

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Г. И. Анискович, В. М. Капцевич, Н. К. Толочко

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по аграрному техническому образованию
в качестве практикума для студентов учреждений
высшего образования по специальности
1-74 06 03 Ремонтно-обслуживающее производство
в сельском хозяйстве*

Минск
БГАТУ
2017

УДК 621.78(07)
ББК 30.61я7
А67

Рецензенты:

Кафедра «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» Белорусского национального технического университета (заведующий кафедрой, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор Ф. И. Пантелеенко);
Генеральный директор ГНПО порошковой металлургии – директор ГНУ «Институт порошковой металлургии», член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор *А.Ф. Ильющенко*

Под редакцией Н. К. Толочко

Анискович, Г. И.

А67 Упрочняющие технологии : практикум / Г. И. Анискович, В. М. Капцевич, Н. К. Толочко ; под ред. Н. К. Толочко. – Минск : БГАТУ, 2017. – 196 с.

ISBN 978-985-519-832-2.

Содержится учебно-методический материал для выполнения лабораторных и практических работ по учебной дисциплине «Упрочняющие технологии».

Для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 03 Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве.

УДК 621.78(07)
ББК 30.61я7

ISBN 978-985-519-832-2

© БГАТУ, 2017

Содержание

Введение	4
1. Компьютерное моделирование процессов формирования мелкозернистой структуры слитка методом твердожидкого литья.....	5
2. Изучение структуры порошковых материалов.....	18
3. Компьютерное моделирование процессов получения изделий из композиционных материалов методом лазерного спекания порошков	27
4. Изучение структуры наноматериалов	39
5. Изучение процессов магнитно-абразивной обработки металлических деталей	48
6. Изучение структуры напыленных и наплавленных покрытий.....	61
7. Изучение структуры припекаемых покрытий	70
8. Изучение процессов нанесения гальванических покрытий.....	76
9. Рациональный выбор сталей для изготовления деталей, работающих в разных условиях эксплуатации.....	85
10. Рациональный выбор методов обработки заготовок поверхностным пластическим деформированием	132
11. Упрочнение деталей сельскохозяйственных машин импульсным закалочным охлаждением жидкостью	148
12. Упрочнение деталей сельскохозяйственных машин диффузионным намерзанием износостойкими сплавами	158
13. Исследование износостойкости упрочненных деталей сельскохозяйственных машин.....	169
14. Рациональный выбор технологий упрочнения деталей сельскохозяйственной техники.....	184
Список литературы.....	195

Введение

Одним из основных направлений повышения эффективности производства, ремонта и эксплуатации машин, применяемых в агропромышленном комплексе, является улучшение их эксплуатационных характеристик путем применения современных материалов и прогрессивных упрочняющих технологий, обеспечивающих высокую надежность функционирования их деталей и узлов в условиях интенсивного действия разрушающих факторов.

В связи с этим будущим инженерам важно иметь не только научные знания, но и практические навыки в области проблем повышения прочности машин. В частности, они должны владеть комплексным подходом к решению этих проблем, основанным на рациональном выборе материалов и использовании различных видов упрочняющих технологий.

Настоящий практикум содержит учебно-методический материал для выполнения лабораторных и практических работ по учебной дисциплине «Упрочняющие технологии» и предназначен для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 03 Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве.

Книга подготовлена коллективом авторов в следующем составе: кандидат технических наук, доцент Г. И. Анискович (раб. 11, 12, 13), доктор технических наук, профессор В. М. Капцевич (раб. 2, 6, 7, 9), доктор физико-математических наук, профессор Н. К. Толочко (раб. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 14).

1. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ СЛИТКА МЕТОДОМ ТВЕРДОЖИДКОГО ЛИТЬЯ

Цель работы – изучение особенностей изготовления литых изделий путем твердожидкого литья; приобретение практических навыков компьютерного моделирования технологических процессов.

Студент должен знать: закономерности формирования структуры слитка при использовании различных литейных технологий; особенности реализации процессов твердожидкого литья; основы компьютерного моделирования технологических процессов.

Студент должен уметь: анализировать характер протекания процессов твердожидкого литья при различных режимах и осуществлять выбор оптимальных режимов процессов методами компьютерного моделирования.

Основные сведения [1–3]

Традиционные технологические процессы литья металлов в жидком состоянии включают следующие последовательные стадии: заливка расплавленного металла в литейную форму, затвердевание залитого металла, охлаждение отливки в форме и ее извлечение из формы с последующей отделкой. Обычно слитки, получаемые в результате жидкого литья, характеризуются структурной неоднородностью; в них различают три зоны с различной структурой: наружную, промежуточную и внутреннюю, – соответственно состоящие из мелких равноосных зерен, удлиненных зерен и крупных равноосных зерен.

С начала 90-х г. XX в. получили развитие технологические процессы литья металлов в твердожидком (ТЖ) состоянии. Наиболее распространены два базовых технологических подхода к ТЖ-литью: реолитье и тиксолитье.

В реолитье исходным материалом является расплав, который подвергается частичной кристаллизации в условиях интенсивного перемешивания (обычно осуществляемого с помощью электромагнитных полей или механических мешалок). При этом за счет сдвиговых сил происходит измельчение дендритов. В результате материал переводится в ТЖ-состояние, в котором он представляет

собой суспензию, состоящую из расплава и равномерно распределенных в его объеме мелких глобулярных кристаллических частиц. Затем полученная таким образом ТЖ-смесь инжeksiруется под давлением в литейную форму, где происходит ее полная кристаллизация до формирования отливки с однородной глобулярной мелкозернистой структурой.

В тиксолитье исходным материалом являются специально приготовленные твердые заготовки (брикеты), изначально обладающие однородной глобулярной мелкозернистой структурой (одним из способов их получения является реолитье). Заготовка сначала частично расплавляется (обычно с использованием индукционного нагрева), переходя в ТЖ-состояние. Затем она подается в литейную форму, где в ходе деформирования и последующей кристаллизации формируется отливка, также обладающая однородной глобулярной мелкозернистой структурой. Находясь в ТЖ-состоянии, близком к сверхпластичному, когда мелкие глобулярные зерна легко перемещаются в окружающем их расплаве, заготовка способна довольно легко деформироваться и заполнять литейную форму при сравнительно малом давлении.

Главным достоинством ТЖ-литья является возможность получать слитки с улучшенной структурой и, как следствие, с повышенными физико-механическими свойствами. Кроме того, ТЖ-литье характеризуется сравнительно малой усадкой, поскольку обработка подвергается частично закристаллизованный расплав.

