, титана. Керамические композиты.

13. Волокнистые и слоистые композиты. Механизм упрочнения. Области применения. Технология получения конструкционных композитов. Слоистые металлоорганопластики. Углепластики.

14. Композиты с керамической матрицей.

15. Армированные стали.

16. Использование композиционных материалов как заменителей традиционных металлов.

17. Критерии жаростойкости, жаропрочности и хладопрочности. Понятие коррозионной стойкости. Структура, свойства новых материалов и сплавов, предназначенных для работы в подобных условиях эксплуатации.

18. Суперсплавы. Сплавы криогенной техники. Тугоплавкие металлы. Радиационностойкие материалы.

19. Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами. Металлы с памятью формы.

20. Аморфные и нанокристаллические сплавы

21. Современные технологии получения покрытий технологиями наплавки и напыления. Металлические и неметаллические покрытия.

22. Осаждение в вакууме или из газовой фазы.

23. Органические полимерные покрытия. Применение покрытия в современном машиностроении.

24. Материалы для пайки и склеивания. Современные припои, флюсы, клеи. Современные виды клеевых и паяных соединений и технологий пайки и склеивания.