

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Е. П. Щербакова, В. И. Абрамова

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины для студентов,
обучающихся в магистратуре по направлениям подготовки
15.04.01 Машиностроение, 15.04.02 Технологические машины и оборудование

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2026

УДК 691.669.017(075)

Рецензент

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инжиниринга
технологического оборудования ФГБОУ ВО «КГТУ» Д. Б. Подашев

Щербакова, Е. П.

Новые материалы в машиностроении: учеб.-методич. пособие по изучению дисциплины для студентов, обучающихся в магистратуре по напр. подгот. 15.04.01 Машиностроение, 15.04.02 Технологические машины и оборудование / Е. П. Щербакова, В. И. Абрамова – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2026. – 75 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины «Новые материалы в машиностроении» представлены учебно-методические материалы по освоению тем лекционного курса, включающие подробный план лекции по каждой изучаемой теме, вопросы для самоконтроля для направления подготовки 15.04.01 Машиностроение, 15.04.02 Технологические машины и оборудование, всех форм обучения.

Табл. 3, список лит. – 6 наименований

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 30 сентября 2026 г., протокол № 1

УДК 691.669.017(075)

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2026 г.
© Щербакова Е. П., Абрамова В. И.,
2026 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	7
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	70
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	72
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	73

ВВЕДЕНИЕ

В учебно-методическом пособии изложен краткий теоретический материал по дисциплине «Новые материалы в машиностроении» для студентов всех форм обучения по специальности 15.04.01 Машиностроение, 15.04.02 Технологические машины и оборудование.

Дальнейшее развитие машиностроения невозможно без наукоемких технологий. Практически все современное оборудование имеет электронную систему управления, которая позволяет осуществлять производство нового поколения технических систем, высокоэффективных, переналаживаемых, многокоординатных станков и роботов. Одновременно происходит компьютерное сопровождение всего жизненного цикла создания и эксплуатации изделия.

Дисциплина «Новые материалы в машиностроении» относится к блоку 1 части ОПОП ВО по направлению подготовки 15.04.01 Машиностроение, 15.04.02 Технологические машины и оборудование.

Целью освоения дисциплины «Новые материалы в машиностроении» является формирование знаний и умений в области анализа и идентификации свойств специальных материалов при проектировании изделий машиностроения.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

знать:

- основные свойства специальных конструкционных, инструментальных, машиностроительных материалов;
- особенности применения композиционных, полимерных и других неметаллических материалов для специального машиностроения;
- специальные способы повышения несущей способности и износостойкости деталей;
- области применения специальных материалов повышенной долговечности;

уметь:

- устанавливать по марке материала технологические свойства материалов опытных образцов машиностроительных деталей;
- определять свойства специальных конструкционных и сырьевых материалов, применяемых в производстве;
- определять твердость специальных материалов;
- определять режимы отжига, закалки и отпуска стали;
- подбирать специальные конструкционные материалы по их назначению и условиям эксплуатации;

владеть:

- навыками распознавания материала по марке, расшифровке его химического состава;
- методами измерения параметров и определения свойств специальных материалов;
- способами применения специальных прокладочных и уплотнительных материалов.

Для успешного освоения дисциплины «Новые материалы в машиностроении», студент должен активно работать на лекционных занятиях, организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность.

Для оценивания поэтапного формирования результатов освоения дисциплины (текущий контроль) предусмотрены. Тестовое задание предусматривает выбор правильного ответа на поставленный вопрос из предлагаемых вариантов ответа. Перед проведением тестирования преподаватель знакомит студентов с вопросами теста, а после проведения тестирования проводит анализ его работы. Перечень примерных тестовых заданий представлен в фонде оценочных средств по данной дисциплине.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме зачёта. Универсальная система оценивания результатов обучения включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) «зачтено», «не зачтено»; 3) 100-балльную (процентную) систему и правило перевода оценок в пятибалльную систему (таблица 1).

При необходимости для обучающихся-инвалидов или обучающихся с ОВЗ предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учетом их индивидуальных психофизических особенностей.

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
1. Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно-корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
2. Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно-корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно-корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

Для успешного освоения дисциплины «Новые материалы в машиностроении» в учебно-методическом пособии по изучению дисциплины приводится краткое содержание каждой темы занятия, перечень ключевых вопросов для подготовки к практическим занятиям и организации самостоятельной работы студентов.

1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Осваивая курс «Новые материалы в машиностроении», студент должен научиться работать на лекциях, лабораторных занятиях и организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность. В начале лекции необходимо уяснить цель, которую лектор ставит перед собой и студентами. Важно внимательно слушать, отмечать наиболее существенную информацию и кратко ее конспектировать; сравнивать то, что услышано на лекции с прочитанным и усвоенным ранее материалом в области систем числового программного управления, укладывать новую информацию в собственную, уже имеющуюся, систему знаний. По ходу лекции необходимо подчеркивать новые термины, определения, устанавливать их взаимосвязь с изученными ранее понятиями.

Тематический план лекционных занятий (ЛЗ) представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Объем (трудоемкость освоения) и структура ЛЗ

№ темы	Содержание лекционного занятия
1	Металлические сплавы
2	Керамические и композиционные материалы
3	Наноструктурные материалы
4	Полимерные материалы и функциональные порошковые материалы
5	Синтетические сверхтвёрдые материалы и покрытия
6	Многофункциональные покрытия

Если лектор приглашает студентов к дискуссии, то необходимо принять в ней активное участие. Если на лекции студент не получил ответа на возникшие у него вопросы, он может в конце лекции задать эти вопросы лектору курса дисциплины.

Тема 1. Металлические сплавы

Ключевые вопросы темы

1. Развитие машиностроения.
2. Классификация чугунов и сталей.
3. Классификация специальных сталей.
4. Конструкционные износостойкие стали и подшипниковые стали.
5. Жаростойкие и жаропрочные стали.

Ключевые понятия: чугуны, стали, жаропрочность, жаростойкость.

Литература: [1, с. 15–68].

Методические рекомендации

Развитие машиностроения неразрывно связано с производством новых материалов. Наука «материаловедение» уходит своими корнями в далекое прошлое, поскольку во все времена от использования природных и созданных человеком материалов зависели прочность, надежность и долговечность выполненных из них деталей, изделий и машин.

Выпускаемые в настоящее время изделия работают в очень тяжелых эксплуатационных условиях. Столетия известные стали и чугуны уже не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к различным изделиям многих отраслей техники. Условия работы современных машин и приборов выдвигают требования прочности и стойкости материалов в широком интервале температур – от $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ у сжиженного гелия до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше при динамических нагрузках, в вакууме и в горячих потоках активных газов. Решение важнейших технических задач, связанных с экономным расходом материалов для современной техники, обогащает материаловедение.

Чугуны – это железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода $4,3\% \geq C \geq 2,14\%$.

Белый чугун в основном перерабатывают на сталь, поскольку он обладает высокими твердостью и хрупкостью и плохо поддается механической обработке. В таких чугунах углерод находится в связанном состоянии в виде цементита Fe_3C . Помимо углерода в состав чугуна входят марганец (0,5–1,75 %), кремний (0,2–1,75 %), фосфор (0,15–2,0 %), сера (до 0,08 %) и другие химические элементы.

Белый чугун используется также в качестве износостойкого конструкционного материала. При введении в небольших количествах марганца, бора, ванадия, молибдена, титана, хрома образуются сложные и твердые карбиды.

Ковкие чугуны маркируют по пределу прочности на разрыв с размерностью кгс/мм^2 и относительному удлинению. В соответствии с ГОСТ 1215-79 существуют марки ковких чугунов от КЧ 30-6 до КЧ 80-15. По своим механическим и литейным свойствам ковкие чугуны занимают промежуточное положение между чугунами и литыми сталями. Они нашли широкое применение при изготовлении деталей автомобилей, тракторов, текстильных и сельскохозяйственных машин, металлорежущих станков (шестерни, ступицы, тормозные колодки, картеры дифференциалов, рычаги, звездочки, катки, втулки, детали рулевого управления и др.), а также в вагоно- и судостроении.

Серые чугуны маркируются по пределу прочности на разрыв с

размерностью кгс/мм², но при указании механических свойств используют размерность в МПа. Например, чугун марки СЧ15 имеет прочность на разрыв 150 МПа (15 кгс/мм²). ГОСТ 1412-85 предусматривает марки серых чугунов от СЧ 10 до СЧ 45. СЧ 10, СЧ 15 (твердость по Бринеллю до 229 НВ) – чугуны малой прочности; СЧ 20-СЧ 45 (твердость до 241 НВ) – чугуны повышенной прочности. В них большая часть углерода находится в виде пластинчатого графита. Они обладают хорошими литейными и демпфирующими свойствами, и нашли широкое применение в станкостроении (станины, стойки, траверсы, корпуса коробок скоростей и подач, суппорты металлорежущих станков), в авто- и тракторостроении (картеры коробок скоростей, блоки цилиндров, поршневые кольца, диски сцепления, тормозные барабаны), в химическом и электромашиностроении, при производстве деталей насосов, компрессоров и других изделий.

Высокопрочные чугуны в соответствии с ГОСТ 7993-85 имеют следующие марки: ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80 и ВЧ 100.

Цифры обозначают предел прочности при растяжении в кгс/мм². В них свободный графит находится в виде шаровидных включений. Высокопрочный чугун используется в тяжелом машиностроении (детали турбин, валки прокатных станов, шаботы молотов), в автомобильной промышленности (блоки цилиндров, шестерни главных передач, коленчатые и распределительные валы, ступицы, поршневые кольца), в сельскохозяйственном и транспортном машиностроении (сцепки вагонов, ступицы колес, диски муфт, опорные катки, корпуса плугов, зубья борон), а также при изготовлении других ответственных деталей.

При маркировке легированных чугунов используются следующие обозначения: А – азот, Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, Е – селен, К – кобальт, М – молибден, Н – никель, П – фосфор, Р – бор, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий. Маркировка состоит из сочетания букв и цифр, указывающих содержание легирующего элемента в процентах. Если цифр нет, то содержание составляет 1–1,5 %.

Легированные чугуны подразделяются на: износостойкие, коррозионно-стойкие, жаростойкие, жаропрочные и антифрикционные.

Износостойкие чугуны, например, ИЧХ4Г7Д, ИЧХ28Н2, ИЧХ28Н2М2, ИЧХ3ТД, ИЧХ15МЗ используют для изготовления рабочих элементов дробебетных и пескоструйных машин, броневых плит мельниц, лопастей шнеков, абразивных насосов и др.

Коррозионностойкие чугуны легируют медью, молибденом, хромом, никелем и кремнием, что позволяет им работать в химически агрессивных средах. Чугуны ЧНХТ, ЧН1МШ, ЧН1ХМД широко используют в двигателестроении для изготовления выпускных патрубков, поршней и гильз паровых машин, газовых компрессоров, судовых дизелей и других изделий.

Жаростойкие чугуны (ГОСТ 7769-82) обладают стойкостью к образованию окалины. Их выпускают с добавками алюминия, хрома и кремния.

Алюминиевые чугуны обладают большой стойкостью к окислению в среде печных газов при температурах 1100–1150 °С, паров серы при температуре 1000 °С. Они используются при изготовлении тиглей, для футеровки печных камер, в доменных печах. Хромистые чугуны ЖЧХ-0,8, ЖЧХ-1,5, ЖЧХ-2,5 используют при строительстве мартеновских, доменных и термических печей. Они могут выдерживать температуру до 650 °С. Высокохромистые чугуны (ЖЧХ-30) применяют при изготовлении колосниковых решеток, горелок, коробок для отжига, работающих при температуре до 900 °С. Кремнистые чугуны работают при температурах до 900 °С. Из них изготавливают детали газовых турбин, котлов, мартеновских печей и др.

Жаропрочные чугуны легируют никелем и хромом. Чугуны ЧН11Г7Х2Ш, ЧН19Х3Ш используют для деталей печной арматуры, роликов листопрокатных станов, в нефтяной и химической промышленности, выпускных патрубков дизелей и др.

Антифрикционные чугуны (ГОСТ 1585-85), например, АСЧ-4, АКЧ-1, АВЧ-2 (обозначают А – антифрикционный, Ч – чугун, С – серый, В – высокопрочный, К – ковкий) применяются в узлах трения в паре с другими материалами для изготовления подшипников скольжения.

Конструкционные стали применяют для изготовления различных по назначению деталей машин. Низкоуглеродистые стали обычно подвергают цементации, среднеуглеродистые – улучшению.

Конструкционные стали обыкновенного качества имеют три группы:

- группа А – поставляется по механическим свойствам (применяется для малоответственных деталей, армирования железобетонных конструкций);
- группа Б – по химическому составу (применяется для изготовления горячекатанной проволоки, листа, холоднокатанной ленты);
- группа В – по химическому составу и механическим свойствам (для изготовления судового листа, гнутого профиля при строительстве вагонов и др.).

Конструкционные качественные стали имеют содержание углерода:

05, 08, 10, 20-45, 50. Используют для изготовления средненагруженных деталей машин различного назначения.

Подшипниковые стали применяют при производстве деталей подшипников качения (кольца, ролики, шарики, иголки). Для обычных подшипников используют стали марок ШХ6, ШХ9, ШХ10, ШХ15, ШХ15СГ, для прецизионных – 20Х2Н4А-Ш, ШХ15-ШД, получаемые вакуумно-дуговым переплавом.

Стали для холодной листовой штамповки и высадки подразделяются на группы: для нормальной, глубокой, весьма глубокой, сложной и особо сложной вытяжки.

При холодной штамповке используют листовую сталь марок 10кп, 20кп, 10пс, 20пс, легированную – 10Г2, 12Х2НМФА, 23Х2НВФА, 25ХГСА, 25ХГФ, 30ХГС и др. Для высадки используют стали, обладающие в холодном состоянии хорошей пластичностью: 08кп, 20кп, 15Х, 30Х, 12ХН, 18Х2Н4МА, 19ХГН, 20ХГСА, 30Х, 30ХНМА.

Специальные стали – это сплавы на основе железа, отличающиеся от обычных сталей особыми свойствами, обусловленными либо их химическим составом, либо особым способом производства, либо способом их обработки. Достаточно наличия одного из этих факторов, чтобы сталь можно было назвать специальной. Чаще всего специальные стали характеризуются всеми тремя особенностями. Это относится также и к легированным сталям с высоким содержанием легирующих элементов. Изучением свойств стали ученые и технологи занимаются с давних времен.

Стали и сплавы специального назначения благодаря своим уникальным свойствам находят широкое применение в электроэнергетике, станкостроении, машиностроении, медицине и здравоохранении, а также в создании различных агрегатов и устройств для нужд автомобильной, химической и авиационно-космической промышленности.

В металлургии известны сотни сталей и сплавов, отличающихся выдающимися служебными характеристиками. На данный момент нет однозначной их классификации, в связи с тем, что во многих случаях стали относят к специальным даже по одному из трех указанных признаков:

- по химическому составу;
- по способу производства;
- по способу обработки.

Износостойкими называются стали, характеризующиеся высоким сопротивлением изнашиванию (шарикоподшипниковые, высокомарганцовистые и др.). Шарикоподшипниковые стали марок ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ применяются для изготовления колец, шариков и роликов подшипников качения. Высокое содержание углерода (0,95–1,15 %) и хром, среднее содержание которого указано в марке в десятых долях процента, обеспечивают их высокую твердость. Кроме того, хром увеличивает прокаливаемость стали. Окончательной термической обработкой является закалка с температур 830–880 °С (в зависимости от марок стали) в масле и низкотемпературный отпуск при 150–160 °С на твердость не ниже 61–65 HRC.

Износостойкие стали применяют для изготовления деталей, работающих в условиях высоких давлений, ударных нагрузок с одновременным истиранием (трамвайные и железнодорожные стрелки и крестовины, гусеничные траки,

звездочки, детали дробильных установок и др.) используется, к примеру сталь 110Г13Л. Структура этой стали – высокоуглеродистый аустенит, легированный марганцем. Этот аустенит в условиях трения скольжения при больших удельных нагрузках и ударах наклёпывается и твердость стали повышается до 45–48 HRC при сохранении других свойств.

Подшипники являются ответственными деталями машин и механизмов. Они во многом определяют точность и производительность металлорежущих станков, надежность электродвигателей, качество автомобилей, тракторов, вагонов и т. д. Отечественная промышленность производит более 5 тысяч типоразмеров подшипников диаметром от 0,5 до 3,0 м.

Коррозией называется процесс самопроизвольного разрушения материалов вследствие химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой.

Коррозия бывает 2-х видов:

- химическая (протекает при непосредственном взаимодействии металла и среды без возникновения электрического тока);
- электрохимическая (разрушение металлов связано с возникновением электрического тока под действием электролитов или других причин).

Жаростойкость – способность металла сопротивляться окислению в газовых средах (воздух, газы, водяной пар) при высоких температурах. Оксиды бывают рыхлые и плотные. В рыхлых – скорость окисления большая, в плотных – невысокая.