Разновидностями технологий рео- и тиксолитья являются, соответственно, рео- и тиксокомпактирование. При реокомпактировании в литейную форму сначала вводят расплав, а затем твердые частицы того же состава, что и расплав, которые подвергаются компактированию. При этом частицы, находясь в расплаве, приобретают повышенную подвижность и распределяются по всему объему литейной формы, образуя плотную укладку. В свою очередь, расплав заполняет пространство между частицами. Возможные излишки расплава выдавливаются за пределы литейной формы. В ходе последующей кристаллизации расплава частицы связываются между собой, образуя слиток. При тиксокомпактировании в литейную форму загружаются твердые частицы, которые подвергаются частичному плавлению и компактированию. Далее проис-

ходят процессы, аналогичные тем, которые имеют место при реокомпактировании, в результате чего также образуется слиток.

Для исследования процессов ТЖ-литья используются различные виды моделей: однофазные, двухфазные и микроструктурные. В однофазных моделях ТЖ-материал считается гомогенной неньютоновской жидкостью, поведение которой описывается уравнением неразрывности, уравнением переноса количества движения, реологическим уравнением состояния. В двухфазных моделях ТЖ-материал рассматривается как двухфазная среда, макроскопически гомогенная и изотропная, представляющая собой цельное пористое тело с жидкостью, перетекающей в порах при деформации. В микроструктурных моделях основные реологические свойства ТЖ-материала задаются его внутренней структурой. При этом для описания микроструктуры ТЖ-суспензии (при заданной доле твердой фазы) необходимо иметь количественные характеристики следующих параметров: морфологии частиц, размеров частиц и степени их агломерации.

Существует ряд программных пакетов для расчетов структурных и реологических характеристик ТЖ-сред. Для термодинамических расчетов используются программы Thermo-Calc, MTData, ChemSage и др. Данные для расчетов берутся в основном из термодинамических баз данных SGTE и Thermotech. Для исследования течения и кристаллизации металлических ТЖ-суспензий реализованы как специализированные программы (MAGMASOFT, DEFORM-3D, ProCAST, ADSTEFAN), так и дополнительные модули к более общим пакетам моделирования физико-технических процессов (FLOW-3D, Fluent, ABAQUS).

Для разработки устойчивой и надежной технологии ТЖ-литья необходимы детальные данные о параметрах среды и процесса, которые получают путем проведения термодинамических расчетов в сочетании с математическим моделированием движения среды. Основанием для выбора адекватной математической модели среды являются результаты экспериментов. В свою очередь, применение модели позволяет скорректировать реологические характеристики среды, определяемые в экспериментах. Таким образом, лишь в совокупности экспериментальные и теоретические методы позволяют определить возможность и условия реализации конкретного процесса ТЖ-литья.

Методические указания

Для выполнения работы студентам предоставляются персональные компьютеры с установленной операционной системой MS Windows XP и офисным пакетом MS Office 2003, включающим текстовый редактор MS Word 2003 и табличный редактор MS Excel 2003. Компьютерная программа лабораторной работы выполнена в среде программирования Borland Delphi 7. Программный модуль лабораторной работы представляет собой каталог SSM, включающий в себя следующие файлы:

- Основные положения.doc – файл MS Word 2003, содержащий теоретические сведения, порядок выполнения работы, индивидуальные задания, требования к отчету и список литературы. Во избежание модификации или повреждения данного файла он защищен паролем на изменение и открывается в ходе выполнения работы в режиме «только для чтения».

- Выполнение.xls – файл MS Excel 2003, предназначенный для выполнения расчетов в соответствии с индивидуальным заданием, содержит три рабочих листа для выполнения заданий. Во избежание модификации или повреждения данного файла он защищен паролем на изменение и открывается в ходе выполнения работы в режиме «только для чтения».

- Project_SSM.exe – файл-оболочка, скомпилированный в среде Borland Delphi 7, предназначенный для запуска и выполнения лабораторной работы.

- Colok.dll и каталог data – служебные файлы проведения коллоквиума для осуществления контроля знаний студентов перед выполнением работы.

Требования к конфигурации компьютера определяются требованиями офисных программ MS Excel 2003 и MS Word 2003, запускаемых скомпилированной программой-оболочкой.

Рекомендуемые параметры конфигурации PC:

- 3,18 МБ свободного пространства на жестком диске для размещения необходимых файлов;
- не менее 256 МБ оперативной памяти;
- видеокарта с поддержкой DirectX и оперативной памятью не менее 32 МБ для просмотра видеофрагмента процесса литья металла в твердожидком состоянии;

- операционная система MS Windows XP и офисные программы MS Word и MS Excel, версии 2003 или выше для совместимости форматов.

Для выполнения работы следует руководствоваться компьютерной программой работы, представленной в электронном приложении к методическим указаниям.

Порядок выполнения работы

Схема выполнения работы представляется следующими шагами:

1. **Запуск программы** (запуск на выполнение скомпилированного файла-оболочки Project_SSM.exe). После запуска появляется окно с содержанием лабораторной работы (рис. 1).



Рис. 1. Диалоговое окно при запуске программы

2. **Ознакомление с основными положениями технологии литья.** После нажатия на активную кнопку «Основные положения» открывается документ Основные положения.doc – файл MS Word (только чтение), в котором приведены основные положения технологии литья.

3. Коллоквиум. Для контроля усвоенных знаний необходимо ответить на вопросы коллоквиума. Для этого в основном окне программы необходимо выбрать закладку «Коллоквиум» (рис. 2) и ответить на 10 вопросов по теме выполняемой работы. Вопросы выбираются программой в случайном порядке из общего списка 20 вопросов базы данных. Для ответа на вопрос необходимо установить флажок напротив правильного варианта и нажать на кнопку «Ответить». Правильным ответом считается наиболее точный и полный из предложенных вариантов в соответствии с предварительными теоретическими сведениями. По ходу выполнения задания в рабочем окне приводится статистика: количество заданных и оставшихся вопросов и количество правильных ответов. При завершении коллоквиума студент получает оценку и может приступить к выполнению работы, если эта оценка не ниже 4 (применяется 5-балльная система). При получении оценки ниже 4 баллов возможна следующая попытка ответить на вопросы, сочетание которых каждый раз произвольно меняется программой.