Процессы, происходящие на поверхности сплава

При температурах до 570 °С на поверхности образуются плотные оксиды Fe_2O_3 и Fe_3O_4 , поэтому окисление идёт медленно.

При $T > 570$ °С эти оксиды растрескиваются и, под ними, образуется быстро растущий рыхлый слой FeO с низкой прочностью. Эти три оксида образуют окалину.

Жаростойкость стали повышают легированием хромом, алюминием и кремнием, которые образуют на поверхности плотные оксидные плёнки типа $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$, $(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_3$, с хорошими защитными свойствами.

Содержание хрома составляет 5...28 %, кремния 2...3 %, алюминия 5...6 %

Жаростойкость определяется, прежде всего, количеством легирующих элементов в стали и мало связана со структурой. При равном содержании хрома, температура образования окалины $T_{\text{ок}}$ повышается на 100...150 °С при легировании кремнием и алюминием.

Жаропрочность – свойство материала сопротивляться пластической деформации и разрушению при длительном воздействии нагрузки и температурах $> 0,3T_{\text{пл}}$. При этих температурах наблюдаются процессы ползучести и релаксации напряжений.

Ползучесть – это увеличение со временем пластической деформации под действием напряжений, меньших предела текучести. В предварительно нагруженных деталях происходит релаксация напряжений (самопроизвольное уменьшение напряжений). При повышенных температурах с течением времени уменьшаются напряжения в крепёжных деталях, ослабевают натяги и т. п.

Факторами, способствующими жаропрочности, являются:

- высокая температура плавления основного металла;
- наличие в сплаве твёрдого раствора и мелкодисперсных упрочняющих фаз;
- пластическая деформация, вызывающая наклёп;
- высокая температура рекристаллизации;
- рациональное легирование;
- термическая и термомеханическая обработка;
- введение в жаропрочные стали бора, церия, ниобия, циркония, (в десятых, сотых и даже тысячных долях).

Жаропрочность сталей обеспечивается легированием и термической обработкой для получения однородной структуры с дисперсными частицами карбидов, интерметаллидов и других частиц.

Жаропрочные стали перлитного класса – это низко- и среднелегированные сплавы (часто легированные хромом, молибденом и ванадием), способные длительно работать под нагрузкой при температурах до 570 – 600 °С без разрушения (ползучести). Основные марки регламентируются ГОСТ 20072-74 и современными стандартами. Популярные марки и их применение 12Х1МФ и 15Х1МФ: используются для изготовления труб паровых котлов, паропроводов и коллекторов высокого давления. Рабочая температура – до 570–600 °С.

25Х1МФ и 20Х1М1ФТР (ЭИ415): применяются в турбостроении для тяжелонагруженных деталей – роторов, дисков и крепежных элементов.

12Х2МФСР (ЭИ531): жаропрочный сплав, выдерживающий интенсивные тепловые нагрузки в энергетическом оборудовании.

15Х5М: высоколегированная сталь перлитного класса, применяемая для труб и крепежа в нефтехимической промышленности с рабочей температурой до 600 °С.

Особенности структуры и свойства

Структура: Основой после термической обработки (отпуска) является феррит и карбиды легирующих элементов.

Работоспособность: Максимальный предел длительной прочности сохраняется при температурах от 350 до 575 °С. Стали обладают хорошей свариваемостью, но требуют последующей термообработки шва.

Устойчивость к окислению: при температурах выше 550 °С склонны к интенсивному окислению, поэтому для защиты от коррозии используют специальные покрытия или среды.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем чугуны отличаются от сталей?
2. Какова классификация чугунов?
3. Что собой представляет классификация сталей?
4. При каких температурах способны работать жаропрочные и жаростойкие стали?

Тема 2. Керамические и композиционные материалы

Ключевые вопросы темы

1. Керамические материалы.
2. Аддитивные технологии.
3. Классификация композитов.
4. Керамические и углеродные композиты.
5. Композиты с памятью формы.

Ключевые понятия: керамика, технология, углепластик, композиты, эффект памяти формы.

Литература: [1, с. 70–120].

Методические рекомендации

Керамика – это поликристаллические материалы и изделия из них, состоящие из соединений неметаллов III–VI групп периодической системы с металлами или друг с другом и получаемые путем формования и обжига соответствующего исходного сырья. Исходным сырьем могут служить как вещества природного происхождения (силикаты, глины, кварц и др.), так и получаемые искусственно (чистые оксиды, карбиды, нитриды и др.).

Керамики, неметаллические материалы и изделия, получают с помощью спекания глин или порошков неорганических веществ. По структуре керамика подразделяется на грубую, которая имеет крупнозернистую неоднородную в изломе структуру (пористость 5–30 %), и тонкую – с однородной мелкозернистой структурой (пористость <5 %). К грубой керамике относят многие строительные керамические материалы, например, лицевой кирпич, к тонкой – фарфор, пьезо- и сегнетокерамики, ферриты, керметы, некоторые огнеупоры и др., а также фаянс, полуфарфор, майолику. В особую группу выделяют так называемую высокопористую керамику (пористость 30–90 %), в

которую обычно относят теплоизоляционные керамические материалы. В данном определении установлены два отличительных признака керамики: химический состав и технология.

Керамика уникальна тем, что сохраняет прочность при высоких температурах. Различают два основных класса – неоксидную (нитриды, карбиды, бориды) и оксидную (кварцевая, алюмооксидная, циркониевая и др.) керамику. Эти материалы применяются там, где металлы и полимеры теряют свойства.

Ракетостроение невозможно без керамических материалов. Современные ракеты требуют от обтекателей: термостойкости, высокой прочности, низкой теплопроводности, высокой эрозионной стойкости, температура эксплуатации должна выдерживать более 1700 градусов, низкого температурного коэффициента линейного расширения, стабильных диэлектрических свойств в широком диапазоне частот.

Применение керамики позволяет повысить: скорость, маневренность, точность наведения, дальность поражения цели.

Ракеты становятся быстрее и маневреннее, поэтому материалы обтекателей должны выдерживать всё более жесткие условия эксплуатации. Применяют кварцевую керамику и алюмооксидную керамику. Каждая имеет свои достоинства и недостатки. Кварцевая имеет достоинства: термостойкость, теплопроводность, стабильная диэлектрика. Недостатки: темп плавления 1720 градусов, слабая эрозионная стойкость, низкая прочность. Алюмооксидная имеет достоинства: темп плавления 2050 градусов, прочность при низкой темп, эрозионная стойкость. Недостатки: низкая термостойкость, падение прочности с ростом температуры.

Оптически прозрачная керамика – направление, которое долго считалось невозможным. Благодаря удалению пор и совершенствованию технологии спекания получены материалы, пропускающие свет и сохраняющие прочность. На данный момент используют два материала – алюмомагниева шпинель и оксинитрид алюминия – ALON. Преимущества данных материалов: высокая прочность, высокая температура плавления, высокая твердость и износостойкость, стабильные диэлектрические характеристики, оптическая прозрачность в диапазоне 0,2–6 мкм.

ALON – уникальный материал, способный заменить многослойные бронестёкла. Он вдвое легче и прочнее традиционного стекла, выдерживает попадание пуль, применяется в авиации и военной промышленности.

Другой перспективный материал – алюмомагниева шпинель. Она сочетает высокую прочность, термостойкость и достаточную прозрачность, применяется в оптических системах и бронезащите.

В газотурбинных двигателях применение керамических материалов позволяет: улучшить термодинамический цикл двигателя, повысить

надежность, увеличить ресурс, а также позволяет снизить его массу. Это в свою очередь влияет на: экономию топлива, увеличение КПД, увеличение тяги, повышение скорости и увеличение дальности полета.

Используют керамические материалы при производстве таких деталей ГТД как: элементы камеры сгорания, надроторные вставки, рабочие лопатки, сопловые лопатки. На данный момент все это внедрено в производство современных двигателей лайнеров.

Современные аддитивные технологии позволяют создавать керамические изделия послойным нанесением материала. Это снижает отходы и даёт возможность изготавливать сложные теплозащитные элементы. Аддитивные технологии (3D-печать) в производстве керамики – это передовой метод послойного создания высокоточных изделий, который позволяет обходить ограничения традиционных способов литья и механической обработки. Печать технической керамикой применяется в космонавтике, биомедицине, электронике и оборонной промышленности благодаря уникальным свойствам материала: экстремальной термостойкости, химической инертности и высокой твердости.

Основные технологии 3D-печати керамикой.

Керамические материалы имеют экстремально высокую температуру плавления, поэтому большинство аддитивных методов являются многоступенчатыми (косвенными): сначала создается «зеленая» заготовка из смеси керамического порошка и связующего полимера, которая затем обжигается.

Современное развитие техники и промышленности требует создания материалов, которые одновременно обладают высокой прочностью, малой массой и устойчивостью к воздействию окружающей среды. В авиации, машиностроении, космической и автомобильной промышленности снижение массы конструкций напрямую влияет на экономичность, надёжность и эффективность изделий. Традиционные металлы во многих случаях не способны обеспечить необходимый комплекс свойств, что приводит к активному внедрению композитных материалов.

Композиты представляют собой класс искусственно созданных материалов, которые не встречаются в готовом виде в природе и формируются одновременно с компонентами конечного изделия в рамках единого технологического процесса. Такой способ получения обуславливает специфику их структуры и эксплуатационных характеристик. В основе композитных материалов лежит комбинация матрицы и армирующих элементов, что обеспечивает сочетание высокой прочности и небольшой массы, а также устойчивость к агрессивным средам. Именно эти свойства во многом определяют их широкое применение в авиакосмической технике и современном машиностроении.

Классификация композитных материалов традиционно строится по типу матрицы и характеру армирования. В данном обзоре выделены четыре основные группы: полимерные, металлические, керамические и углеродные композиты. Каждая из перечисленных групп обладает набором характерных свойств и технологических ограничений, что в свою очередь диктует области их применения. Переход от общей характеристики к рассмотрению конкретных типов позволит последовательно раскрыть их преимущества и недостатки, а также показать, какие задачи решаются с их помощью в инженерной практике.

Полимерные композиты формируются за счёт сочетания полимерной матрицы – в большинстве случаев эпоксидной смолы – и армирующих элементов, представленных волокнами из стекла, углерода или арамидов. Главной особенностью таких материалов является анизотропия: их механические и физические свойства зависят от направления армирования. Это позволяет целенаправленно «проектировать» материал под конкретные эксплуатационные требования, задавая направление и плотность размещения волокон. При этом матрица выполняет роль защитной среды для волокон и обеспечивает перераспределение напряжений между элементами армирования.

К положительным качествам полимерных композитов относятся высокая удельная прочность и стойкость к коррозии, а также относительная простота обработки методами литья и аддитивного производства. Вместе с тем следует учитывать ограничения: высокая стоимость материалов и сложность переработки, чувствительность к ультрафиолетовому излучению и ударам, а также ограниченная термостойкость – порядка 150–200 °С. Эти характеристики накладывают ограничения на области применения и требуют учета при проектировании изделий, где предполагаются повышенные температурные нагрузки или интенсивное воздействие внешних факторов.

Металлические композиты строятся на основе металлической матрицы, как правило, алюминия, магния или титана, укреплённой армирующими элементами: керамическими частицами или волокнами на базе SiC, Al₂O₃ и других неорганических материалов. Такая комбинация позволяет совмещать высокую температуру эксплуатации и механическую жёсткость металла с износостойкостью и повышенной жёсткостью, присущими армирующим фазам. При этом сохраняется относительная целостность металлической матрицы, что обеспечивает хорошую теплопроводность и способность к передаче нагрузок.

К достоинствам металлических композитов относятся высокая износостойкость, удельная прочность и жесткость, превышающие соответствующие характеристики чистых металлов примерно в 1,5–2 раза, а также повышенная усталостная прочность и теплопроводность. Несмотря на это, производство таких композитов остаётся дорогостоящим: сложны процессы обработки и методы соединения, ограничена ремонтпригодность изделий. Эти технологические факторы необходимо учитывать при решении о

применении металлических композитов, особенно в тех случаях, где важна возможность последующего ремонта или экономическая эффективность массового производства.

Применение металлических композитов включает элементы двигателей и шасси самолётов, тормозные диски и поршни автомобилей, а также конструкции спутников и тепловые экраны. Во всех перечисленных областях востребованы высокая термостойкость (до 500 °С), прочность при динамических и циклических нагрузках, а также улучшенные износные характеристики, которые достигаются за счёт сочетания металлической матрицы и керамического армирования.

Керамические композиты представляют собой многофазные конструкционные материалы, у которых матрицей выступает керамика, а армирование обеспечивается волокнами, частицами или слоями других керамических либо неорганических материалов. Структура таких композитов сочетает жаропрочность и стойкость к окислению, присущие керамической матрице, с повышенной ударной вязкостью и трещиностойкостью, которые обычно отсутствуют у традиционной монокристаллической керамики. Это сочетание расширяет область применения керамики в конструкциях, испытывающих высокие температуры и агрессивные среды.

Керамические композиты обладают высокой температурной стойкостью: примерно в диапазоне 1200–2000 °С, высокой ударной вязкостью и удельной прочностью, а также отличной коррозионной и окислительной стойкостью. Вместе с тем они отличаются очень высокой стоимостью и сложностью обработки. Кроме того, при низких температурах проявляется хрупкость, что ограничивает их применение в условиях, где возможны внезапные термошоки или значительные механические удары при низких температурах. Указанные факторы необходимо учитывать при выборе материалов для газотурбинных установок, ракетных сопловых элементов и других высокотемпературных узлов.

Типичные области применения включают газотурбинные установки электрогенераторов, носовые обтекатели и конусы сопел для ракет, а также тормозные системы авиационных, космических и спортивных транспортных средств. Во всех этих случаях ключевую роль играет способность керамических композитов работать при высоких температурах и устойчивость к окислению, что делает их незаменимыми в специфичных термоагрессивных средах.

Углеродные композиты – это класс конструкционных материалов, образуемых углеродными волокнами, встроенными в полимерную матрицу, обычно эпоксидную смолу; существуют также углеродно-углеродные композиты, где матрицей служит углерод. Углеродные волокна характеризуются высоким модулем упругости и исключительной прочностью на растяжение. Тонкие волокна (диаметр 5–8 мкм), которые формируют

армирующую структуру, принимают на себя основное растягивающее усилие, тогда как матрица защищает их от механических повреждений и обеспечивает передачу нагрузок между волокнами. Такая архитектура определяет ключевые преимущества углеродных композитов при создании лёгких и прочных конструкций.

К достоинствам углеродных композитов относятся очень высокая удельная прочность – соотношение прочность/масса превышает стальную в 5–8 раз, низкая масса изделий, высокая усталостная прочность и коррозионная стойкость. Вместе с тем необходимо учитывать высокую стоимость материалов и сложность производственных процессов, а также трудности при механической обработке. Эти ограничения влияют на экономическую целесообразность широкого внедрения углеродных композитов и определяют сферы, где их преимущества оправдывают затраты.

Примеры использования углеродных композитов включают авиационные конструкции: Boeing 787 и Airbus A350, в которых углепластик составляет более 50 % от структуры. Кроме того, в премиум-классе и в сегменте электромобилей углеродные композиты применяются для несущих элементов кузова, капотов и дверей; также материалы используются в спортивном инвентаре — теннисных ракетках, лыжных палках и горнолыжном снаряжении. Эти примеры демонстрируют, что углеродные композиты востребованы там, где критична комбинация малой массы и высокой прочности.

Композиты в совокупности представляют собой материалы, в которых сочетание матрицы и армирования обеспечивает важную конструктивную комбинацию: высокую прочность при малой массе и устойчивость к экстремальным условиям. Разные типы композитов – полимерные, металлические, керамические и углеродные – обеспечивают инженерные решения для различных технологических задач. Полимерные композиты обеспечивают лёгкость и коррозионную стойкость; металлические – повышенную термостойкость и прочность при высоких температурах; керамические – работу в экстремально высоких температурных режимах; углеродные – исключительную удельную прочность при минимальной массе. Именно такое сочетание делает композитные материалы востребованными в современной технике и машиностроении.

Композиты позволяют объединять свойства различных веществ и формировать материалы с заранее заданными характеристиками. Одним из наиболее значимых представителей данного класса является углепластик – материал, который за короткое время стал основой многих высокотехнологичных конструкций.

В большинстве современных композитов армирующий компонент представлен в виде волокон или тканых структур. Матрица может быть полимерной, металлической или керамической. Существенной особенностью

композитов является возможность управлять их свойствами за счёт ориентации волокон.

Углепластик относится к полимерным композитам. В нём армирующую роль выполняют углеродные волокна, обладающие высокой прочностью и жёсткостью при минимальной массе, а матрицей обычно служит эпоксидная смола. Материал имеет слоистую структуру, в которой волокна укладываются под различными углами, что обеспечивает прочность в нескольких направлениях.

Ключевым преимуществом углепластика является высокая удельная прочность – отношение прочности к массе. По этому показателю он превосходит большинство традиционных металлов. Материал обладает высокой жёсткостью, устойчивостью к усталостным нагрузкам и низкой плотностью.

Кроме того, углепластик устойчив к коррозии, химически инертен и эффективно гасит вибрации. Рабочий температурный диапазон определяется типом полимерной матрицы и обычно достигает 150–200 °С.

Производство углепластиковых изделий является сложным многоэтапным процессом. Сначала изготавливается форма, затем осуществляется укладка углеродных волокон с заданной ориентацией. После этого материал пропитывается связующим или применяются препреги. Для удаления воздуха используется вакуумирование, а окончательное формирование свойств происходит в процессе отверждения при повышенной температуре и давлении. Соблюдение технологии на всех этапах является критически важным для получения качественного изделия.

Углепластик широко применяется в авиации и космической технике, где снижение массы конструкции имеет решающее значение. Он используется в автомобилестроении, особенно в спортивных и высокопроизводительных автомобилях, а также в судостроении, энергетике, спорте и медицине.

К основным преимуществам углепластика относятся высокая прочность при малой массе, коррозионная стойкость, долговечность и возможность создания конструкций сложной формы. К недостаткам можно отнести высокую стоимость, сложность контроля качества и чувствительность к локальным ударным нагрузкам. Композитные материалы и углепластик, в частности, стали важнейшим элементом современной инженерии. Они позволяют создавать лёгкие, прочные и эффективные конструкции, расширяя возможности проектирования. Несмотря на существующие ограничения, углепластик уже сегодня занимает ключевое место в высокотехнологичных отраслях и будет играть всё более значимую роль в будущем развитии промышленности.

Эффект памяти формы – явление возврата к первоначальной форме при нагреве, которое наблюдается у некоторых материалов после предварительной деформации.

Одно из базовых восприятий людьми явлений внешнего мира – это стойкость и надёжность металлических изделий и конструкций, стабильно сохраняющих свою функциональную форму продолжительное время, если, конечно, они не подвергаются закритическим воздействиям.

Однако существует ряд материалов, металлических сплавов, которые при нагреве после предварительной деформации демонстрируют явление возврата к первоначальной форме.

В исходном состоянии в материале существует определённая структура.

При деформации (в данном случае изгибе) внешние слои материала вытягиваются, а внутренние сжимаются (средние остаются без изменения). Эти вытянутые структуры – мартенситные пластины, что не является необычным для металлических сплавов. Необычным является то, что в материалах с памятью формы мартенсит термоупругий.

При нагреве начинает проявляться термоупругость мартенситных пластин, то есть в них возникают внутренние напряжения, которые стремятся вернуть структуру в исходное состояние, то есть сжать вытянутые пластины и растянуть сплюснутые.

Поскольку внешние вытянутые пластины сжимаются, а внутренние сплюснутые растягиваются, материал в целом проводит автодеформацию в обратную сторону и восстанавливает свою исходную структуру, а вместе с ней и форму.

В процессе проявления эффекта памяти формы участвуют мартенситные превращения двух видов — прямое и обратное. Соответственно, каждое из них проявляется в своем температурном интервале: МН и МК – начало и конец прямого мартенситного превращения при охлаждении, АН и АК – начало и конец обратного мартенситного превращения при нагреве.

Температуры мартенситных превращений являются функцией как марки сплава (системы сплава), так и его химического состава. Небольшие изменения химического состава сплава (намеренные или как результат брака) ведут к сдвигу этих температур.

Отсюда следует необходимость строгой выдержки химического состава сплава для однозначного функционального проявления эффекта памяти формы, что переводит металлургическое производство в сферу высоких технологий.

Эффект памяти формы проявляется несколько миллионов циклов; его можно усиливать предварительными термообработками.

Возможны реверсивные эффекты памяти формы, когда материал при одной температуре «вспоминает» одну форму, а при другой температуре – другую.

Чем выше температуры обратного мартенситного превращения, тем в меньшей степени выражен эффект памяти формы. Например, слабый эффект

памяти формы наблюдается в сплавах системы Fe–Ni (5–20 % Ni), у которых температуры обратного мартенситного превращения 200–400 °С.

В ряду функциональных свойств памяти формы важное теоретическое и практическое значение принадлежит явлению так называемой деформации ориентированного превращения. Смысл этого наследственного феномена заключается в следующем. Если охлаждаемое под напряжением тело разгрузить в области температур реализации пластичности прямого мартенситного превращения и не прекратить понижение температуры, далеко не всегда продолжающееся охлаждение не будет вызывать макроскопического деформирования. Наоборот, чаще всего деформация продолжает накапливаться, как если бы материал почти не разгружали. В других случаях имеет место интенсивный возврат при охлаждении. Такие свойства, первое из которых принято называть деформацией ориентированного превращения, второе — аномальным возвратом деформации, связывают с подрастанием возникших под нагрузкой кристаллов мартенсита — в случае деформации ориентированного превращения кристаллов положительной ориентации, а в случае аномального возврата — отрицательной ориентации. Названные явления могут быть инициированы, в частности, ориентированными микронапряжениями.

Сверхупругость

Другим явлением, тесно связанным с эффектом памяти формы, является сверхупругость — свойство материала, подвергнутого нагружению до напряжения, значительно превышающего предел текучести, полностью восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки [1]. Сверхупругость наблюдается в области температур между началом прямого мартенситного превращения и концом обратного.

Полимеры с памятью формы (ППФ)

Полимеры с памятью формы (ППФ) (англ. Shape-memory polymers, SMP) — класс полимерных материалов, способных возвращаться из деформированного состояния к первоначальной форме под воздействием внешних стимулов, таких как температура, свет, электрическое или магнитное поле, изменение pH или влага. По сравнению со сплавами с памятью формы (СПФ), ППФ обладают меньшей плотностью, большей пластичностью, биосовместимостью (опционально) и возможностью настройки свойств, что делает их перспективными для применения в медицине, аэрокосмической отрасли, текстильной промышленности, робототехнике и 4D-печати.

Материалы с эффектом памяти формы

На конец XX века эффект памяти формы был обнаружен более чем у 20 сплавов.

Au–Cd — разработан в 1951 году в Иллинойском университете (США); один из пионеров материалов с памятью формы;

Cu–Zn–Al – наряду с никелидом титана имеет практическое применение; температуры мартенситных превращений в интервале от -170 до 100 °C; по сравнению с никелидом титана не подвержен быстрому окислению на воздухе, легко обрабатывается и в пять раз дешевле, но хуже по механическим (вследствие укрупнения зерна при термообработке), противокоррозионным и технологическим свойствам (проблемы стабилизации зерна в порошковой металлургии), характеристикам формозапоминания;

Cu–Al–Ni – разработан в Осацком университете (Япония); температуры мартенситных превращения в интервале от 100 до 200 °C;

Fe–Mn–Si – сплавы этой системы наиболее дешевые.

Некоторые исследователи полагают, что эффект памяти формы принципиально возможен у любых материалов, претерпевающих мартенситные превращения, в том числе и у таких чистых металлов как титан, цирконий и кобальт.

Никелид титана

Лидером среди материалов с памятью формы по применению и по изученности является никелид титана (нитинол) – интерметаллид эквиатомного состава с 55 % Ni (по массе).

Нитинол (англ. nitinol, никелид титана, название произошло от англ. nickel – никель, англ. titanium – титан, англ. Naval ordnance laboratory, сокр. NOL – Лаборатория морской артиллерии США) – интерметаллид, соединение титана и никеля, в процентном соотношении 45 % (титан) – 55 % (никель) и с равным количеством атомов каждого вещества. Название получил из сочетания формулы (NiTi) и сокращения названия места, где был разработан (Naval Ordnance Laboratory→NOL). Необычно то, что данное соединение обладает свойством памяти формы. Если деталь сложной формы подвергнуть нагреву до красного каления, то она запомнит эту форму. После остывания до комнатной температуры деталь можно деформировать, но при нагреве выше 40 °C она восстановит первоначальную форму. Такое поведение связано с тем, что, фактически, этот материал является интерметаллидом, а не классическим сплавом, и свойства исходных материалов (Ni, Ti) практически в нём не выражены. Уникальным его делает свойство, благодаря которому при закалке взаимное расположение атомов упорядочивается, что приводит к запоминанию формы.

Открытие эффекта памяти формы восходит к 1932 году, когда шведский исследователь Арне Оландер первым заметил это свойство в золото-кадмиевых сплавах. Такой же эффект обнаружен в медно-цинковых сплавах в начале 1950-х. Советские металлурги Г. В. Курдюмов и Л. Г. Хандрос в 1948 году предсказали, а в 1949 году обнаружили сплав на основе алюминиевой бронзы, наделённый способностью после значительных пластических деформаций восстанавливать первоначальную форму при нагреве до определённой

температуры. В 1980 году это изобретение было признано открытием и стало известно, как эффект Курдюмова (Явление термоупругого равновесия при фазовых превращениях мартенситного типа – эффект Курдюмова. Открытие № 239 от 8 марта 1948 г. в части теоретического предсказания явления и 17 марта 1949 г. в части его экспериментального обнаружения). В 1962 году Уильям Бюлер вместе с Фредериком Вангом обнаружили сильный эффект памяти формы у сплава на основе никеля и титана в ходе исследований в военно-морской лаборатории. Хотя и сразу было осознано потенциальное применение нитинола, реальные попытки коммерциализации сплава произошли спустя десять лет. Эта задержка возникла в значительной степени из-за чрезвычайной трудности плавления, переработки и обработки сплава.

Производство сплава – достаточно сложный процесс, состоящий из нескольких стадий:

- Плавка;
- Переплавка;
- Литьё;
- Придание необходимой формы.

Производство осложнено тем, что для получения высококачественного сплава, необходимо тщательно выверять количество первичных компонентов, а при плавлении титан легко взаимодействует с газами, из-за чего плавка проходит с использованием вакуумно-индукционного метода и вакуумно-дуговой переплавки. Также термообработка нитинола требует высокой точности, так как длительность и температура сильно влияют на температуры фазового превращения.

При вакуумно-индукционном методе исходный слиток готовят в графитовых печах. Это позволяет получить хорошо смешанный сплав, но при этом возникает некоторое количество соединения титана с углеродом. Вакуумно-дуговая переплавка необходима для уменьшения содержания примесей и включений, а также обеспечения необходимой литой структуры. Далее следуют литьё для получения заготовок и придание необходимой формы заготовкам.

Материал находит применение в медицине, в частности, для лечения пациентов с заболеваниями и травмами опорно-двигательного аппарата: воронкообразная деформация грудной клетки («грудь сапожника»), переломы позвонков, шишки на ногах. Также применяется в стоматологии для ортодонтического лечения: металлические дуги брекет-систем сделаны из данного материала. Кроме того, NASA начала использовать нитинол при создании суперэластичных шин.

При восстановлении формы нитинол способен совершать работу. Именно этот факт позволил использовать нитинол в медицине. С помощью нитиноловых фиксаторов соединяются и выпрямляются сломанные части

костей. Нитиноловая спираль способна восстановить сечение поврежденного сосуда в организме человека.

В стоматологии тоже найдено применение этому сплаву. Для ортодонтии открытие свойств нитинола было настоящим прорывом. Ранее дуги для брекетов делались из стали, и чтобы подкрутить их пациент должен был приходить к врачу каждую неделю, что вызывало страшную боль. Современные дуги в стоматологии делают из нитиноловой проволоки. Этот металл оказывает постоянное давление на зубы в течение долгого времени, доведя их в итоге до нужной формы. Это позволило уменьшить количество посещений врача-стоматолога и в целом упростить процедуру исправления прикуса.

Термомеханические соединения (ТМС) труб и стержней. Принцип создания ТМС заключается в следующем. Трубы 1 соединяются муфтой 2 из сплава с ЭПФ, внутренний диаметр которой в аустенитном состоянии меньше наружного диаметра труб. Муфту вначале охлаждают ниже M_n и расширяют (дорнуют) так, чтобы она могла быть свободно надета на трубы. Затем муфта надевается на концы труб и нагревается до температуры выше A_c . При этом муфта, пытаясь восстановить свой первоначальный размер в условиях противодействия со стороны труб, генерирует значительные реактивные напряжения, которые обеспечивают прочное (а при необходимости и герметичное) соединение труб. Описанный способ применим для соединения деталей из любых материалов, например, металла, стекла, пластмассы и др.

Термомеханический крепеж. Для неподвижного соединения деталей обычно применяются заклепки и болты. Однако, (при невозможности доступа к противоположной стороне скрепляемых деталей) может быть использован термомеханический крепеж.

Вопросы для самоконтроля

1. Где используется ударопрочная керамика?
2. Какова область применения радиопрозрачных керамических материалов?
3. Какой материал называется композиционным?
4. Какие материалы являются радиационно-стойкими?
5. Какова область использования металлов, обладающих памятью формы?

Тема 3. Наноструктурные материалы

Ключевые вопросы темы

1. Структура полимерных, биологических и углеродных наноматериалов.
2. Механические свойства наноматериалов.

3. Основные методы получения наноматериалов.

4. Применение наноматериалов.

Ключевые понятия: пластмасс, резина, клеящие материалы, конструкционные порошковые материалы, фрикционные порошковые материалы.

Литература: [3, с. 121–190].

Методические рекомендации

Прежде чем перейти к нанообъектам, необходимо закрепить фундаментальное понятие. Композит – это гетерогенная система, состоящая из двух или более фаз с четко выраженной границей раздела.

Матрица (непрерывная фаза) обеспечивает форму, защищает наполнитель от внешней среды и передает на него механическую нагрузку. В зависимости от природы матрицы выделяют полимерные (ПМК), металломатричные (ММК) и керамические (КМК) композиты.

Наполнитель (армирующая фаза) воспринимает нагрузку и придает материалу специфические свойства: прочность, жесткость, электро- или теплопроводность.

Переход к нанокомпозитам стал качественным скачком в материаловедении. В отличие от традиционных композитов (например, стеклопластиков), где наполнитель имеет микронные размеры, использование нанообъектов увеличивает площадь поверхности раздела фаз в тысячи раз. Это позволяет достигать «синергетического эффекта» при крайне низких концентрациях наполнителя, создавая материалы с уникальным сочетанием свойств (например, сверхлегкий пластик с проводимостью металла).

Углеродные нанотрубки (УНТ) – это цилиндрические структуры, образованные свернутым в трубку листом графена. Они являются идеальным армирующим наполнителем благодаря своему уникальному аспектному соотношению (отношению длины к диаметру, $L/D \sim 1000$ и более) и рекордным физико-механическим характеристикам.

Классификация и геометрия

1. SWCNT (одностенные): Идеальный цилиндр диаметром 0.4–2 нм. Представляют собой один свернутый слой графена. Обладают наиболее выраженными квантовыми эффектами и рекордной проводимостью.

2. MWCNT (многостенные): Набор вложенных друг в друга трубок (структура «матрешки»). Диаметр варьируется от 5 нм до 100 нм. Они более доступны в производстве и чаще используются в конструкционных композитах.

3. Хиральность: Это угол сворачивания графенового листа, определяемый индексами (n, m) . Хиральность критически важна: в зависимости от нее

нанотрубка может обладать свойствами либо металла, либо полупроводника, что делает их уникальными для наноэлектроники.

4. Сравнение с углеволокном: Важно не путать УНТ с обычным углеродным волокном. Если углеволокно – это микроструктурный материал с множеством дефектов, то УНТ – это практически идеальный монокристалл. Это обуславливает их превосходство в удельной прочности (в десятки раз выше) и площади активной поверхности.

«Рекордные свойства» в сравнении с другими композитами

Прочность, электропроводность, теплопроводность, аспектное соотношение.

Методы Синтеза.

1) Химическое осаждение из газовой фазы (CVD)

Наиболее распространенным промышленным методом синтеза УНТ является Химическое Осаждение из Газовой Фазы (CVD).

1. Катализатор: УНТ выращиваются на подложке с нанесенными на нее наночастицами катализатора (чаще всего железа, никеля или кобальта).

2. Рост: Углеродсодержащий газ (например, метан или ацетилен) подается в реактор. При высокой температуре атомы углерода разлагаются, растворяются в катализаторе и осаждаются на нем, формируя растущую трубку.

3. Результат: Этот метод позволяет контролировать тип (однослойные или многослойные) и длину получаемых УНТ.

2) Дуговой разряд (Arc Discharge)

Один из первых методов синтеза. Между двумя графитовыми электродами в инертном газе зажигается дуга. Испаряющийся углерод конденсируется в виде УНТ.

– Плюс: Высокое качество кристаллической структуры.

– Минус: Сложность контроля и большое количество примесей (сажи).

3) Лазерная абляция (Laser Ablation)

Графитовая мишень испаряется под действием мощного лазерного импульса в высокотемпературной печи.

– Плюс: Позволяет получать преимущественно одностенные трубки (SWCNT) высокого качества с узким распределением по диаметрам.

Механизмы Функционального усиления

В нанокомпозитах УНТ, введенные в матрицу (полимер, металл, керамика) в малых концентрациях, выступают в качестве армирующего наполнителя.