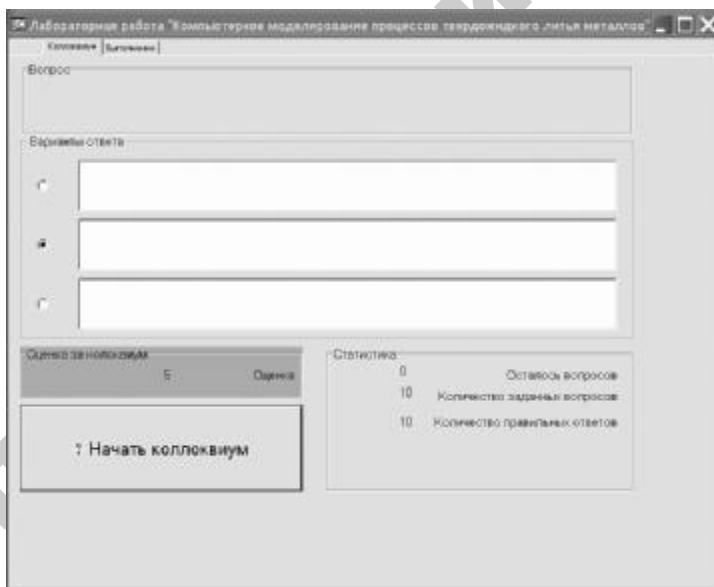


Рис. 2. Диалоговое окно при запуске закладки «Коллоквиум»

4. Выполнение работы. Для начала выполнения работы необходимо в окне программы перейти на закладку «Выполнение»

и нажать на кнопку «Запуск программы Excel». При этом вызывается программа Excel и открывается файл Выполнение.xls (рис. 3).

В этом документе открываются листы выполнения заданий, в которые сначала необходимо внести индивидуальный номер студента (ИНС), а затем – заполнить таблицы в соответствии с заданием и получить информацию о моделируемом процессе в табличном и графическом виде. Введение ИНС позволяет индивидуализировать выполнение работы: у всех студентов получаемые результаты зависят от ИНС, являющегося функциональным числовым коэффициентом в исследуемых процессах (т. е. результаты не повторяются).



Рис. 3. Диалоговое окно при запуске закладки «Выполнение»

Для каждого задания исходные данные, полученные результаты моделирования (таблицы и графики) и выводы, сделанные на основании анализа этих результатов, необходимо представить в отчете о выполнении работы.

При выполнении заданий работы следует предварительно ознакомиться с соответствующими пояснениями к выполнению заданий.

Варианты заданий

Задание 1. Исследовать кинетику оплавления гранул в процессе твердожидкого литья.

Построить графики изменения диаметра сферических гранул во времени – графики зависимости $D(t)$ – в технологическом процессе тиксокомпактирования для различных параметров процесса.

Варьируемые параметры процесса: диаметры исходных гранул, загруженных в литейную форму, лежащие в диапазоне от $D_{\min} = 0,2$ мм до $D_{\max} = 3,5$ мм; скорость плавления гранул v , изменяющаяся в пределах от 0,1 до 1,0 мм/с. Конкретные значения $D_{\min}$, $D_{\max}$, v , используемые для построения каждого графика, задаются в соответствии с ИНС.

Выполнить сравнительный анализ построенных графиков зависимости $D(t)$ для различных параметров процесса. Определить длительность процесса t_m , соответствующую полному расплавлению всех мелких гранул, и длительность процесса $t_{кр}$, соответствующую полному расплавлению всех крупных гранул. Оценить границы временного интервала процесса $t_{ПР}^{\min}$ и $t_{ПР}^{\max}$, в рамках которых возможно достижение значительной объемной доли слитка, характеризующейся наличием структуры исходных гранул.

Задание 2. Исследовать кинетику формирования пористой структуры слитка в процессе твердожидкого литья.

Построить графики изменения пористости слитка во времени – графики зависимости $P(t)$ – в технологическом процессе тиксокомпактирования для различных параметров процесса.

Варьируемые параметры процесса: диаметр исходных гранул D_0 , исходный насыпной объем гранул в литейной форме V_H , коэффициент упаковки исходных частиц в литейной форме k , линейная скорость плавления частиц v . Конкретные значения D_0 , V_H , k , v , используемые для построения каждого графика, задаются в соответствии с ИНС.

Выполнить сравнительный анализ графиков зависимости $P(t)$ для различных параметров процесса. Определить длительность процесса t_{P_k} , необходимую для получения слитка с требуемой конечной пористостью $P_k = 25; 15; 5$ %, а также для получения беспористого слитка ($P_k = 0$).

Построить в одной и той же координатной сетке графики изменения объема твердой фазы, объема жидкой фазы и объема слитка

во времени – графики зависимостей $V_{\text{тв}}(t)$, $V_{\text{ж}}(t)$ и $V_{\text{сл}}(t)$ – в технологическом процессе тиксокомпактирования для различных параметров процесса в соответствии с ИНС и выполнить сравнительный анализ графиков этих зависимостей.

Задание 3. Исследовать закономерности процесса твердожидкого литья.

Просмотреть видеофильм модельного процесса тиксокомпактирования сферических гранул (двойной щелчок по кнопке «processSSM-T»). По приведенным фотографиям с помощью масштабной линейки определить диаметр заданной гранулы в различные моменты процесса тиксокомпактирования (номер исследуемой гранулы задается в соответствии с ИНС) и построить график временной зависимости диаметра гранулы. Проанализировать график и сделать вывод о характере изменения диаметра гранулы во времени. Аналогично, по приведенным фотографиям с помощью масштабной линейки, определить расстояние между центрами заданной гранулы и одной из соседних гранул в различные моменты процесса тиксокомпактирования и построить график временной зависимости расстояния между центрами соседних гранул. Проанализировать график и сделать вывод о характере изменения расстояния между центрами соседних гранул во времени.

По результатам просмотра видеофильма сделать вывод об основных кинетических закономерностях процесса тиксокомпактирования, включая стадии плавления и перегруппировки гранул, миграции и затвердевания расплава.

Пояснения к выполнению заданий

Задание 1. При моделировании процесса тиксокомпактирования в соответствии с заданием 1 используется линейная модель плавления сферической гранулы, согласно которой фронт плавления продвигается с поверхности вглубь гранулы с некоторой постоянной скоростью v . Радиус гранулы изменяется во времени по закону

$$R(t) = R_0 - vt, \quad (1)$$

где R_0 – начальный радиус гранулы;

$R(t)$ – радиус гранулы в момент времени t ($R(t = 0) = R_0$).

Соответственно, диаметр гранулы изменяется во времени по закону

$$D(t) = D_0 - 2vt, \quad (2)$$

где D_0 – начальный диаметр гранулы;

$D(t)$ – диаметр гранулы в момент времени t ($D(t = 0) = D_0$) (рис. 4).

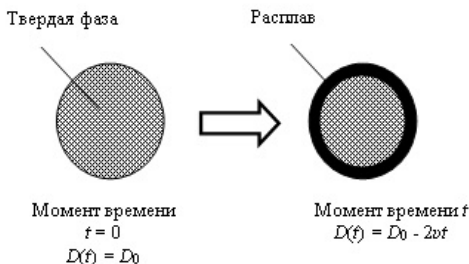


Рис. 4. Поверхностное плавление сферической гранулы

В рамках рассмотренной модели построение графиков изменения диаметра гранул в соответствии с заданием 1 производится по формуле (2).

Задание 2. При моделировании процесса тиксокомпактирования в соответствии с заданием 2 предполагается, что в литейную форму загружаются исходные сферические гранулы с одинаковым для всех диаметром D_0 . Исходный объем твердой фазы:

$$V_{TB}(t = 0) = V_0 N = V_H k, \quad (3)$$

где V_0 – объем одной исходной гранулы;

N – число гранул;

V_H – насыпной объем исходных гранул в литейной форме;

k – коэффициент упаковки исходных гранул в литейной форме.

Значение V_0 определяется по формуле

$$V_0 = \frac{\pi}{6} D_0^3. \quad (4)$$

Значение N определяется по формуле

$$N = \frac{V_{TB}(t = 0)}{V_0} = \frac{V_H k}{V_0} = \frac{6V_H k}{\pi D_0^3}. \quad (5)$$

При оплавлении гранул их диаметр $D(t)$ изменяется во времени согласно формуле (2). Соответственно изменяется во времени и объем нерасплавившихся ядер гранул $V(t)$ ($V(t = 0) = V_0$), умножая который на число гранул N , получаем закон изменения объема твердой фазы во времени:

$$V_{TB}(t) = V_0(t)N = \frac{\pi}{6} D^3(t)N = \frac{V_H k}{D_0^3} (D_0 - 2vt)^3 = V_H k \left(1 - \frac{2vt}{D_0}\right)^3. \quad (6)$$

Объем жидкой фазы (расплава) в момент времени t находится как разница исходного объема твердой фазы $V_{TB}(t = 0)$ (3) и объема твердой фазы $V_{TB}(t)$ (6) в момент времени t :

$$V_{Ж}(t) = V_{TB}(t = 0) - V_{TB}(t) = V_H k \left[1 - \left(1 - \frac{2vt}{D_0}\right)^3\right]. \quad (7)$$

Объем пор в слитке $V_{ПОР}(t)$ в момент времени t находится как разница объема слитка $V_{СЛ}(t)$ в момент времени t и исходного объема твердой фазы $V_{TB}(t = 0)$ (3):

$$V_{ПОР}(t) = V_{СЛ}(t) - V_{TB}(t = 0) = V_{СЛ}(t) - V_H k. \quad (8)$$

Соответственно, закон изменения пористости слитка во времени имеет вид

$$P(t) = \frac{V_{ПОР}(t)}{V_{СЛ}(t)} 100 \% = 1 - \frac{V_H k}{V_{СЛ}(t)} 100 \%. \quad (9)$$

Характер изменения объема слитка во времени зависит от реологических свойств расплава (вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения, смачивание материала формы) и конструктивных особенностей литейной оснастки (конфигурация литейной формы и поршня, величины зазора между литейной формой и поршнем, величина нагрузки на поршень).

Так как получить точное аналитическое выражение зависимости $V_{СЛ}(t)$ довольно сложно, то для моделирования процесса тиксокомпактирования использованы экспериментальные данные, полученные следующим образом. С помощью видеокамеры осуществлялась запись процесса тиксокомпактирования (см. пояснения

к выполнению задания 3), затем полученный видеоряд разбивался на фотографии, соответствующие определенным моментам времени. По полученным фотографиям определялся объем слитка в данный момент времени с учетом положения поршня в форме:

$$V_{\text{сл}}(t) = S \cdot h(t), \quad (10)$$

где S – площадь основания литейной формы;

$h(t)$ – расстояние от нижней поверхности поршня до дна литейной формы, соответствующее высоте слитка.

При анализе закономерностей формирования пористой структуры слитка необходимо учитывать, что, ввиду значительной вязкости расплава, поры могут присутствовать в слитке даже в том случае, когда объема жидкой фазы (расплава) достаточно для заполнения этих пор, так как часть расплава обычно выдавливается поршнем из литейной формы через зазор между литейной формой и поршнем.

Задание 3. При моделировании процесса тиксокомпактирования в соответствии с заданием 3 использовалась видеозапись процесса, реализованного в ходе модельных экспериментов, проводившихся на примере сплава Вуда (50,0 % Bi, 25,0 % Pb, 12,5 % Sn, 12,5 % Cd), имеющего температуру плавления $T_{\text{пл}} = 68^\circ\text{C}$. Экспериментальная установка содержала вертикально расположенную прозрачную кювету с плоскопараллельными стенками, которая размещалась в термостате, представляющем собой прозрачный сосуд, также с плоскопараллельными стенками, заполненный термостатной жидкостью (водой). В кювету, игравшую роль литейной формы, загружали гранулы исходного материала и подвергали их компактированию с помощью поршня, который входил в кювету сверху и оказывал на гранулы давление силой F . Одновременно гранулы подвергали нагреву, вызывая их поверхностное оплавление.

В результате гранулы уменьшались в диаметре, их нерасплавившиеся ядра перегруппировывались, а образовавшийся расплав заполнял пространство между ними. Излишки расплава выдавливались за пределы пространства, занятого формируемым слитком, через зазоры между кюветой и поршнем. После завершения процесса плавления-компактирования материал охлаждали, в результате чего расплав кристаллизовался, и ядра гранул связывались образующимися кристаллическими прослойками.

В ходе экспериментов посредством цифровой видеокамеры, сопряженной с компьютером, осуществляли видеозапись эволюции структуры исходного материала, включая переход материала в твердожидкое состояние (поверхностное плавление и перегруппировку частиц) и его дальнейшее затвердевание (кристаллизацию расплава) с последующей обработкой параметров процессов при покадровой развертке видеозаписи.