1. Механическое упрочнение

При введении УНТ в матрицу работают следующие физические механизмы:

– Передача напряжений. Матрица передает внешнюю нагрузку на УНТ через интерфейс. Благодаря огромной площади поверхности, даже малая доля трубок принимает на себя основную часть напряжения.

– Перекрывание трещин. Когда в матрице зарождается микротрещина, нанотрубки «сшивают» её берега. Чтобы трещина росла дальше, ей нужно либо разорвать трубку, либо вытянуть её из матрицы.

– Вытягивание. Процесс трения трубки о матрицу при попытке её вытягивания поглощает колоссальную энергию, что резко повышает вязкость разрушения (материал перестает быть хрупким).

2. Электрическая проводимость и порог перколяции.

УНТ способны превратить диэлектрическую матрицу в электропроводящий материал.

– Порог перколяции: Это критически низкая концентрация наполнителя, при которой УНТ впервые формируют непрерывную проводящую сеть внутри матрицы.

– Благодаря высокому аспектному соотношению (L/D), УНТ достигают порога перколяции при очень низких долях – как правило, менее 1.0 % масс. Это позволяет получить легкий и проводящий материал, не жертвуя его основными механическими свойствами.

3. Теплопроводность

Перенос тепла в УНТ осуществляется за счет фононов (квантов колебаний кристаллической решетки). В нанокompозитах УНТ создают «тепловые мостики», однако здесь возникает проблема теплового сопротивления интерфейса – на границе «трубка-матрица» фононы рассеиваются, что снижает реальную эффективность теплопередачи.

Влияние размера зерен на свойства наноматериалов.

В наноматериалах имеется возможность многократного увеличения физико-механических характеристик, таких как твердость, прочность, износостойкость и др., которые зависят от размеров зерен, наличия пор и дефектов, которые способствуют зарождению микротрещин.

С уменьшением размеров зерен твердость увеличивается, а прочность и пластичность существенно снижаются.

Наличие в структуре дефектов приводит к зарождению трещин, что приводит к снижению прочности и пластичности. Поэтому механические свойства наноматериалов зависят от остаточных напряжений, наличия примесей, пор и других дефектов.

Если структура не имеет дефектов, то границы зерен являются препятствиями на пути распространения дислокаций и трещин, что повышает прочность и твердость наноматериалов.

Наиболее доступными являются испытания образцов на твердость наноинденторами при нагрузке 0,01 Н. При этом поверхность испытываемых

образцов не должна иметь дефектов (впадин, выступов и т. д.). При исследовании многослойных покрытий в виде пленок наблюдаются двухфазные структуры с поверхностью раздела, которая является препятствием на пути распространения дислокаций и трещин.

Твердость металлических наноматериалов может быть увеличена в 5–6 раз; для хрупких – в 2–3 раза.

При проведении испытаний на растяжение должен быть образец, у которого длина больше поперечного сечения, а поперечное сечение значительно превышает размер зерна. Это позволяет получить информацию о пределе текучести, пределе прочности и относительном удлинении при растяжении.

В современной инженерии непрерывно растет потребность в материалах, обладающих уникальным сочетанием свойств, которое недостижимо для традиционных монокристаллических сплавов. Аэрокосмическая отрасль, высокопроизводительный транспорт и микроэлектроника требуют материалов, которые были бы одновременно легкими, прочными, жесткими и способными работать в экстремальных условиях. Ответом на этот вызов стало создание композиционных материалов.

Композиционный материал (или композит) – это материал, состоящий из двух или более компонентов с различными физическими и химическими свойствами, которые, будучи объединенными, создают материал с характеристиками, превосходящими характеристики отдельных составляющих.

Среди всех композитов особое место занимают металломатричные композиты (ММК). Если полимерные композиты (как углепластик) произвели революцию в XX веке, то ММК считаются одним из самых перспективных направлений XXI века. Они сочетают в себе лучшие качества металлов (пластичность, проводимость, работа при высоких температурах) с лучшими качествами керамики (твердость, прочность, износостойкость).

Аналогию ММК можно найти в строительстве: железобетон. Сам по себе бетон (цемент) хорошо работает на сжатие, но хрупок на изгиб. Стальная арматура, наоборот, отлично работает на растяжение. Объединяя их, мы получаем железобетон – композит, который прочен и универсален. В ММК металл выступает в роли «цемента», а керамические волокна или частицы – в роли «арматуры».

Цель данного доклада – систематизировать информацию о металломатричных композитах, рассмотрев их структурные компоненты, основные методы производства, ключевые преимущества и недостатки, а также наиболее значимые области практического применения.

1. Структура и Компоненты ММК

Металломатричный композит состоит из двух основных фаз: матрицы и армирующего компонента (усилителя).

1.1. Металлическая Матрица

Матрица – это основной, связующий компонент, который «обволакивает» армирующие элементы. Она придает материалу форму, обеспечивает его пластичность, вязкость разрушения и передает нагрузку на более прочный усилитель.

Наиболее распространенные матричные металлы:

Алюминий (Al) и его сплавы: Самый популярный выбор. Причины: низкая плотность (легкость), относительная дешевизна, хорошая коррозионная стойкость и простота в обработке (по сравнению с другими).

Магний (Mg) и его сплавы: Обладают еще меньшей плотностью, чем алюминий, что делает их идеальными для аэрокосмических применений, где каждый грамм на счету.

Титан (Ti) и его сплавы: Используются для высокотемпературных ММК. Титан сохраняет прочность при температурах, при которых алюминий и магний уже плавятся.

Медь (Cu): Применяется в тех случаях, когда требуется высокая электро- и теплопроводность (например, в электронике).

1.2. Армирующие Компоненты (Усилители)

Усилитель – это дискретный компонент, вводимый в матрицу для кардинального улучшения ее свойств: прочности, жесткости, износостойкости и снижения коэффициента теплового расширения. Почти всегда в качестве усилителя выступает тугоплавкая и сверхтвердая керамика.

Основные типы усилителей:

Карбид кремния (SiC). Один из самых твердых и износостойких материалов. Широко используется для повышения жесткости и износостойкости алюминиевых матриц.

Оксид алюминия (Al_2O_3). Химически очень стабилен и дешев.

Углеродные волокна (C). Обладают высочайшим модулем упругости (жесткостью) и очень низкой плотностью. Используются для создания самых легких и жестких ММК.

Волокна Бора (B). Чрезвычайно прочные и жесткие, но очень дорогие.

В настоящее время существует несколько методов изготовления наноматериалов путем получения порошков с их последующей консолидацией в объемное изделие. Геометрические размеры таких изделий пока малы, существуют проблемы устранения пористости, наличия примесей, практического применения технологий и т. д. При изготовлении наноматериалов используют традиционные методы физики, химии, биологии и др. наук.

Рассмотрим порошковые технологии. В современном машиностроении широко используются готовые изделия, полученные из мелкодисперсных порошков методом спекания (порошковая металлургия). По такой технологии

изготавливают режущие пластины, сверла, метчики и другой режущий инструмент, а также функциональные изделия машин, например, шатуны двигателей внутреннего сгорания. Методами порошковой металлургии изготавливают и сортовые стали и сплавы, из которых путем механической обработки изготавливают готовые изделия. Такие технологии позволяют получить равномерную мелкозернистую структуру материала, что значительно повышает физико-механические и эксплуатационные свойства изделия. Под порошком при этом понимают совокупность находящихся в соприкосновении твердых частиц небольших размеров – от нескольких нанометров до тысячи микрометров.

При изготовлении наноматериалов используют ультрадисперсные порошки с размерами частиц не более 100 нм, которые подвергаются спеканию, горячему или холодному прессованию и др. с целью получить объемной изделие. При этом количество пор должно быть сокращено до минимума и сохранена наноструктура исходного порошка.

Методы получения порошков, которые можно разделить на химические и физические?

Разделение методов на химические и физические носит условный характер. Химические методы более универсальны и позволяют достигать большей производительности.

При использовании физических методов легче осуществляется управление размерами, составом и формой частиц. Большинство методов были разработаны и благополучно использовались задолго до увлечения нанотехнологиями.

Следующим является конденсационный метод. Метод основан на испарении и конденсации атомов, которые осаждаются на холодную поверхность вращающегося цилиндра с образованием нанокристаллических частиц. Различают гомогенное и гетерогенное зарождение зародышей (кластеров). Процесс происходит в среде разряженного инертного газа, обычно гелия.

Широкую известность и популярность приобрел метод получения объемных наноматериалов, предложенный Глейтером и др. Конденсат с поверхности цилиндра снимается специальным скребком и попадает в коллектор. Затем инертный газ откачивают и при давлении порядка 1 ГПа осуществляют предварительное, а затем при давлении до 10 ГПа – окончательное прессование порошка. В результате получают заготовки в виде дисков диаметром 5–15 мм и толщиной 0,2–3,0 мм с плотностью до 70–90 % теоретической плотности соответствующего материала.

Для нанометаллов можно достичь 90–95 % теоретической плотности, для нанокерамики – до 85 %, при этом размеры наночастиц могут достигать от единиц до десятков нанометров.

При получении нанокристаллических оксидов и нитридов используют кислородно- или азотсодержащую атмосферу. Изоляция процесса от влияния окружающей среды позволяет получать достаточно чистые наноматериалы.

Плотность наноматериалов может быть увеличена за счет повышения температуры прессования, но в этом случае может начаться рекристаллизация и размер частиц будет расти до десятков микрометров. Плотность также зависит от давления и времени прессования. Наиболее перспективно при этом динамическое прессование, которое осуществляется при высокочастотных колебаниях пуансона.

Изменяя пересыщение системы (увеличивая или снижая давление пара, например, варьируя температуру процесса), можно добиваться нужного размера частиц получаемых порошков. Наночастицы могут быть изготовлены и путем кристаллизации из эмульсий. Недостатком такого метода является образование крупных агрегатов. Во избежание агломерирования осаждение проводят в гетерогенных средах, используя стабилизацию поверхностно-активными веществами полимерного типа, с помощью которых удастся, например, получать частицы ZrO_2 размером менее 10 нм.

В установке происходит разложение термически малопрочных металлоорганических соединений типа тетраизопропилтитана или тетра-третбутилциркония. Обогреваемый трубчатый реактор выполняет роль испарителя, в который подается газовая смесь исходного вещества и нейтрального газа, в котором происходит гетерогенное образование наночастиц. Эта смесь из испарителя попадает в рабочую камеру и конденсируется на вращающемся охлаждаемом цилиндре, откуда счищается скребком в специальный коллектор.

Конденсационные методы позволяют получать ультрадисперсные порошки с размером частиц до нескольких нанометров, но производительность при этом очень низкая. Методы позволяют на поверхность порошка наносить тонкие полимерные пленки, предотвращающие агломерацию и коррозионное воздействие.

Рассмотрим метод высокоэнергетического измельчения, механохимический синтез. Измельчение является технологией типа «сверху вниз», и осуществляется в мельницах, дезинтеграторах, атриторах и других диспергирующих установках за счет разрушения крупных частиц на более мелкие. Механический размол является наиболее производительным способом получения порошков, в том числе и на наноуровне в больших количествах. Этому методу могут быть подвергнуты металлы и сплавы, композиты, керамика и другие материалы. Для размола применяют планетарные, шаровые, ротационные и вибрационные мельницы, которые позволяют получать порошки со средним размером частиц от 5 до 200 нм.

Для повышения производительности процесса измельчения в ряде случаев его осуществляют в условиях низких температур. Соотношение массы шаров и измельчаемой смеси обычно поддерживают в интервале от 5:1 до 40:1.

Явления агрегации частиц при измельчении и химические реакции часто осложняют диспергирование и делают его неоднозначным для прогнозирования.

Такие установки имеют определенный предел размельчения, что не позволяет получать очень тонкие порошки, поскольку наступает своеобразное равновесие между процессом разрушения частиц и их агломерацией. Даже при измельчении хрупких материалов трудно получить размер частиц ниже примерно 100 нм; частицы состоят из кристаллитов размером не менее 10–20 нм. Кроме того, в процессе измельчения всегда происходит загрязнение продукта материалом шаров и футеровки, а также кислородом. Мельницы из-за наличия подвижных частей быстро изнашиваются и выходят из строя.

Для получения нанопорошков наиболее перспективными являются способы, основанные на истирании частиц между собой. Такие установки не имеют подвижных частей, а, следовательно, и изнашиваемых элементов конструкции. Установка представляет собой камеру с хордально расположенными соплами для подачи энергоносителя, в качестве которого используется сжатый воздух под давлением 4–5 кг/см². Вихревой вращающийся поток энергоносителя создает внутри камеры локальные зоны акустических полей и осевую зону пониженного давления, в которую из питателя подается исходный порошок. Готовый продукт движется по спиральным траекториям на периферию в приемники. Для создания акустических полей (ударных волн) используется генератор Гартмана – газоструйный излучатель звуковых и ультразвуковых волн. Генератор позволяет создавать акустические мощности в несколько десятков Ватт с частотами от 5 кГц до 120 кГц. Если использовать в качестве энергоносителя водород, то можно получить частоты до 500 кГц.

В результате механического истирания и механического сплавления может быть достигнута в твердом состоянии полная растворимость таких элементов, которые в обычных условиях несовместимы.

При получении наноматериалов такие установки могут быть использованы для механохимического синтеза, когда высокоэнергетическое диспергирование сочетается с образованием сплавов и соединений в результате химических реакций, которые протекают за счет взаимодействия исходных порошков, или в результате насыщения из газовой фазы. Возможны и различные смешанные варианты. Соединения и сплавы при механохимическом синтезе образуются в результате интенсивной генерации новых поверхностей и глубокого диффузионного перемешивания, а также и с разупорядочением кристаллической структуры реагентов. В результате может иметь место самопроизвольное развитие процессов.

Высокоэнергетическое измельчение и механохимический синтез имеют достаточно высокую производительность, но чистота получаемых ультрадисперсных порошков не всегда бывает высокой и минимальный размер частиц (кристаллитов) также ограничен.

Синтез в низкотемпературной плазме (плазмохимический синтез) производят при температурах до 6000–8000 К, что обеспечивает высокий уровень пересыщения, а также большие скорости реакций. Используются при этом дуговые плазмотроны и высоко- и сверхвысокочастотные (СВЧ) генераторы плазмы. Дуговые аппараты обладают высокой производительностью и сравнительно недороги, но СВЧ-установки обеспечивают получение более тонких и более чистых порошков. В качестве исходных материалов для плазмохимического синтеза используют хлориды металлов, металлические порошки, кремний – и металлоорганические соединения.

В случае обычного прессования трение порошков о стенки пресс-формы весьма существенно и переход к ультрадисперсным порошкам оказывает значительное влияние на уплотнение. Даже при значительных расхождениях в физико-механических свойствах порошков пластичного никеля и хрупкого нитрида кремния в ультрадисперсном состоянии они прессуются практически одинаково.

Одним из способов устранения остаточной пористости при прессовании является термическая обработка – спекание. Однако для наноматериалов при обычных режимах спекания не сохраняется исходная наноструктура. Являясь диффузионно-контролируемыми, процессы роста зерен (рекристаллизация) и уплотнения при спекании (усадка) идут параллельно, накладываясь друг на друга.

Для сдерживания роста зерен используются высокоэнергетические методы консолидации, при высоких статических и динамических давлениях и умеренных температурах.

Свойства наноматериалов позволяют использовать их в широких областях:

1. Создание новых высокопрочных композиционных материалов на основе нанотрубок, физико-механические характеристики которых будут в десятки раз превышать аналогичные характеристики высокопрочных сталей при меньшей плотности.
2. Высокопрочные покрытия для пар трения, режущего инструмента, превышающие по твердости алмаз.
3. Смазывающе-охлаждающие технологические среды и присадки для пар трения, значительно повышающие эксплуатационные характеристики изделий.

4. Аккумуляторы и батареи нового поколения, обладающие большой емкостью при малых габаритах.

5. Нанодатчики для измерения физических величин со сверхвысокой чувствительностью.

6. Элементы электронных схем для приборов нового поколения.

7. Контрастирующие вещества для магнитно-резонансной томографии и других видов диагностики в биологии и медицине.

8. Создание защитных покрытий поверхностей, невидимых для радаров и других средств обнаружения.

9. Контейнеры для транспортировки лекарств и диагностических датчиков в медицине.

10. Создание сверхпрочных волокон, нитей, канатов, стержней для запуска и удержания на геостационарной орбите спутников и космических станций.

11. Матрицы и дисплеи сверхвысокой четкости и яркости и чувствительности.

Аддитивные технологии: от прототипа к готовому изделию – обзор и ключевые темы

В современном мире послойное производство открывает принципиально новые возможности в прототипировании, серийном производстве и индивидуализации продуктов. Эта технология позволяет создавать сложнейшие конструкции с высокой точностью и минимальными отходами, трансформируя традиционный подход к производству.

История и основы аддитивных технологий

Истоки 3D-печати восходят к 1980-м годам, когда впервые появились методы FDM, SLA и SLS. Эти технологии заложили основу послойного формирования уникальных деталей, способных обладать характеристиками, недостижимыми при традиционных методах. За прошедшие десятилетия аддитивное производство значительно эволюционировало, охватив множество отраслей и породив новые направления индустрии.