Используя данную методику, можно определять временные зависимости изменения диаметра гранул $D(t)$, расстояния между гранулами $L(t)$ и пористости трансформируемой структуры $P(t)$, а также усадку материала к концу процесса тиксокомпактирования.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о технологии твердожидкого литья.
3. Результаты моделирования, оформленные в соответствии с требованиями к выполнению заданий.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

Вопросы для контроля усвоенных знаний представлены в электронном приложении к методическим указаниям работы. Для ответа на вопросы в основном окне программы следует выбрать закладку «Коллоквиум» (см. раздел 3. Порядок выполнения работы).

2. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы – практическое освоение методик анализа микроструктуры порошковых материалов; изучение структурных особенностей порошковых материалов.

Студент должен знать: методики анализа микроструктуры порошковых материалов; структурные особенности порошковых материалов.

Студент должен уметь: анализировать микроструктуру порошковых материалов.

Основные сведения [2–6]

Свойства порошковых материалов зависят от их микроструктуры, которая исследуется при больших увеличениях с помощью микроскопа.

Микроструктура порошковых материалов зависит от условий их получения. В частности, она имеет ряд отличительных особенностей, обусловленных процессом спекания.

При спекании порошковых материалов происходит удаление газов, адсорбированных на поверхности частиц, возгонка различных примесей, снятие остаточных напряжений на контактных участках между частицами и в самих частицах, восстановление оксидных пленок, перестройка поверхностного слоя в результате диффузии и переноса металла с одних мест в другие, рекристаллизация и т. д. Важными процессами при спекании являются качественные и количественные изменения межчастичных контактов и границ. Межчастичные границы резко отличаются от межзеренных границ по составу и строению, они значительно шире, насыщены порами и являются скоплениями различного рода дефектов структуры, примесных атомов, оксидов, силикатов и т. п., а соседние частицы, разделенные этими границами, характеризуются значительной кристаллографической разориентировкой. Если в начале спекания межчастичные границы имеют большую протяженность и контакт между частицами в основном представляется в виде оксидных пленок, то с развитием спекания межчастичный контакт из оксидного превращается в металлический, и за счет срачивания частиц

происходит его рост, а также изменение соотношения между порами и объемом металла в сторону уменьшения объема пор.

Процесс спекания порошковых материалов состоит из трех основных стадий:

1) взаимное припекание частиц, сопровождающееся увеличением площади контакта между частицами и стягиванием их между собой; на этой стадии частицы сохраняют свою структурную индивидуальность, а их межчастичные границы практически сохраняют исходное состояние;

2) образование единого пористого тела, представляющего собой совокупность беспорядочно перемежающихся участков металла и пор; поры на этой стадии спекания в основном сообщаются между собой, а межчастичные исходные границы изменяют свою форму по отношению к состоянию после прессования;

3) уплотнение объема металла за счет уменьшения общей пористости и образования изолированных пор.

Повышение температуры в начале спекания до $0,35...0,40 T_{пл}$ приводит к рекристаллизации внутри отдельных частиц порошка. При этом границы частиц сохраняются и структура представляет собой конгломерат поверхностно-деформированных хорошо различимых частиц, разделенных между собой границами и порами. Нагрев до более высоких температур – $0,4...0,5 T_{пл}$ – сопровождается межчастичной собирательной рекристаллизацией, при которой отдельные частицы растут за счет уменьшения других. Межчастичная рекристаллизация начинается после восстановления оксидов на поверхности частиц и образования металлической связи между ними. Развитие межчастичной рекристаллизации в высокотемпературной области приводит к исчезновению границ между частицами, и межзеренные границы оказываются расположенными произвольно и не связаны с начальным расположением границ между исходными частицами порошка.

На последней стадии спекания наблюдается интенсивный рост контактов между частицами и их качественное изменение, связанное с образованием металлических связей между частицами, которые, в зависимости от условий спекания и природы металла, проявляются в образовании «мостиков» между частицами либо сплошных контактов с металлической связью. Образование металлической связи

способствует усадке, собирательной межчастичной рекристаллизации и слиянию отдельных частиц в единое тело.

Микроструктура порошковых металлов и сплавов исследуется методами металлографии, которая подразделяется на качественную и количественную. В качественной металлографии оцениваются главным образом чисто качественные характеристики микроструктуры. Например, форма микрочастиц цементита в перлите определяется как зернистая или пластинчатая. Количественная металлография занимается изучением количественных характеристик микроструктуры, например, подсчетом и измерением структурных элементов (зерен, включений и др.), определением объемных долей различных фаз в структуре материала.

Микроструктуру порошковых материалов изучают под микроскопом на специально приготовленных микрошлифах – образцах материалов с плоской полированной поверхностью, подвергаемой травлению для выявления особенностей микроструктуры.

Для приготовления микрошлифов чаще всего используется химическое травление. При этом поверхность шлифа подвергают воздействию специального реактива (обычно слабого раствора кислоты или щелочи). В результате травления выявляются особенности химического и фазового состава и кристаллического строения – границы зерен, различные фазы, неметаллические включения, поверхностные слои, поры, трещины и др. В процессе травления на поверхности шлифа происходит растворение одних фаз, окисление и окрашивание других. Как следствие, на шлифе под микроскопом можно увидеть очертания различных фаз, определить их взаимное расположение: по цвету, форме и размерам определить их характерные особенности.

Для выявления структуры в металлографии также используются электролитическое травление, тепловое травление, травление в расплавленных солях и другие способы.

К прямым методам исследования структуры материалов относятся оптическая и электронная микроскопия, рентгеновский анализ и др.

Оптической микроскопией можно исследовать и фотографировать детали микроструктуры, размеры которых не превышают 0,4...0,6 мкм. Полученное изображение можно увеличивать, однако новые детали структуры при этом не выявляются. Для того чтобы более глубоко изучить структурные особенности, в частности,

выявить границы зерен, блочное строение, дислокационную структуру, применяют электронную микроскопию. Применение рентгеноструктурного анализа позволяет определить степень совершенства кристаллов, их ориентировку, наличие структурных изменений.

Типичными структурными составляющими порошковых материалов являются металлические фазы, образующие основу материала и неметаллические включения (например, графит, оксиды, карбиды, нитриды и др.). В частности, металлическая основа порошковых сталей, как и литых сталей, – ферритная, феррито-перлитная или перлитно-цементитная, согласно диаграмме Fe–Fe₃C.

Изделия из порошковых материалов отличаются от изделий из литых материалов, прежде всего, наличием пор. Именно пористость в сочетании с особенностями контакта металлических частиц между собой определяет специфические свойства порошковых материалов.

Пористость может рассматриваться как совокупность сообщающихся протяженных пор – каналов, которые могут быть тупиковыми, изолированными, а также выходить на поверхность и сообщаться между собой.

Для определения формы пор и их распределения готовят шлифы по различным направлениям по отношению направления прессования и изучают пористость на непротравленных или слегка протравленных микрошлифах.

Так, при травлении железографитовых сплавов 4%-ным раствором азотной кислоты в спирте выявляются цементитные и ферритные составляющие. Перлит окрашивается в коричневый цвет, феррит остается светлым. Для выявления цементита проводят травление пикратом натрия. При травлении образец часто просто погружают в травитель, однако, если материал пористый, травитель проникает в поры и трудно из них вымывается, что приводит к коррозии шлифа. Распределение пористости и включений рекомендуется исследовать при 150...200-кратном увеличении. При исследовании пористых материалов на микрошлифах порою трудно отличить поры от включений графита. В этом случае следует обращать внимание на разность очертания границ: границы пор очерчены более четко, в то время как включения графита не имеют резких очертаний. Поры легко отличить от включений графита при

изменении фокусировки микроскопа, так как при приближении к окуляру выявляется дно поры.

Микроструктура порошковых материалов в значительной мере определяется структурными особенностями частиц исходных порошков, в частности, формой частиц и рельефом их поверхности. Указанные параметры частиц существенно влияют на технологические свойства порошков (удельную поверхность, насыпную плотность, текучесть, прессуемость и формуемость) и, соответственно, на плотность, однородность и прочность порошковых заготовок. Например, наибольшей прочностью обладают заготовки из порошковых частиц дендритной формы, так как в этом случае наряду с силами сцепления, возникающими между ними в процессе прессования, действуют и чисто механические силы, обусловленные заклиниванием частиц, переплетением выступов и ответвлений. Шероховатость поверхности частиц из-за большой поверхности увеличивает у них запас избыточной энергии, что в последующем ускоряет формирование свойств порошковых изделий при спекании.

Свойства порошков, в частности, форма частиц, зависят от способа получения порошков. Разнообразие форм частиц достаточно велико, поэтому принято выделять несколько основных типов: сферическая, губчатая, дендритная, осколочная, тарельчатая, каплевидная (или округлая). Первичная форма частиц может видоизменяться (иногда довольно существенно) при последующей обработке порошка (размол, отжиг, грануляция и др.). В процессе получения и обработки порошков может происходить агрегирование частиц (объединение их в конгломераты).

Методические указания

Для выполнения работы студентам предоставляются следующие необходимые материалы, оборудование и принадлежности: установка для компьютерной микроскопии на базе микроскопа МИМ-8; набор микрошлифов порошковых материалов; комплект измерительных накладных сеток; набор фотоизображений микроструктуры порошковых материалов.

В работе требуется:

– выполнить качественный анализ микроструктуры порошковых материалов на образцах микрошлифов с использованием техники компьютерной микроскопии;

– выполнить количественный анализ микроструктуры порошковых материалов, представленной на микрофотографиях, с использованием техники измерительных накладных сеток.

При проведении качественного анализа микроструктуры с использованием техники компьютерной микроскопии следует руководствоваться инструкцией по эксплуатации установки для компьютерной микроскопии. При исследовании микрошлифов необходимо обращать внимание на относительные размеры, форму, рельеф поверхности и взаимное расположение частиц порошка, характер контактов между ними, на наличие пор и неметаллических включений (графита, оксидов, карбидов и др.).

Анализ микроструктуры порошковых материалов проводится на заранее приготовленных микрошлифах, выдаваемых преподавателем.

По результатам проведенных исследований следует зарисовать схемы анализируемых микроструктур и описать их качественные характеристики.

При проведении количественного анализа микроструктуры с использованием техники измерительных накладных сеток непосредственными объектами исследования являются не микрошлифы, а фотографические микроизображения структуры, на которые накладывается измерительная сетка.

Техника измерительных накладных сеток позволяет определять такие количественные характеристики структуры, как средний размер и объемное содержание отдельных структурных элементов.

Для определения среднего размера структурных элементов определенного вида сначала выделяется совокупность из N анализируемых элементов в плоскости всего микроизображения (или его отдельного участка).

Затем подсчитываются числа $n_{1(1)}$ и $n_{1(2)}$ делений сетки, охватывающих какой-либо один анализируемый элемент в двух взаимно перпендикулярных направлениях, характерных для данного элемента с учетом особенностей его конфигурации, после чего определяется среднее значение этих чисел:

$$n_1 = (n_{1(1)} + n_{1(2)}) / 2.$$

Аналогичным образом определяются средние значения n_2 , n_3 , ..., n_N для других анализируемых элементов.

Средний размер L всех анализируемых элементов определяется по формуле

$$L = nl / M,$$

где $n = (n_1 + n_2 + \dots + n_N) / N$;

l – цена деления сетки;

M – масштаб микроизображения (отношение размера изображения к размеру изображаемого объекта).

Для определения объемного содержания структурных элементов определенного вида сначала выделяется совокупность из N анализируемых элементов в плоскости всего микроизображения (или его отдельного участка).

Затем подсчитываются числа $k_1, k_2, \dots, k_N$ клеток сетки, охватывающих каждый из анализируемых элементов, после чего определяется суммарное значение этих чисел:

$$k = k_1 + k_2 + \dots + k_N.$$

Далее подсчитывается число K клеток сетки, охватывающих поле всего микроизображения (или его отдельного участка).

Объемное содержание γ всех анализируемых элементов определяется по формуле

$$\gamma = k / K.$$

По результатам проведенных исследований следует описать порядок определения количественных характеристик макроструктуры с указанием их численных значений.

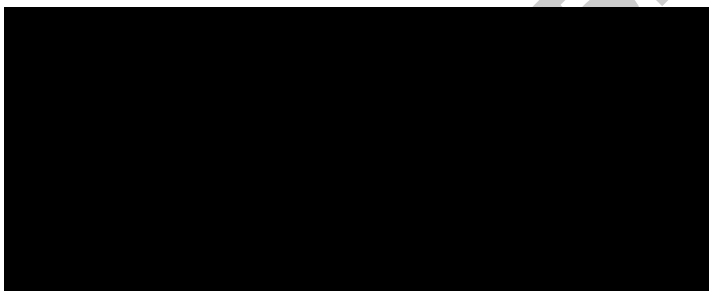
Количественный анализ микроструктуры порошковых материалов выполняется в соответствии с предлагаемыми преподавателем индивидуальными заданиями (с учетом особенностей микроструктур, представленных на фотографиях). Типичными структурными параметрами, численные значения которых подлежат определению, являются: средний размер частиц в исходном порошке или в порошковом материале, средний размер внутричастичных или межчастичных пор, распределение частиц или пор по размерам, пористость, содержание структурных фаз или включений и т. д.