Принцип работы: вычитающий vs послойный методы

Вычитающие технологии, такие как фрезеровка, предполагают удаление избыточного материала из заготовки, что ограничивает сложность создаваемых форм и ведет к значительным отходам. В противоположность им, аддитивные технологии строят изделие путем послойного нанесения материала, что позволяет создавать сложнейшие геометрии с высокой точностью и минимальными потерями. Такой подход обеспечивает гибкость дизайна и сокращает время производства.

Сравнительная характеристика основных технологий 3D-печати

Различия между технологиями FDM, SLA и SLS можно описать через показатели точности, скорости и стоимости. FDM является наиболее

доступным и быстрым вариантом, идеально подходит для создания прототипов. SLA обеспечивает высокую детализацию и качество поверхности, что востребовано для сложных изделий. SLS отличается прочностью и функциональностью, что делает его оптимальным для промышленного производства. Эти особенности предопределяют выбор технологии в зависимости от конкретных требований проекта.

Материалы для аддитивного производства: выбор и применение

Современные аддитивные технологии поддерживают широкий спектр материалов – от термопластиков и смол до металлических порошков. Каждый материал обладает уникальными свойствами, подходящими для определённых задач: пластики – обеспечивают легкость и гибкость, металлы – прочность и жаростойкость. Выбор материала определяет функциональность конечного изделия, его долговечность и область применения, что делает критически важным понимание характеристик каждого из них.

Преимущества аддитивного производства

Статистика подтверждает, что использование аддитивных технологий снижает время выхода продукции на рынок, снижая при этом количество отходов. Этот метод облегчает инновации благодаря возможности быстро протестировать и адаптировать конструкции. Анализ свидетельствует о значительном повышении эффективности производства, опирающемся на гибкость процессов и экономию ресурсов. Так, аддитивное производство становится ключевым инструментом конкурентоспособности в современных индустриях.

Применение аддитивных технологий в авиации и автомобилестроении

В авиационной отрасли 3D-печать позволяет изготавливать детали с оптимальной массой и прочностью, что существенно снижает потребление топлива. Автомобилестроение использует эти технологии для быстрой разработки прототипов и серийных компонентов, улучшая эргономику и функциональность. Благодаря возможности создавать сложные конструкции без значительных затрат аддитивное производство становится незаменимым в разработке инновационных транспортных средств.

Медицина и стоматология: индивидуальный подход через 3D-печать

Аддитивные технологии в медицине позволяют создавать индивидуальные импланты, протезы и ортодонтические устройства, идеально соответствующие анатомии пациента. 3D-печать способствует быстрому изготовлению сложных форм и сокращает время подготовки изделий. Это открывает новые горизонты для персонализированной медицины, значительно повышая качество лечения и комфорт пациентов.

Вызовы и перспективы развития аддитивных технологий

Сегодня аддитивное производство сталкивается с рядом ограничений: относительно невысокой скоростью печати, высокими затратами при массовом

производстве, необходимостью дополнительной постобработки и лимитами по размерам изделий. Однако перспективы отрасли обещают значительный прогресс – биопечать органов, строительство объектов с помощью 3D-методов, развитие гибридных технологий и появление инновационных материалов расширяют границы возможного, прокладывая путь к новой эре промышленности.

Аддитивные технологии: новый этап промышленного производства

Сегодня внедрение 3D-печати в серийное производство открывает широкие возможности для инноваций, адаптации продуктов и устойчивого развития промышленных процессов. Эта технология меняет подход к производству, создавая условия для более эффективного использования ресурсов и максимальной индивидуализации продуктов в самых разных областях.

Двумерные материалы: революция в толщину один атом

Сегодня мы поговорим об одном из самых ярких и перспективных направлений в материаловедении и нанотехнологиях – о двумерных материалах. Это не просто очень тонкие плёнки – это принципиально новый класс веществ, толщина которых составляет всего один или два атомных слоя. Представьте: материал, который в сотни тысяч раз тоньше человеческого волоса, но при этом обладает уникальными, а зачастую и рекордными свойствами. Такие материалы открывают путь к созданию устройств, которые ещё недавно казались фантастикой: гибкой и прозрачной электроники, сверхбыстрых процессоров, высокоэффективных систем хранения энергии и даже компонентов для квантовых компьютеров. Именно поэтому их изучение и применение можно без преувеличения назвать революцией в толщину один атом.

Фундаментальные понятия двумерных материалов

Что же делает эти материалы особенными? Ключевое отличие – в размерности. В трёхмерном мире электроны могут двигаться свободно во всех направлениях. Когда мы уменьшаем толщину материала до атомарного предела, электроны оказываются «зажаты» в плоскости. Это явление называется квантовым ограничением, и оно кардинально меняет электронную структуру материала. Исчезают целые степени свободы, что приводит к проявлению неожиданных свойств: сверхвысокой подвижности носителей заряда, нелинейных оптических эффектов, исключительной механической прочности. Таким образом, двумерные материалы – это не просто «тонкие версии» обычных веществ. Это новые состояния материи со своими законами, что открывает безграничные возможности как для фундаментальной науки, так и для прикладных инженерных решений.

Графен: открытие, изменившее наноматериалы.

История современного интереса к двумерным материалам началась с одного вещества – графена. В 2004 году Андрей Гейм и Константин Новосёлов, используя метод, гениальный в своей простоте – механическое отслаивание скотчем, — впервые получили стабильный одноатомный слой углерода. За это открытие они всего через 6 лет получили Нобелевскую премию – беспрецедентно быстро для физики. Почему же графен произвёл такой фурор?

– Физические свойства: Это один из самых прочных материалов из известных (прочнее стали), при этом невероятно лёгкий и гибкий. Он обладает рекордной теплопроводностью и является отличным проводником электричества, причём электроны в нём ведут себя как релятивистские частицы без массы.

– Визуальные особенности: Под микроскопом графен выглядит как идеально гладкая, но часто слегка «сморщенная» плёнка. Он прозрачен (поглощает лишь ~2.3 % света), что сразу навело на мысли о применении в прозрачной электронике и сенсорных экранах.

Открытие графена стало отправной точкой, доказавшей, что двумерные материалы могут быть стабильны и обладать необычными свойствами. Это дало толчок к поиску и изучению целого «зоопарка» других 2D-структур.

Основные типы двумерных материалов и свойства

Графен – лишь первый и самый известный представитель целого семейства. Сегодня мы знаем десятки двумерных материалов, каждый со своим «характером». Их можно разделить на несколько крупных классов:

1. Графен: проводник. Идеален для электродов, прозрачных проводящих покрытий, композитов для усиления прочности.

2. Нитрид бора («белый графен»): изолятор. Обладает высокой химической и термической стабильностью. Используется как идеальный тонкий диэлектрик в транзисторах или защитное покрытие.

3. Дихалькогениды переходных металлов (MoS_2 , WS_2): полупроводники. Их ключевая особенность – наличие запрещённой зоны, отсутствующей у графена. Это делает их пригодными для создания транзисторов, фотодетекторов и светодиодов. Толщина материала напрямую влияет на ширину запрещённой зоны, что даёт инженерам уникальный инструмент для дизайна свойств.

4. MXены: новый класс материалов на основе карбидов или нитридов переходных металлов. Отличаются высокой электропроводностью, гидрофильностью (смачиваемостью водой) и хорошей механической прочностью. Чрезвычайно перспективны для гибкой электроники, электрокатализа и, особенно, для суперконденсаторов и аккумуляторов.

Таким образом, подобрав нужный 2D-материал, мы можем получить требуемые свойства: от сверхпроводимости до полупроводимости и изоляции, – и интегрировать их в единую наногетероструктуру.

Методы получения двумерных материалов

Как же получают эти невероятно тонкие материалы? Существует три основных подхода, каждый со своей нишей:

1. Механическое отслаивание («скотч-метод»): просто, дёшево, гениально. Позволяет получить чешуйки самого высокого качества с минимальными дефектами. Почему он до сих пор актуален? Для фундаментальных исследований. Учёным часто нужен небольшой образец с идеальной структурой, чтобы изучить истинные, неискажённые свойства материала. Для массового производства метод, конечно, непригоден.

2. Химическое осаждение из паровой фазы (CVD): это основной промышленный метод. Газы-прекурсоры вступают в реакцию на нагретой подложке (например, медной фольге), формируя непрерывную однородную плёнку. Метод CVD позволяет контролировать толщину, качество и выращивать материалы на больших площадях, что критически важно для микроэлектроники.

3. Жидкостное отслаивание: объёмный кристалл «взбивают» в специальном растворителе с помощью ультразвука, получая суспензию из многослойных и однослойных хлопьев. Метод хорош для массового производства нанопорошков 2D-материалов, например, для добавок в композиты, краски или чернила для печатной электроники.

Выбор метода всегда является компромиссом между качеством, площадью, стоимостью и областью применения.

Уникальные свойства и квантовые эффекты в 2D материалах

Давайте глубже посмотрим, какие уникальные явления возникают в двумерном мире.

– Квантовое ограничение и высокая подвижность: электроны, «запертые» в плоскости, начинают вести себя особым образом. Это приводит к аномально высокой подвижности (особенно в графене), что напрямую сулит создание транзисторов с беспрецедентной скоростью переключения.

– Анизотропия свойств: свойства в плоскости слоя и перпендикулярно ей могут различаться на порядки. Например, теплопроводность в плоскости графена огромна, а между слоями – мала. Это позволяет проектировать материалы с направленным переносом тепла или заряда.

– Прямая запрещённая зона (у монослоя MoS_2): в отличие от не прямой зоны в объёмном кристалле, монослой MoS_2 имеет прямую запрещённую зону. Это резко повышает эффективность его взаимодействия со светом, что незаменимо для создания миниатюрных лазеров, светодиодов и высокочувствительных фотодетекторов.

Эти эффекты – не просто курьёзы квантовой физики, а основа для конкретных инженерных преимуществ будущих устройств.

Применение 2D материалов в электронике и нанофотонике

Где же эти уникальные свойства находят применение? Одна из самых горячих точек – электроника и фотоника.

– Гибкая и прозрачная электроника: Представьте смартфон, который можно свернуть в трубочку, или «умное» окно, являющееся одновременно дисплеем и солнечной батареей. Графен и некоторые дихалькогениды прозрачны, гибки и проводят ток – идеальная комбинация для таких устройств.

– Сверхбыстрые транзисторы: толщина канала в транзисторе из 2D-материала – буквально один атом. Это позволяет создавать устройства субнанометровых размеров, обходя фундаментальные ограничения кремния. Кроме того, высокая подвижность электронов сулит меньшее тепловыделение и более высокие тактовые частоты.

– Нанофотоника: управление светом на наноуровне. Двумерные материалы могут эффективно поглощать и излучать свет на ультрамалой толщине. На их основе создаются миниатюрные оптические модуляторы, фотодетекторы и элементы для плазмоники, которые могут стать основой для оптических чипов и систем сверхбыстрой передачи данных.

Воздействие 2D материалов на эффективность энергетических устройств

Не менее важна роль 2D-материалов в энергетике. Ключевая проблема современности – эффективное хранение энергии.

– Графен в аккумуляторах и суперконденсаторах: добавление графена в аноды литий-ионных аккумуляторов резко увеличивает их ёмкость и скорость зарядки. Почему? Графен обладает огромной удельной поверхностью и высокой электропроводностью. Это облегчает перенос ионов лития и электронов, уменьшая внутреннее сопротивление устройства.

– МХены: благодаря своей гидрофильности и открытой структуре, они являются идеальными материалами для суперконденсаторов, которые могут заряжаться за секунды и выдерживать сотни тысяч циклов. Они работают за счёт быстрой адсорбции ионов на своей поверхности.

– Перспективы: интеграция 2D-материалов – это путь к созданию аккумуляторов для электромобилей с запасом хода в 1000 км и 5-минутной зарядкой, а также к надёжным накопителям для солнечных и ветряных электростанций.

Основные вызовы и ограничения применения 2D материалов

Несмотря на огромный потенциал, путь к массовому рынку тернист. Мы сталкиваемся с тремя основными вызовами:

1. Проблемы масштабирования и высокая стоимость: CVD-метод дорог, требует сложного оборудования и чистых помещений. Получение дефектных однородных плёнок на пластинах диаметром 30 см и более – сложная технологическая задача.

2. Нестабильность (деградация): Многие 2D-материалы, особенно чёрный фосфор и некоторые дихалькогениды, окисляются и разрушаются на воздухе. Необходимы эффективные методы инкапсуляции и защиты.

3. Сложности интеграции с кремнием: Существующая микроэлектронная индустрия построена на кремнии. «Вживление» новых материалов в стандартные технологические цепочки – огромная инженерная и логистическая проблема. Нужны новые методы создания контактов, диэлектриков и архитектуры устройств.

Преодоление этих барьеров требует междисциплинарных усилий: химики и материаловеды должны создавать более стабильные материалы, инженеры-технологи – разрабатывать рентабельные методы производства, а экономисты – просчитывать пути коммерциализации.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие материалы относят к наноструктурным?
2. Каковы методы получения наноструктурных материалов?
3. Как осуществляется шаровой размол материала?
4. Какие виды мельниц применяют для размола материалов?
5. Как осуществляется механосинтез?

Тема 4. Полимерные материалы и функциональные порошковые материалы

Ключевые вопросы темы

1. Пластические массы.
2. Резины и клеящие материалы.
3. Конструкционные порошковые материалы.
4. Фрикционные порошковые материалы.

Ключевые понятия: пластмасс, резина, клеящие материалы, конструкционные порошковые материалы, фрикционные порошковые материалы.

Литература: [4, с. 191–234].

Методические рекомендации

Полимерами называются высокомолекулярные химические соединения, состоящие из многочисленных маломолекулярных звеньев (мономеров) одинакового строения. Макромолекулы представляют собой длинные цепи из мономеров, что определяет их большую гибкость. Отдельные атомы в мономерах соединены между собой довольно прочными ковалентными

химическими связями. Между макромолекулами полимеров действуют значительно более слабые физические связи.

Различают природные и искусственные (или 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.

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 теплоемкости, 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.

Классификация полимеров по происхождению

Классифицируются полимеры по различным признакам: составу, форме макромолекул, фазовому состоянию, полярности, отношению к нагреву и т. д.

По природе все полимеры можно разделить на две группы – природные и синтетические. Полимеры, встречающиеся в природе – органические вещества растительного (хлопок, шелк, натуральный каучук и др.) и животного (кожа, шерсть и др.) происхождения, а также минеральными веществами (слюда, асбест, естественный графит, природный алмаз и др.).

Синтетические полимеры получают из простых веществ путем химического синтеза. Основным преимуществом синтетических полимеров перед природными являются неограниченные запасы исходного сырья и широкие возможности синтеза полимеров с заранее заданными свойствами. Исходным сырьем для получения синтетических полимеров являются продукты химической переработки нефти, природного газа и каменного угля. Получаемые при этом низкомолекулярные вещества называют мономерами. Их перерабатывают в полимеры в процессе дальнейшей химической обработки.

По способу получения полимеры делят на полимеризационные и поликонденсационные.

Полимеризация – процесс химического соединения большого числа молекул мономера в одну большую молекулу полимера без изменения

элементарного состава мономера. В процессе полимеризации не происходит выделения побочных продуктов реакции. По элементному составу полимер и мономер идентичны.

Поликонденсация – процесс образования полимера из молекул разных мономеров в результате химических реакций с выделением побочных продуктов реакции. Элементный состав полимера отличается от состава участвовавших в реакции поликонденсации мономеров.

По составу все полимеры подразделяют на органические, элементоорганические, неорганические.

Органические полимеры составляют наиболее обширную группу соединений. Если основная молекулярная цепь таких соединений образована только углеродными атомами, то они называются карбоцепными полимерами. В гетероцепных полимерах атомы других элементов, присутствующие в основной цепи, кроме углерода, существенно изменяют свойства полимера. Так, в макромолекулах атомы кислорода способствуют повышению гибкости цепи, атомы фосфора и хлора повышают огнестойкость, атомы серы придают газонепроницаемость, атомы фтора, сообщают полимеру высокую химическую стойкость и т. д. Органическими полимерами являются смолы и каучуки.

К неорганическим полимерам относятся силикатные стекла, керамика, слюда, асбест. В составе этих соединений углеродного скелета нет. Основу неорганических материалов составляют оксиды кремния, алюминия, магния, бора, фосфора, кальция и др. Органические радикалы в составе неорганических полимеров отсутствуют. К неорганическим относятся и полимеры, основное молекулярное звено которых, как и в случае органических полимеров, состоит из атомов углерода, как, например, графит и алмаз, причем графит содержит и незначительное количество атомов водорода. Однако в отличие от органических полимеров, образующих основное молекулярное звено преимущественно в виде линейных цепей, графит и алмаз образуют пространственные структуры. Это придает им свойства, резко отличающиеся от свойств органических полимеров. Графит является единственным веществом, остающимся в твердом состоянии при температуре свыше 4000 °С, а алмаз является самым твердым веществом.