**Пример индивидуального задания
по анализу микроструктуры порошковых материалов**

На фотографиях представлены микроструктуры порошкового железа, спеченного при значениях температуры, равных 800 °С (а) и 1250 °С (б) ($\times 200$).

Требуется на основе анализа микроизображений определить средний размер пор и пористость порошкового железа, спеченного при разных температурах, с использованием техники измерительных накладных сеток.

По результатам проведенных исследований следует описать порядок определения параметров микроструктуры с указанием их численных значений.



а

б

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить основные положения работы.
3. Выполнить качественный анализ микроструктуры порошковых материалов.
4. Выполнить количественный анализ микроструктуры порошковых материалов.
5. Проанализировать полученные результаты.
6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о структурных особенностях порошковых материалов.

3. Схематическое изображение микроструктуры порошковых материалов, анализируемой с использованием техники компьютерной микроскопии, и краткое описание качественных характеристик микроструктуры.

4. Краткое описание порядка определения параметров микроструктуры порошковых материалов, анализируемой с использованием техники измерительных накладных сеток, с указанием полученных численных значений параметров.

5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое микроструктура?

2. Назовите характерные черты микроструктуры порошковых материалов, обусловленные процессом спекания порошков.

3. Назовите основные стадии процесса спекания порошковых материалов.

4. Какие разновидности методов исследования структуры порошковых материалов вы знаете?

5. В чем состоят различия качественной и количественной металлографии?

6. В каком порядке осуществляется приготовление микрошлифов порошковых материалов?

7. Назовите типичные структурные составляющие порошковых материалов.

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ

Цель работы – изучение особенностей изготовления изделий из порошковых композиционных материалов путем селективного лазерного спекания; приобретение практических навыков компьютерного моделирования технологических процессов.

Студент должен знать: особенности реализации процессов селективного лазерного спекания; основы компьютерного моделирования технологических процессов.

Студент должен уметь: анализировать характер протекания процессов селективного лазерного спекания при различных режимах и осуществлять выбор оптимальных режимов процессов методами компьютерного моделирования.

Основные сведения [5, 6]

Технология *селективного лазерного спекания* (*Selective Laser Sintering – SLS*) является одной из разновидностей технологий быстрого прототипирования (*Rapid Prototyping – RP*). RP-технологии имеют большую производительность и производственную гибкость, высокий уровень автоматизации и компьютеризации. Они существенно сокращают время натурного моделирования и подготовки производства новых видов изделий, позволяют производить как модели изделий, так и сами изделия с различным функциональным назначением. Форма этих изделий может иметь такую степень сложности, которую трудно, а порой и невозможно обеспечить традиционными методами формообразования. RP-технологии дают наибольший экономический эффект в условиях индивидуального и мелкосерийного производства.

Основные особенности RP-технологий сводятся к следующему. Сначала в компьютере создается геометрическая модель изделия, там же она послойно рассекается системой параллельных плоскостей. Далее эта модель воспроизводится в натуре путем последовательного формирования слоев из определенных материалов. Толщина формируемых слоев равна толщине слоев, на которые

рассечена геометрическая модель, а их конфигурация соответствует конфигурации слоев геометрической модели. Во время формирования (или после него) эти слои соединяются между собой. В результате получается монолитное изделие заданной формы.

SLS-технология обеспечивает послойное формирование изделий из порошковых материалов путем селективного спекания лучом лазера последовательно наносимых друг на друга порошковых слоев с одновременным припеканием друг к другу их спеченных участков.

Для получения SLS-изделий используются как однокомпонентные, так и двух-, и многокомпонентные порошки. Обычно в качестве однокомпонентных порошков применяются порошки различных металлов или сплавов. В качестве двух- и многокомпонентных порошков используются композиции (смеси) порошков на основе металлов, керамики или стекла со связкой из термопластичных полимеров. Кроме того, в качестве связки применяются легкоплавкие металлы.

Типичная SLS-установка, схематично показанная на рис. 1, работает следующим образом. На рабочую платформу, снабженную ограничительными стенками, последовательно наносятся слои порошка определенной толщины. Каждый слой наносится с помощью бункера со щелевым отверстием, который перемещается над поверхностью платформы (над поверхностью ранее нанесенного слоя). Каждый слой селективно спекается под действием лазерного луча, перемещающегося относительно неподвижной платформы по заданной траектории в соответствии с контурами слоев геометрической модели. Перед нанесением очередного слоя платформа опускается на расстояние, равное толщине слоя. Под действием лазерного излучения спекаемые участки слоев припекаются друг к другу. В результате формируется многослойное спеченное изделие требуемой формы, которое легко отделяется от оставшегося порошка, не подвергавшегося спеканию.

К числу основных факторов, которые следует учитывать при разработке SLS-технологии, относятся:

- 1) поглощательная способность порошков, влияющая на энергетические параметры SLS-процесса;
- 2) кинетические закономерности лазерного спекания порошков, влияющие на производительность процесса изготовления SLS-изделий;
- 3) геометрические характеристики качества поверхности SLS-изделий.

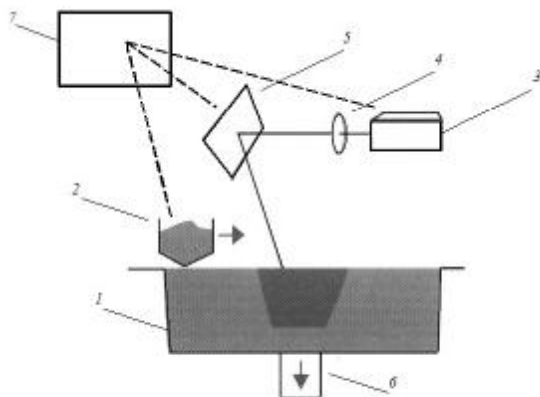


Рис. 1. Схема SLS-установки:

- 1 – платформа для формирования изделия; 2 – устройство послойной подачи порошка; 3 – лазер; 4 – оптическая система (фокусирующие линзы); 5 – устройство перемещения лазерного луча относительно платформы; 6 – устройство вертикального перемещения платформы; 7 – управляющая система

Поглощательная способность (коэффициент поглощения) A порошка зависит от длины волны лазерного излучения λ , химического состава материала, геометрических характеристик поверхности, химического состава окружающей среды и почти не зависит от гранулометрического состава порошка: как правило, разница в значениях A для порошков с различной зернистостью не превышает погрешности измерений (10 %).