Пластические массы (далее – пластмассы) – это синтетические материалы, получаемые на основе органических и элементоорганических полимеров.

Свойства пластмасс определяются свойствами полимеров, составляющих их основу.

По составу пластмассы могут быть простыми (термопласты – химические полимеры линейной или разветвленной структуры) и сложными (которые помимо полимеров, содержат различные добавки: наполнители, красители, пластификаторы, отвердители и т. д.).

Связующее вещество является обязательным компонентом. Такие простые пластмассы, как полиэтилен, вообще состоят из одного связующего вещества.

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

В зависимости от наполнителя различают пресс-порошковые, волокнистые и слоистые пластмассы, а также пенопласты, когда наполнитель применяется в виде газа (воздух или нейтральный газ).

Классификация пластмасс

Пластификаторы представляют собой нелетучие жидкости с низкой температурой замерзания. Растворяясь в полимере, пластификаторы повышают его способность к пластической деформации. Пластификаторы 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.

Классификация полимеров по происхождению

Красители и пигменты придают пластмассам желаемую окраску.

Для пластмасс характерны следующие свойства:

- низкая плотность (обычно 1–1,8 г/см³, в некоторых случаях 0,02–0,04 г/см³);
- высокая коррозионная стойкость. Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии, на них не действуют слабые кислоты и щелочи.

Существуют пластмассы, стойкие к воздействию 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 (оловянных бронз, баббитов и др.). Например, полиамидные подшипники скольжения длительное время могут работать без добавления смазочного материала;

- 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;

- хорошие технологические свойства.

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 элементов вулканизации (сера, оксид цинка).

Основные типы резин и характеристики каучуков

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, бутадиен-стирольные и др.) получают методами полимеризации.

Впервые синтез бутадиенового каучука из этилового спирта осуществлен в 1921 г. русским ученым С. В. Лебедевым. Разработаны методы получения синтетических каучуков из более дешевого сырья, например, из нефти и ацетилен.

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 бензомаслостойкие, морозостойкие, теплостойкие, стойкие к действию агрессивных сред. Нижней границей рабочих температур резин специального назначения является температура до – 80 °С, резин общего назначения – до –35 ... –50 °С.

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.

Клеями называют сложные вещества на основе полимеров, способные при затвердевании образовывать прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам. По сравнению с другими видами соединений (клепкой, сваркой, механическим креплением) клеевые соединения имеют ряд преимуществ. Клеи позволяют соединять разнородные материалы (металл,

керамику, пластмассу, дерево) в различных сочетаниях. Клеевые швы атмосферостойки, не подвержены коррозии, позволяют обеспечивать герметичность соединений. Масса конструкции при клеевой сборке почти не увеличивается, отсутствуют снижающие прочность и являющиеся концентраторами напряжений отверстия под болты, заклепки, гвозди. Во многих случаях клеевое соединение металлических и неметаллических материалов является единственно возможным решением, обеспечивающим высокую прочность конструкции. Клеи могут выдерживать высокие и низкие температуры, сохраняя достаточную прочность соединения.

Недостатки клеевых соединений – сравнительно невысокая теплостойкость при длительной эксплуатации и низкая прочность при несимметричном нагружении и неравномерном отрыве.

Клеи выпускаются в виде пленок, паст и жидкостей.

По назначению клеи можно разделить на группы:

Высокопрочные пленочные клеи конструкционного назначения для склеивания силовых сотовых и слоистых конструкций из металлов и полимерных композиционных материалов (ПКМ). Такие клеи позволяют создавать высокопрочные соединения с эластичным клеевым швом, обладающим стойкостью к распространению усталостной трещины, к воздействию агрессивных сред. Используются в авиации, космонавтике и других отраслях машиностроения.

Высокая прочность таких клеев позволяет использовать их в качестве полимерной матрицы при создании препрегов на основе стекло-, угле- и органонаполнителей. В результате за одну технологическую операцию можно изготавливать готовые сотовые изделия из ПКМ, что сокращает время их производства в два-три раза по сравнению с обычной технологией.

Высокопрочные пастообразные клеи холодного отверждения с регулируемым уровнем прочности и эластичности для склеивания металлов и различных неметаллических материалов в клеевых и комбинированных (клееклепанных, клеерезбовых и др.) соединениях, работающих в интервале температур от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$.

Прочность таких клеевых соединений на сдвиг составляет 25–35 МПа, относительное удлинение при сдвиге – от 50 до 125 %. Клеевые соединения обладают эластичностью, высокой механической прочностью, водостойкостью.

Жидкие клеи горячего отверждения применяют для склеивания и выполнения клеесварных соединений металлов методом контактной точечной сварки по слою неотвержденного клея или последующей заливкой в межшовное пространство в изделиях, длительно работающих при температурах от -60 до $+150^{\circ}\text{C}$. После воздействия на клеевые соединения условий тропического климата, в течение 10 лет их физико-механические свойства не изменяются.

При использовании этих клеев статическая прочность клееварных соединений равна 1000–1500 кг.

Методы порошковой металлургии позволяют создавать принципиально новые материалы, которые сложно или даже невозможно получить другими способами. С помощью этих методов можно получить многослойные композиции, различные комбинации металлических и неметаллических компонентов, пористые материалы с широким диапазоном контролируемой пористости, изделия из тугоплавких металлов и т. д. 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.

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 °С. Температура спекания изделий антифрикционного назначения на основе железа составляет 1000–1050 °С, на основе бронзы – 850–950 °С. 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.

Термической обработке порошковых деталей присущи некоторые специфические особенности. Пористость повышает окисляемость порошковых материалов, вследствие чего их нагрев целесообразно проводить в защитной атмосфере. Поры, заполненные газом, снижают теплопроводность, что ухудшает прокаливаемость пористых материалов по сравнению с компактными. Для пористых деталей целесообразно применение закалки с резким охлаждением в струе воды или с энергичным перемешиванием для ускорения срыва паровой рубашки, затрудняющей охлаждение. После закалки детали должны обязательно просушиваться до полного удаления влаги из пор.

В ряде случаев дополнительно проводят химико-термическую обработку деталей из порошковых материалов. Цементацию и нитроцементацию применяют для повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя. Азотирование позволяет получать высокую твердость, усталостную прочность и коррозионную стойкость деталей.

Сульфидирование применяется с целью уменьшения коэффициента трения для повышения износостойкости и твердости железных и железнографитовых изделий. Наиболее простой способ сульфидирования – пропитка серой путем погружения пористых изделий в расплавленную серу при 140–160 °С (выдержка 10–15 мин) с последующим нагревом до 400–500 °С в герметизированной печи с азотводородной атмосферой.

Оксидирование обработкой паром применяется для повышения износостойкости и коррозионной стойкости порошковых деталей на железной основе. Обычно используется обработка паром при 550 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением в масле. При взаимодействии паров воды с железом на поверхности деталей и на поверхности открытых пор образуется прочная коррозионная пленка.

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.

Все фрикционные материалы в зависимости от условий работы делятся на две группы:

1. Материалы, работающие в условиях сухого трения.
2. Материалы, работающие в масле.

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 HRC 40–45 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 сухого 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.

Фрикционные порошковые материалы (ГОСТ 17359-82) при степени пористости 10–13 % имеют высокие показатели коэффициента трения, износо/тепло/коррозионной стойкости, прочности, прирабатываемости. Поэтому их используют в составе технических устройств, предназначенных для передачи или рассеивания кинетической энергии (тормозов, фрикционных муфт, демпферов и др.). Результативность эксплуатации фрикционных материалов во многом зависит от показателей коэффициента трения и износоустойчивости. Широкие возможности ПМ позволяют получать современные фрикционные материалы с различными наборами заданных функциональных свойств.

Как и антифрикционные, фрикционные материалы также являются пористыми композитами, хотя в практическом отношении и выполняют прямо противоположную функцию.

Они состоят из металлических и неметаллических компонентов для деталей, работающих в масле (75 %) и при сухом трении, в виде, соответственно, металлической основы (стальной, чугунной, медно-никелевой и т. д.).

При этом металлокомпоненты позволяют добиться высоких значений теплопроводности и прирабатываемости, а безметаллические составляющие (SiO_2 , Al_2O_3 , графит и др.) способствуют увеличению силы трения и минимизируют возможность заедания вследствие схватывания.

К наиболее востребованным маркам антифрикционных материалов причисляют: ФМК-8; ФМК-11; МКВ-50А; СМК-80; МК-5; МК-263.

Первые 3 марки разработаны для сильнонагруженных тормозов, муфт сцепления летательных аппаратов и дорожной техники военного назначения.

Марка СМК-80 используется в составе тормозов и муфт сцепления большегрузной автотехники (например, карьерные самосвалы грузоподъемностью свыше 70 т.).

Самыми же распространенными являются марки МК-5 и МК-263 на латуне-бронзовой основе, предназначенные для эксплуатации в условиях тяжелых и средних нагрузок при температуре поверхности трения не выше 550–650 °С. Из материалов данных марок производят широчайший ассортимент дисков сцепления и тормозных колодок, которыми комплектуют автотракторную технику и спецтехнику строительного и дорожно-строительного назначения.

В последнее время для автомашин, тракторов, малой и средней грузоподъемности все чаще используются фрикционные материалы на полимерной основе.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы свойства и где используются высокопористые порошковые материалы?
2. Какова область использования фрикционных порошковых материалов?
3. Для изготовления каких деталей применяют антифрикционные порошковые материалы?
4. Какова технология получения изделий из порошковых материалов?
5. В чем преимущества методов порошковой металлургии?

Тема 5. Синтетические сверхтвёрдые материалы и покрытия

Ключевые вопросы темы

1. Синтетические сверхтвёрдые материалы.
2. Покрытия для инструментов из СТМ.
3. Металлические и композиционные покрытия.
4. Неметаллические покрытия.
5. Углеродно-волоконистые армированные термопласты.

Ключевые понятия: сверхтвёрдые материалы, металлизированные порошки, термопластичные композиты, углеродная нить, углеродное волокно.

Литература: [5, с. 235–243].

Методические рекомендации

Согласно классификации, всем сверхтвёрдым лезвийным материалам на основе плотных модификаций нитрида бора присвоено наименование – композиты. В зависимости от технологии получения, физико-механических свойств, условий применения они разбиты на определенные группы. Наиболее широко в отечественной металлообработке нашли применение композит 01 (эльбор-Р), композит 03 (исмит), композит 05, композит 09 (ПТНБ),

однослойный и двухслойный композит 10 (гексанит-Р). Аналогичные и подобные инструментальные материалы на основе модификации кубического нитрида бора (КНБ) созданы и находят применение во многих индустриально развитых странах, причем их применение неуклонно расширяется.

Перечисленные инструментальные материалы отличает высокая твердость, тепловая устойчивость и химическая инертность к черным металлам, т. е. все то, что делает эти прогрессивные инструментальные материалы весьма эффективными на операциях точения, растачивания и торцового фрезерования как гладких, так и прерывистых точных поверхностей деталей основного машиностроительного назначения.

Высокая эффективность применения инструментов, оснащенных поликристаллами композитов, обусловлена уникальным сочетанием их физико-химических характеристик: исключительно высокая твердость, высокая теплостойкость и теплопроводность, близкая к теплопроводности твердых сплавов, не снижающаяся при повышении температуры. Поликристаллический кубический нитрид бора имеет износостойкость в 50 раз выше, чем твердый сплав, и в 10–25 раз выше, чем оксидная или нитридная керамика. Композиты сохраняют свою прочность при высоких температурах, типичных для обработки закаленных черных металлов с относительно высокой интенсивностью съема материала. Эти инструментальные материалы вступают в химическую реакцию с черными металлами на воздухе и при высокой температуре, что обуславливает их определенные преимущества по сравнению с алмазами и другими традиционными инструментальными материалами.

Области применения различных марок композитов определяются размерами поликристаллов и их физико-механическими характеристиками. Несмотря на определенное разнообразие марок, композиты не только не создают между собой конкуренции, а наоборот, успешно дополняют друг друга. Имеются нормативные документы, каталоги, методические рекомендации и справочная литература, в которых достаточно полно и широко описаны основные свойства композитов.

Так, композиты 01 и 02 применяют для тонкого и чистового точения, преимущественно без удара, деталей из черных металлов любой твердости; композит 03 – для предварительного и окончательного точения чугунов любой твердости; композит 05 – для чистового и получистового точения без ударных нагрузок закаленных сталей и чугунов любой твердости, для торцового фрезерования чугунов; композит 10 – для предварительного и окончательного точения (растачивания) с ударом и без удара сталей и чугунов любой твердости, для торцового фрезерования закаленных сталей и чугунов.

В настоящее время за рубежом освоено промышленное производство нескольких марок композитов с различными свойствами, причем каждый тип

инструментального материала обладает преимуществами при определенных условиях обработки.

Существует четыре основные группы материалов, эффективно обрабатываемых модификациями кубического нитрида бора:

- отбеленный чугун; легированный никелем или хромом белый чугун (HRC 50-65);
- закаленные стали и детали с поверхностной закалкой (HRC 50–65);
- некоторые упрочняемые сплавы (HRC 38);
- некоторые марки серого чугуна (HB 200–220).

При обработке черных металлов твердостью свыше HRC 45 начинает широко применяться черновое и чистовое точение с помощью композитов взамен шлифования. Такие металлы, в виду недостаточно высокой стойкости традиционных инструментальных материалов, неэффективно обрабатывать, например, твердыми сплавами или режущей керамикой. Использование для этих целей шлифования кругами из электрокорунда представляет собой довольно длительный процесс, характеризующийся низкой интенсивностью съема металла и быстрым износом круга, что ограничивает производительность.

Развитие конструкции инструментов, оснащенных искусственными сверхтвердыми материалами, идет по двум основным направлениям – создание инструментов с механическим креплением цельных, многослойных круглых и многогранных режущих пластин, а также применение перетачиваемых режущих вставок, когда конструкция с механическим креплением пластин практически невозможна.

Твердость синтетического алмаза составляет приблизительно 90–100 ГПа. Он применяется для изготовления алмазных сверл, резцов, буровых колонок и инструментов для бурения наиболее твердых пород, а также для изготовления наконечников к приборам для измерения твердости и чистоты поверхности.

Наиболее благоприятными условиями для синтеза алмазов является давление 4–6 ГПа и температура 1125–1325 °С.

Получать крупные режущие пластины композитов технически достаточно сложно, так как это связано с очень высокой температурой и давлением, которые необходимы для синтеза этих материалов. Поэтому чаще используют более простые по технологии получения инструменты с напайными пластинами из КНБ, которые могут перетачиваться несколько раз.

Дальнейшее развитие конструкции режущих инструментов, оснащенных лезвийными сверхтвердыми материалами, идет по направлению расширения его возможностей и применения в условиях автоматизированного производства. Резцы из КНБ широко применяются для обработки деталей различной конфигурации на токарных, токарно-револьверных станках, станках

расточной группы, а также на многоцелевых станках. Эффективное использование инструментов достигается на жестких высокоточных станках повышенной мощности. Такое оборудование должно обладать достаточной жесткостью, поскольку при точении и растачивании инструментами из композитов наблюдается относительно большие силы резания. Вибрации оборудования не допускаются, так как это не только ухудшает шероховатость обрабатываемой поверхности, но и в ряде случаев является причиной выкрошивания режущих кромок. Высокая стойкость и относительно малый износ инструментов из композитов имеют важное значение при обработке на автоматизированных токарных станках, так как число замен инструментов заметно сокращается, а заданные размеры обрабатываемой детали выдерживаются без частого вмешательства оператора. Если загрузка и выгрузка деталей осуществляется роботом, то инструменты, оснащенные модификациями КНБ, вполне пригодны для обработки в условиях безлюдной технологии.

Покрyтия для инструментов из СТМ

Металлизированные порошки СТМ применяются при изготовлении инструмента всех видов и типоразмеров на металлических, металлокерамических и твердосплавных связках. Металлизации подвергаются блочные высокопрочные и термостойкие марки алмазов – АС15, АС20, АС32, АС40, АС65, АС80, АС50Т, АС65Т, АС82Т, АС105Т, АС132Т, а также КНБ марок КР, ЛКВ и КТ (кибор). С 1983 г. при изготовлении инструмента используется новый технологический процесс для нанесения металлических покрытий методом ионно-плазменного напыления. Адгезия полученных с использованием магнетронов покрытий к поверхности СТМ значительно выше, чем у покрытий, полученных термовакuumным методом. Кроме того, в ионных покрытиях возникают напряжения сжатия, а в покрытиях, полученных испарением, – напряжения растяжения. Сжатие может достигать 109 Н/м² для молибдена и вольфрама, что способствует лучшему удержанию зерен в инструменте, создает предпосылки для широкого использования данного метода нанесения покрытий на высокопрочные и термостойкие порошки алмазов и КНБ, предназначенных для изготовления инструмента, работающего в особо тяжелых условиях: при бурении и камнеобработке. В 1971 г. были созданы композиционные покрытия, включающие кроме металлической составляющей мелкозернистые порошки графита, гексагонального нитрида бора, дисульфида молибдена и некоторых карбидов тугоплавких металлов. Такие покрытия рекомендуются для сухого шлифования хрупких материалов. Введение антифрикционных добавок и твердых смазок способствует улучшению условий шлифования благодаря снижению тепловыделения в зоне обработки.

Металлические и композиционные покрытия

В композиционных покрытиях сочетаются свойства материалов покрытия, абразивного порошка и твердой фазы включения, что повышает их физико-механические характеристики и улучшает шлифующую способность инструмента. Порошки СТМ с композиционными покрытиями применяются для изготовления инструмента всех видов и типоразмеров на органических связках. Покрытия наносятся в инертной среде и вакууме из расплава на сравнительно хрупкие порошки алмазов марок АС2, АС4, АС6 зернистостью 28/20 и крупнее неправильной формы с шероховатой поверхностью, применяемых в инструменте на органических связках.

Высокая экономичность предполагает экономно дорогостоящих режущих материалов при изготовлении инструментов. Из известных способов экономии быстрорежущих сталей используются следующие:

А) механическое крепление ножей в корпусах из конструкционной стали (развертки, зенкеры, фрезы диаметром свыше 50–100 мм, режущие резцы крупных размеров для тяжелого машиностроения);

Б) приварка рабочей части в стык к присоединительной, выполненной из конструкционной стали (сверла, зенкеры, развертки, протяжки и другие стержневые инструменты);

В) наварка пластин быстрорежущей стали на корпуса резцов сечением свыше 12*12.

Технология их получения основана на трех физико-химических процессах:

- 1) фазовом переходе графитоподобного нитрида бора в кубический;
- 2) фазовом переходе вюрцитного нитрида бора в кубический;
- 3) спекании частиц

Введение твердых смазок позволяет в 1,5 раза снизить усилия резания. Эффективная мощность шлифования также снижается. Порошки СТМ с металлическим и композиционным покрытиями предназначены для изготовления инструмента на органических и металлических связках всех видов и типоразмеров на традиционном оборудовании и по существующим технологическим процессам. Особенностью процесса изготовления является уменьшение объема рабочего слоя связки или наполнителя на величину объема металла, вводимого в круг и равномерно распределенного на зернах СТМ. В настоящее время практически весь инструмент изготавливается из порошков СТМ с покрытиями и широко используется при обработке твердых сплавов, твердых сплавов совместно со сталью, при бурении, камнеобработке, обработке стекла, кремния и корунда, фарфора, ферритов, износостойких покрытий и других материалов.

Таким образом, выбор метода и материала покрытий обусловлен физико-механическими свойствами существующих марок сверхтвердых и связующих

материалов, а также условиями изготовления инструмента. Установлено, что нанесение покрытий существенно повышает свойства СТМ (разрушающую нагрузку и порог окисления зерен СТМ, смачивание и пропитку зерен связующими материалами, удержание зерен и теплоотвод). В результате существенно улучшаются физико-механические свойства связок, повышается работоспособность инструмента.

Неметаллические покрытия

Инструмент из металлизированных алмазов успешно применяется при обработке твердых и относительно хрупких материалов, например, при обработке твердого сплава, стекла, керамики, гранита и др. При обработке данным инструментом вязких материалов, особенно без применения СОТС (например, железоуглеродистых сплавов или твердого сплава совместно со сталью при наличии между ними вязкого припоя), по сравнению с непокрытыми зернами уменьшается производительность обработки, зачастую повышается температура в зоне резания и, как следствие, образуются прижоги и другие дефекты на обработанной поверхности.

КНБ, благодаря высокой термической устойчивости и химической инертности к железоуглеродистым сплавам, широко применяется при обработке различного вида сталей и, прежде всего, быстрорежущих. Инструмент из металлизированных порошков КНБ при обработке таких материалов имеет высокую износостойкость, однако при этом на обработанной поверхности могут образовываться прижоги, особенно при работе инструмента без применения СОТС. Поэтому покрытия, наносимые на зерна алмаза и КНБ, должны обеспечивать не только высокую износостойкость инструмента, изготовленного на их основе, но и высокое качество обработанной поверхности, а также повышать производительность шлифования при обработке вязких материалов. Для этого инструмент не должен засаливаться, должен работать в режиме самозатачивания, обеспечивать высокую мощность шлифования, определяемую фрикционными свойствами системы режущий инструмент – обрабатываемый материал. Этим требованиям удовлетворяет инструмент, изготовленный из порошков СТМ, с неметаллическими покрытиями на основе натриево-боросиликатных стекол.

При работе инструмента в зоне резания, как правило, развиваются достаточно высокие температуры, превышающие температуру трансформации стекла (T_q). Благодаря этому слои стекла, находящиеся в контакте с обрабатываемым материалом, будут размягчаться. Размягченное стекло, являясь хорошей смазкой, способствует снижению температуры и мощности шлифования при обработке вязких материалов, а это, в свою очередь, повышает качество шлифуемой поверхности. Кроме того, стекла, в отличие от металлов, имеют невысокую адгезию к металлам, что препятствует схватыванию инструмента с обрабатываемым материалом.

На основании проведенных исследований по смачиваемости и взаимодействию расплавов стекол с алмазом и КНБ выбраны составы стекол для покрытия порошков СТМ. Разработан способ нанесения стеклопокрытий на порошки СТМ из жидкой фазы. Он прост в исполнении, не требует сложного оборудования, защитных газовых сред или вакуума. По этому способу получают агрегаты, состоящие из 5–20 зерен СТМ, покрытых и связанных между собой адгезионно-активным стеклом.

Использование порошков алмаза и КНБ со стеклопокрытиями позволяет придать инструменту новые положительные качества и, в первую очередь, снизить относительный расход абразива, а также температуру в зоне резания, мощность шлифования.

Углеродное волокно – материал, состоящий из тонких нитей диаметром от 3 до 15 мкм, образованных преимущественно атомами углерода. Атомы углерода объединены в микроскопические кристаллы, выровненные параллельно друг другу; выравнивание кристаллов придает волокну большую прочность на растяжение. Углеродные волокна характеризуются высокой силой натяжения, низким удельным весом, низким коэффициентом температурного расширения и химической инертностью.

Вторично интерес к углеродным волокнам появился, когда велись поиски материалов, пригодных для использования в качестве компонентов для изготовления ракетных двигателей.

Углеродные волокна по своим качествам оказались одними из наиболее подходящих для такой роли армирующими материалами, поскольку они обладают высокой термостойкостью, хорошими теплоизоляционными свойствами, коррозионной стойкостью к воздействию газовых и жидких сред, высокими удельными прочностью и жесткостью.

Теплопроводящее углеродное волокно является разновидностью высокотеплопроводного материала из углеродного волокна, разработанного для теплового проектирования. Теплопроводность этого углеродного волокна в направлении волокна может превышать медь, до 700 Вт/МК. В то же время он обладает хорошими механическими свойствами, электропроводностью и отличной теплопроводностью и теплоотдачей излучения. Волокнистый углеродный порошок с высокой теплопроводностью, изготовленный из этого углеродного волокна, сам по себе является волокнистым, может быть спроектирована ориентация теплопроводности, что является самым большим отличием и преимуществом, отличным от предыдущего углеродного порошка и других материалов теплопроводности. Он может быть использован при заполнении полимерных композитов, разработке материалов для рассеивания тепла для электронных и электрических приборов, а также при решении проблем рассеивания тепла интегрированных электронных компонентов высокой плотности, светодиодов, технологии 5G и т. д.

Углеродно-волокнистые армированные пластмассы или углеродно-волокнистые армированные термопласты. CFRP – это композитные материалы. В этом случае композит состоит из двух частей: матрицы и армирующего материала. В CFRP армирующим материалом является углеродное волокно, которое обеспечивает его прочность. Матрица обычно представляет собой термореактивный пластик, например, полиэфирную смолу, для связывания армирующих элементов между собой. Поскольку CFRP состоят из двух различных элементов, свойства материала зависят от этих двух элементов.

Углеродная нить

Основным элементом CFRP является углеродная нить она производится из полимера-прекурсора, такого как полиакрилонитрил (PAN), вискоза или нефтяной битум. Для синтетических полимеров, таких как PAN или вискоза, прекурсор сначала прядут в нити, используя химические и механические процессы для первоначального выравнивания полимерных цепей таким образом, чтобы улучшить конечные физические свойства готового углеродного волокна. Состав прекурсоров и механические процессы, используемые при прядении нитей, могут различаться у разных производителей. После вытягивания или прядения полимерные нити нагревают для удаления неуглеродных атомов (карбонизация), в результате чего получается конечное углеродное волокно. Нити из углеродного волокна могут быть дополнительно обработаны для улучшения тактильных качеств, а затем намотаны на бобины. Из этих волокон создается однонаправленный лист. Эти листы укладываются друг на друга в квазиизотропной конфигурации, например, под углом 0° , $+60^\circ$ или -60° относительно друг друга.

Из элементарного волокна можно создать двунаправленный тканый лист, то есть саржевое переплетение 2/2. Процесс изготовления большинства CFRP варьируется в зависимости от создаваемого изделия, требуемой отделки (внешнего блеска) и количества производимых изделий. Кроме того, выбор матрицы может оказать существенное влияние на свойства готового композита.

Многие детали из CFRP изготавливаются из одного слоя углеродной ткани, подложка которой покрыта стекловолокном. Для быстрого создания этих композитных деталей используется инструмент, называемый режущим пистолетом. После того, как из углеродного волокна создана тонкая оболочка, режущий пистолет разрезает рулоны стекловолокна на короткие отрезки и одновременно распыляет смолу, так что стекловолокно и смола смешиваются на месте. Смола может быть смешана либо внешне, когда отвердитель и смола распыляются отдельно, либо внутренне, что требует очистки после каждого использования. Методы производства могут включать следующее:

Формование

Один из методов производства деталей из углеродного волокна заключается в послойном нанесении листов углеродной ткани в форму,

повторяющую форму конечного изделия. Расположение и переплетение волокон ткани выбираются таким образом, чтобы оптимизировать прочностные и жесткостные свойства получаемого материала. Затем форма заполняется эпоксидной смолой и подвергается нагреванию или воздушной полимеризации. Полученная деталь обладает высокой коррозионной стойкостью, жесткостью и прочностью относительно своего веса. Детали, используемые в менее ответственных областях, изготавливаются путем драпировки ткани на форму, при этом эпоксидная смола либо предварительно пропитывается в волокна (также известная как препрег), либо наносится поверх нее «нанесением». Высокоэффективные детали, изготовленные с использованием одной формы, часто отверждаются в вакуумной упаковке и/или в автоклаве, поскольку даже небольшие пузырьки воздуха в материале снижают прочность. Альтернативой автоклавному методу является использование внутреннего давления с помощью надувных воздушных камер или пенополистирола внутри незатвердевшего уложенного углеродного волокна.

Вакуумная упаковка

Для простых изделий, для которых требуется относительно небольшое количество копий (одна-две в день), можно использовать вакуумный мешок. Форма из стекловолокна, углеродного волокна или алюминия полируется и покрывается воском, на нее наносится разделительный состав, после чего наносится ткань и смола, вакуум создается, и изделие откладывается в сторону, чтобы затвердеть. Существует три способа нанесения смолы на ткань в вакуумной форме.

Первый метод – ручной, называемый «мокрым нанесением», при котором двухкомпонентная смола смешивается и наносится перед укладкой в форму и помещением в мешок.

Второй метод – методом инфузии, при котором сухая ткань и форма помещаются в мешок, а вакуум затягивает смолу через тонкую трубку в мешок, а затем через трубку с отверстиями или что-то подобное для равномерного распределения смолы по ткани. Проволочная ткацкая рама идеально подходит для трубки с отверстиями внутри мешка. Оба этих метода нанесения смолы требуют ручной работы для равномерного распределения смолы и получения глянцевої поверхности с очень мелкими точечными отверстиями.

Третий метод изготовления композитных материалов известен как сухая укладка. В этом случае углеродное волокно уже пропитано смолой (препрег) и наносится на форму аналогично клеевой пленке. Затем собранная конструкция помещается в вакуум для отверждения. Метод сухой укладки имеет наименьшее количество отходов смолы и позволяет создавать более легкие конструкции, чем метод влажной укладки. Кроме того, поскольку при влажной укладке большие объемы смолы сложнее удалить, детали из препрега обычно имеют меньше микропор. Для устранения микропор с минимальным

количеством смолы обычно требуется использование давления в автоклаве для удаления остаточных газов.

Компрессионное формование

Более быстрый метод использует компрессионную форму, также известную как ковка из углеродного волокна. Это двухкомпонентная (мужская и женская части) или многокомпонентная форма, обычно изготавливаемая из алюминия или стали, а в последнее время и из пластика, напечатанного на 3D-принтере. Компоненты формы спрессовываются вместе, а ткань и смола загружаются во внутреннюю полость, которая в конечном итоге становится желаемой деталью. Преимуществом является скорость всего процесса. Некоторые автопроизводители, такие как BMW, заявляли о возможности выпуска новой детали каждые 80 секунд. Однако эта технология имеет очень высокую первоначальную стоимость, поскольку для изготовления форм требуется высокоточная обработка на станках с ЧПУ.

Намотка нити накаливания

Для изготовления деталей из углепластика сложной или замысловатой формы можно использовать устройство для намотки нитей, при котором нити наматываются на оправку или сердечник.

Резка

Для резки препрегов, армированных углеродным волокном, и сухих углеродных текстильных материалов требуются точные методы резки, чтобы сохранить целостность материала и уменьшить дефекты, такие как вырывание волокон, расслоение и истирание режущей кромки. Для резки препрегов из углеродного волокна часто используются цифровые системы резки с ЧПУ, оснащенные механизмами протяжки и осцилляции, а для обработки углеродных тканей обычно используются вращающиеся ножи. Ультразвуковая резка – еще один метод резки препрегов из углеродного волокна, особенно эффективный для уменьшения расслоения за счет минимизации механического напряжения в процессе резки. Гидроабразивная резка может быть предпочтительным методом для более толстых и многослойных полимерных композитов.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие материалы относятся к сверхтвердым синтетическим?
2. Какими свойствами обладают синтетические сверхтвердые материалы и область их применения?
3. Какую роль выполняют металлические и композиционные покрытия?
4. С какой целью на детали наносятся покрытия?
5. Способы изучения затрат рабочего времени.

Тема 6. Многофункциональные покрытия

Ключевые вопросы темы

1. Многофункциональные покрытия.
2. Цинковые покрытия.
3. Алюминиевые покрытия.
4. Неметаллические покрытия.

Ключевые понятия: напыление, наплавка, покрытие, эмалирование, полимерные покрытия.

Литература: [5, с. 249–275].

Методические рекомендации

Классификация процессов нанесения металлических покрытий.

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, электроизоляционный, магнитных свойств и др.), а также восстановления изношенных деталей.

При выборе покрытий следует учитывать назначение и материал покрываемой детали, условия ее эксплуатации, свойства покрытия и способ его нанесения, допустимость контактов сопрягаемого металла и покрытия, а также экономическую целесообразность его применения.

Поверхность основного металла, на которую предполагается нанесение покрытий, должна пройти специальную подготовку. При нанесении гальванических покрытий, в соответствии с ГОСТ 9.301-78, шероховатость поверхности основного металла должна быть не более $RZ = 40$ мкм под защитные покрытия; $Rn = 2,5$ мкм под защитно-декоративные; $Ra < 40$ мкм под специальные покрытия в зависимости от функционального назначения. На поверхности деталей не допускается закатанная окалина, расслоение и трещины, выявившиеся после травления, шлифовки и полировки, поры и раковины.

Поверхность детали должна быть очищена от травильного шлака, продуктов коррозии и других загрязнений.

Перед эмалированием и нанесением органических покрытий поверхность металла должна быть очищена, обезжирена и подвергнута предварительной химической обработке.

Для всех видов покрытий установлены требования к их внешнему виду и специальным свойствам. Как правило, устанавливаются требования к толщине, пористости и прочности сцепления с основным материалом.

В процессе эксплуатации изделия не должно быть локального отслоения покрытия. Поэтому важнейшим требованием является надежное сцепление покрытия с основным материалом детали.

При оценке сцепления покрытия с листовым металлом используют пробу на загиб и глубокую вытяжку. 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.

Для надежной защиты деформируемых поверхностей покрытия, прежде всего на органической основе, должны обладать эластичностью и трещиностойкостью. Под трещиностойкостью понимается способность покрытия в подложке растягиваться над ней, сохраняя при этом защитные свойства.

Покрытие взаимодействует с поверхностным слоем материала основы. Поэтому для получения качественного покрытия важную роль играет обработка поверхности. Как отмечалось ранее, для предварительной обработки поверхности используют механические и химические методы очистки: струйную обработку, обезжиривание, травление и др.

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 материала, образующимися при пропускании проволоки или порошка через кислородно-ацетиленовое пламя, с последующим осаждением на холодную основу. Для нагрева можно использовать электродугую 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-B 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, в 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 – детали перемешивают в сосудах с соответствующими тонкими металлическими порошками, активаторами и стеклянными шариками.

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 поверхностную твердость, износо- и 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 Al₂O₃ 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.

В случае необходимости повышения прочностных свойств вместо углеродистых конструкционных сталей используют микролегированные стали с добавками Nb или Ti.

Микролегирующие элементы придают стали более высокую жаропрочность, поэтому такие стали можно использовать для нагружения при высоких температурах, тем более что алюминий в качестве покрытия имеет хорошую стойкость к окислению.

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.

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 покрывают грунтовкой и покровными эмалями и при этом дважды обжигаются, 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 и способы их нанесения;

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.

К полимерным покрытиям предъявляются высокие требования. Покрытия должны иметь хорошую адгезию к защищаемой поверхности, беспористость, эластичность, механическую прочность, теплостойкость, быть инертными к средам, с которыми они находятся в контакте.

Ни один из известных полимеров не сможет полностью удовлетворить всем перечисленным требованиям. Материалы, обладающие достаточной химической стойкостью, как правило, имеют недостаточную адгезию к защищаемому металлу. Полимерные покрытия с хорошей адгезией к защищаемой поверхности часто легко разрушаются от химического и механического воздействия агрессивных сред. Лишь эпоксидные и некоторые другие полимеры удачно сочетают высокую адгезию к металлу с удовлетворительной химической стойкостью.

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.

В отличие от коррозионной стойкости металлов, характеризующей потерей массы, химическая стойкость полимерных материалов численно обычно не выражается. О химической стойкости полимерных покрытий судят по степени набухания и разрушения пленки, потере эластичности, изменению цвета и т. д. Перед нанесением покрытия проводится подготовка металлической поверхности (очистка и придание равномерной шероховатости для обеспечения хорошей адгезии) при помощи дробеструйной обработки. На подготовленную поверхность наносят грунт, создающий противокоррозионный слой с обеспечением высокой прочности сцепления как с металлом, так и с последующими слоями покрытия.

Для подготовки защищаемой поверхности изделий применяют дробеструйные автоматы и пистолеты, а также ручные реверсивные пневматические щетки.

Полимерные покрытия могут наноситься как непосредственно на изделия, так и на тонколистовую полосу. Второй метод появился недавно, но

его использование позволяет существенно снизить трудоемкость изготовления изделий.

При использовании метода «coil coating» стальной лист с металлическим покрытием, или без него, на специальной установке по нанесению органических покрытий в непрерывном технологическом конвейере подвергается очистке, предварительной химической обработке, и затем с помощью валков на него наносят покрытие из жидких органических материалов, которое подвергают горячей сушке, или наклеивают с помощью клеящих материалов тонкие защитные пленки из искусственных материалов.

Для нанесения на поверхность полимерных покрытий и их формирования применяются различные окрасочные агрегаты, краскораспылители, красконагнетательные баки. Пневматические окрасочные агрегаты обеспечивают механическое раздробление окрасочного состава (гидродинамическое распыление). Красконагнетательные баки осуществляют подачу лакокрасочных материалов под давлением сжатого воздуха к пневматическим краскораспылителям. Среди областей применения проката с органическим покрытием следует назвать прежде всего строительную индустрию (например, для внешнего и внутреннего применения: крыши, стены, металлические двери), производство металлических изделий из листового железа (например, для мебели, полок, карнизов, корпусов приборов различного вида), автомобильную промышленность (детали кузова, распределительные щиты), упаковочную индустрию (бочки, аэрозольные баллоны, крышки) и изоляцию труб.

Взамен гальванических, эмалевых и силикатных могут использоваться тонкослойные (0,3–05 мм) полимерные порошковые покрытия, получаемые методом вибровихревого напыления. При вибровихревом способе напыления на частицы полимера одновременно воздействуют воздух под давлением и вибрация. При этом способе аппарат вихревого напыления установлен на мембрану вибратора, которая получает вертикальное перемещение с частотой 50–100 колебаний в секунду. Применение таких покрытий исключает использование токсичных и пожароопасных растворителей, устраняет процесс сушки после их нанесения, дает равномерное покрытие толстым слоем при одноразовом погружении в оживленный порошок. Эти покрытия обладают более высокими защитными свойствами по сравнению с покрытиями, полученными другими способами.

Полимерные покрытия могут наноситься газопламенным методом. Газопламенное напыление, называемое также пламенным или огневым напылением, заключается в том, что порошкообразная полимерная композиция наносится на металлическую или иную поверхность, предварительно подготовленную и нагретую с помощью специальной горелки автогенного типа.

Частицы полимерного материала размягчаются в пламени и, попадая на нагретую поверхность, растекаются на ней, образуя при остывании слой покрытия. Покрытия необходимой толщины получают последовательным нанесением нескольких слоев полимера; выравнивание поверхности последнего слоя происходит в результате оплавления в пламени горелки без подачи порошка.

Температура пламени газа, чаще всего ацетилена, достигает 650–700 °С, но порошкообразный полимер сгорает лишь частично вследствие значительной скорости его прохождения через зону пламени (около 25 м/сек).

Для напыления могут применяться порошки различных термопластов, в том числе составы на основе поливинилбутираля, битумные и каучуковые композиции. Разработан также газопламенный метод нанесения термореактивных полимеров, при котором производится спекание полимерного покрытия, а не оплавление его. Этим методом наносят составы на основе феноло-формальдегидных и эпоксидных смол с наполнителями и отвердителями.

Для напыления применяют порошки полимерных материалов с размерами частиц 0,10–0,25 мм. При нанесении покрытий малой толщины на детали сложной конфигурации используют порошок с меньшими размерами частиц. Получение покрытий с ровной и гладкой поверхностью может быть достигнуто, если порошок полимера сухой, однородный по размерам частиц.

Воздушно-порошковая смесь поступает в горелку через резиновый шланг и далее попадает в зону пламени. Газовая смесь сгорает в мундштуке горелки, в центре которого расположено сопло для подачи порошка. Метод газопламенного напыления применяют для выравнивания поверхностей при ремонте.

Недостатки метода: затруднительность нанесения полимеров на сравнительно большие детали и узлы, а также на детали с неодинаковой толщиной в разных сечениях; неравномерность покрытия острых кромок и углов между отдельными элементами деталей сложной конфигурации, а также внутренних поверхностей резервуаров, открытых с одной стороны.

Вихревой метод напыления получил распространение главным образом для нанесения полимеров на детали небольших размеров, не имеющих значительного количества отверстий, острых кромок и углов.

Технологический процесс нанесения покрытий в аппаратах периодического действия и на конвейерных линиях включает следующие основные операции: подготовка поверхности детали, нагрев, нанесение порошка полимера, оплавление покрытия, охлаждение детали с покрытием.

Защитные технологические покрытия

Для защиты от окисления при высоком нагреве различных сортов сталей, жаропрочных, титановых, никелевых и других сплавов созданы защитные

технологические покрытия, которые работают в интервале температур 950–1700 °С. Эти покрытия экологически чистые, экономичны и просты в использовании, обладают хорошими смазочными характеристиками и могут быть использованы при обработке методами пластической деформации сталей и сплавов.

При штамповке заготовок из титановых сплавов применяют покрытия ЭВТ-24, ЭВТ-25, которые защищают металл от окисления, улучшают процесс заполнения формы, уменьшают глубину газонасыщенного слоя, повышают стойкость штампов в полтора-три раза.

Покрытия ЭВТ-35, ЭВТ-57, ЭВТ-88М используют в изотермической штамповке титановых и никелевых жаропрочных сплавов при изготовлении точных заготовок сложного профиля, при этом коэффициент использования материала повышается на 20–30 % и увеличивается стойкость штампов. При этом сокращаются припуски на механическую обработку и снижается трудоемкость изготовления деталей.

Покрытия ЭВТ-67, ЭВТ-78М, ЭВТ-100 позволяют защищать поверхности заготовок из тугоплавких сплавов от окисления.

Применение защитных технологических покрытий позволяет экономить металл и снижать себестоимость изготовления деталей.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова технология нанесения покрытий? Классификация процессов?
2. Область применения и свойства цинковых покрытий?
3. Область применения и свойства алюминиевых покрытий?
4. В чем сущность нанесения покрытия плакированием?
5. Каковы способы нанесения органических полимерных покрытий?

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Согласно учебному плану дисциплины «Новые материалы в машиностроении» направления подготовки 15.04.01 Машиностроение, 15.04.02 Технологические машины и оборудование студенты заочной формы обучения закрепляют изучаемый материал, самостоятельно в виде выполнения контрольной работы.

При выполнении контрольной работы студенты отвечают на два вопроса. Варианты вопросов определяется по таблице 3 в зависимости от двух последних цифр студенческого шифра (номера студенческого билета и зачетной книжки). В таблице по горизонтали (Б) размещены цифры от 0 до 9, каждая из которых – последняя цифра шифра студента. По вертикали (А) также размещены цифры от 0 до 9, каждая из которых – предпоследняя цифра шифра студента. Пересечение горизонтальной и вертикальной линий определяет клетку с номерами вариантов контрольной работы. Перечень вопросов для выполнения контрольной работы представлен в Приложении А.

Таблица 3 – Варианты заданий

Б		Последняя цифра шифра									
А		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Предпоследняя цифра шифра	0	1,26	11,5	21,11	1,26	11,1	21,13	1,22	11,2	21,12	1,18
	1	2,26	12,3	22,11	2,26	12,1	22,13	2,22	12,3	22,12	2,18
	2	3,26	13,5	23,11	3,26	13,1	23,13	3,22	13,15	23,12	3,18
	3	4,26	14,5	24,11	4,26	14,24	24,13	4,22	14,15	24,12	4,18
	4	5,26	15,5	25,11	5,26	15,24	25,13	5,22	15,1	25,12	5,18
	5	6,26	16,5	26,11	6,26	16,24	26,13	6,22	16,15	26,12	6,18
	6	7,26	17,8	27,11	7,26	17,24	27,13	7,22	17,15	27,12	7,18
	7	8,26	18,5	3,10	8,26	18,2	8,9	8,22	18,15	16,8	8,18
	8	9,26	19,5	7,10	9,26	19,24	8,9	9,22	19,15	9,8	9,18
	9	10,26	20,5	2,11	10,26	20,24	8,12	10,22	20,15	9,13	10,18

Ответы на рассматриваемые вопросы должны излагаться по существу, быть четкими, полными, ясными и содержать элементы анализа.

При ответе на вопросы студент должен использовать не только учебную литературу, но и статьи, публикуемые в периодической печати, указывая в работе источники информации. Текстовая часть работы может быть иллюстрирована рисунками, схемами, таблицами. В конце приводится список использованных источников (не менее 10-ти источников).

Работа должна быть выполнена на листах формата А4 с одной стороны листа, в печатном варианте. Шрифт текстовой части размер – 12 (для заголовков – 14), вид шрифта – Times New Roman, интервал 1,5. Поля страницы: левое 3 см, правое 1,5 см, верхнее и нижнее 2 см. Нумерация страниц внизу справа.

Структура контрольной работы:

- титульный лист (Приложение Б)
- содержание
- текстовая часть (каждый вопрос начинать с нового листа)
- список используемой литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.100-2018, ГОСТ 7.82-2001.

В текстовой части не допускается сокращение слов. Объем выполненной работы не должен превышать 15 листов А4.

Контрольная работа должна быть оформлена в соответствии с общими требованиями, предъявляемыми к контрольным работам:

- текст должен быть отпечатан на компьютере;
- основной текст подразделяется на озаглавленные части в соответствии с содержанием работы. Заглавия не подчеркиваются, в конце заголовка точка не ставится, переносы допускаются;
- страницы текста пронумерованы арабскими цифрами в правом верхнем углу без точек. Титульный лист считается первым и не нумеруется;
- на каждой странице оставлены поля для замечаний рецензента;
- список использованных источников оформляются по соответствующим требованиям.

Стиль и язык изложения материала контрольной работы должны быть четкими, ясными и грамотными. Грамматические и синтаксические ошибки недопустимы. Выполненная контрольная работа представляется для регистрации на кафедру, затем поступает на рецензирование преподавателю.

Положительная оценка («зачтено») выставляется в зависимости от полноты раскрытия вопроса и объема предоставленного материала в контрольной работе, а также степени его усвоения, которая выявляется при ее защите (умение использовать при ответе на вопросы научную терминологию, лингвистически и логически правильно отвечать на вопросы по проработанному материалу). Студент, получивший контрольную работу с оценкой «зачтено», знакомится с рецензией и с учетом замечаний преподавателя дорабатывает отдельные вопросы с целью углубления своих знаний.

Контрольная работа с оценкой «не зачтено» возвращается студенту с рецензией, выполняется студентом вновь и сдается вместе с не зачтенной работой на проверку преподавателю. Контрольная работа, выполненная не по своему варианту, возвращается без проверки и зачета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Рогов, В. А. Новые материалы в машиностроении: учеб. пособие / В. А. Рогов, В. В. Соловьев, В. В. Копылов. – Москва: РУДН, 2008. – 324 с. – Режим доступа: открытый. – URL: <https://repository.rudn.ru/ru/records/manual/record/37927/> (дата обращения: 28.08.2026). – Текст: электронный.

2. Солнцев, Ю. П. Специальные материалы в машиностроении: учебник / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, В. Ю. Пириайнен. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 664 с. – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/206546> (дата обращения: 28.08.2026). – ISBN 978-5-8114-3921-8. – Текст: электронный.

3. Гаршин, А. П. Композиционные материалы в машиностроении. Керамические материалы / А. П. Гаршин, Г. П. Зайцев; под ред. А. П. Гаршина. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 412 с. – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/202157> (дата обращения: 28.08.2025). – ISBN 978-5-8114-9983-0. – Текст: электронный.

4. Гетьман, А. А. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / А. А. Гетьман. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 492 с. – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/292859> (дата обращения: 28.08.2026). – ISBN 978-5-507-45200-2. – Текст: электронный.

5. Специальные стали и сплавы: учеб. пособие / А. А. Ковалева, Е. С. Лопатина, В. И. Аникина, Т. Р. Гильманшина. – Сибирский федеральный университет. – Красноярск: Сибирский федеральный университет (СФУ), 2016. – 232 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=497714> (дата обращения: 28.08.2026). – ISBN 978-5-7638-3470-3. – Текст: электронный.

6. Расторгуев, Д. А. Неметаллические материалы в машиностроении: учеб. пособие / Д. А. Расторгуев. – Тольятти: ТГУ, 2019. – 84 с. – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/140244> (дата обращения: 28.08.2026). – Текст: электронный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Вопросы для контрольной работы

1. Каковы свойства углепластиков и где они используются?
2. Что из себя представляют органопластики и где они применяются?
3. Область применения боропластиков?
4. Где используются композиционные материалы с металлической матрицей?
5. Какие материалы относят к наноструктурным?
6. Каковы методы получения наноструктурных материалов?
7. Для чего и как осуществляется газовая конденсация порошков и их консолидация?
8. Как осуществляется шаровой размол материала?
9. Какие виды мельниц применяют для размола материалов?
10. Как и зачем осуществляется пазмохимический синтез?
11. В чем заключается сущность осаждения порошков из коллоидных растворов?
12. Как осуществляется механосинтез?
13. В чем заключается метод получения порошков электровзрывом?
14. Какие известны методы получения тонких пленок?
15. В чем преимущества методов порошковой металлургии?
16. Какова технология получения изделий из порошковых материалов?
17. Для изготовления каких деталей применяют антифрикционные порошковые материалы?
18. Какова область использования фрикционных порошковых материалов?
19. Каковы свойства и где используются высокопористые порошковые материалы?
20. Какие материалы относятся к сверхтвердым синтетическим?
21. Какими свойствами обладают синтетические сверхтвердые материалы и область их применения?
22. Какую роль выполняют металлические и композиционные покрытия?
23. Каковы область применения и свойства неметаллических покрытий?
24. С какой целью на детали наносятся покрытия?
25. Какие виды покрытий используются?
26. Какова технология нанесения покрытий? Классификация процессов?
27. Область применения и свойства цинковых покрытий?

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт агроинженерии и пищевых систем

Кафедра инжиниринга технологического оборудования

Контрольная работа
допущена к защите:
должность (звание), ученая степень
_____ Фамилия И.О.
« ____ » _____ 202 ____ г.

Контрольная работа
защищена
должность (звание), ученая степень
_____ Фамилия И.О.
« ____ » _____ 202 ____ г.

Контрольная работа № ____

по дисциплине
«НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

Шифр студента _____
Вариант № _____

Работу выполнил:
студент гр. _____
_____ Фамилия И.О.
« ____ » _____ 202 ____ г.

Калининград – 20 ____

Локальный электронный методический материал

Елена Петровна Щербакова
Влада Игоревна Абрамова

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Редактор С. Кондрашова
Корректор Т. Звада

Уч.-изд. л. 5,4. Печ. л. 4,7.

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
236022, Калининград, Советский проспект, 1