Обычно компоненты порошковых смесей имеют различные значения A . Экспериментально установлено, что независимо от длины волны λ значения A двухкомпонентной порошковой смеси могут быть описаны с точностью до 10 % с помощью формулы

$$A = A_1\gamma_1 + A_2\gamma_2, \quad (1)$$

где A_1 и A_2 – поглощательные способности компонентов;

γ_1 и γ_2 – объемные доли компонентов.

Чем больше поглощательная способность порошка, тем меньше энергетические затраты, необходимые для его лазерного спекания.

Кинетические закономерности лазерного спекания порошков проявляются в особенностях развития процесса образования контактов между спекаемыми частицами. В случае однокомпонентных порошков этот процесс имеет следующие стадии: поверхностное плавление частиц при нагреве; миграция (растекание) поверхностных слоев расплава, которые, сливаясь в приконтактной области, образуют жидкие межчастичные манжеты; затвердевание расплава при охлаждении, завершающееся формированием твердых межчастичных перешейков. Обычно образование расплава и его миграция идут параллельно и сопровождаются взаимным сближением частиц. В случае двух- и многокомпонентных порошков на начальных стадиях этого процесса связующий компонент полностью расплавляется, а образовавшийся расплав, растекаясь и смачивая твердые частицы основного компонента, образует жидкие межчастичные манжеты; затем расплав, охлаждаясь, затвердевает.

Процесс изготовления SLS-изделия в общем случае состоит из трех основных этапов: подготовка данных для исполнительного механизма (время $T_{\text{ПД}}$); синтез (спекание) изделия (время $T_{\text{С}}$); дополнительная обработка готового изделия (время $T_{\text{ДО}}$).

Соответственно, общее время изготовления SLS-изделия

$$T_{\Sigma} = T_{\text{ПД}} + T_{\text{С}} + T_{\text{ДО}}. \quad (2)$$

Производительность процесса изготовления SLS-изделия (количество SLS-изделий, изготавливаемых в единицу времени)

$$Q = \frac{1}{T_{\Sigma}} = \frac{1}{T_{\text{ПД}} + T_{\text{С}} + T_{\text{ДО}}}. \quad (3)$$

Наиболее длительный этап изготовления SLS-изделия – синтез изделия, поэтому именно он оказывает наибольшее влияние на производительность. Если $T_{\text{С}} \gg T_{\text{ПД}}$ и $T_{\text{С}} \gg T_{\text{ДО}}$, то $T_{\Sigma} \approx T_{\text{С}}$, и, соответственно,

$$Q = \frac{1}{T_{\Sigma}} \approx \frac{1}{T_{\text{С}}}. \quad (4)$$

Время работы SLS-установки по синтезу изделия

$$T_C = \sum_{i=1}^n (t_{pi} + t_{xi}), \quad (5)$$

где t_{pi} и t_{xi} – время рабочих и холостых ходов, соответственно, при изготовлении единичного слоя;

n – число слоев.

С учетом выражения (5) формула для производительности процесса изготовления SLS-изделия (3) может быть представлена в виде

$$Q = \frac{1}{T_{\Sigma}} = \frac{1}{T_{\text{ПД}} + \sum_{i=1}^n (t_{pi} + t_{xi}) + T_{\text{ДО}}}. \quad (6)$$

Синтез SLS-изделия состоит из циклически повторяющихся стадий: нанесение слоя исходного порошка – непосредственное получение слоя изделия – возвращение рабочего органа в исходное положение – перемещение изделия (на необходимую величину, равную толщине слоя) для нанесения последующего слоя. Время синтеза T_C можно сократить за счет увеличения толщины слоя порошка, скорости сканирования или скорости холостых ходов. Возможности повышения производительности за счет увеличения скорости сканирования, а также скорости холостых ходов ограничены. Это связано с тем, что скорость перемещения рабочих органов современных SLS-установок достигает физически рационального предела, и ее чрезмерное увеличение влечет за собой потерю стабильности работы установок. Таким образом, для повышения производительности необходимо стремиться, прежде всего, к сокращению числа слоев, что возможно за счет увеличения толщины единичного слоя.

В методе разбиения модели на слои постоянной толщины, показанном на рис. 2, а, увеличение толщины слоев, приводя к уменьшению времени синтеза изделия, одновременно приводит к уменьшению точности воспроизведения модели. Сократить время синтеза изделия при сохранении сравнительно высокой точности воспроизведения модели позволяют методы разбиения модели на слои, показанные на рис. 2, б, в. В методе, показанном на рис. 2, б, модель

сечется с постоянной толщиной слоя, но особым образом: толщина слоя равна или меньше величины допуска, а образующая профиля проходит через среднюю линию сечений. Недостатком этого метода является появление отклонения от номинального профиля. Указанного недостатка лишен метод, показанный на рис. 2, в, в котором модель разбивается на слои с переменной толщиной.

Номинальный профиль поверхности

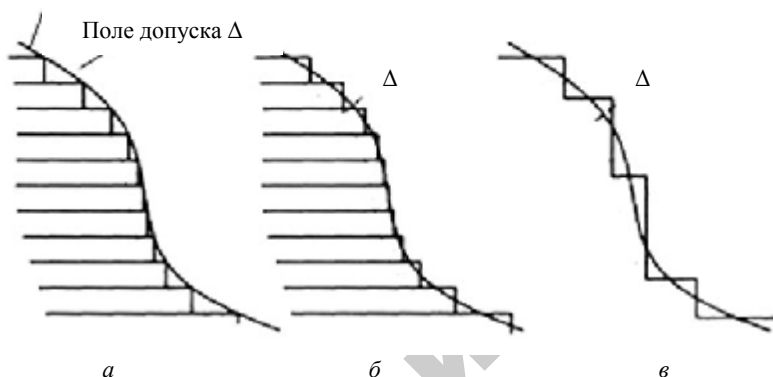


Рис. 2. Методы разбиения SLS-модели на слои

С учетом технологических режимов обработки формулу (6) для расчета производительности SLS-процесса можно представить в виде

$$Q \approx \frac{1}{T_{\text{ПД}} + \left(\frac{4\Phi\sqrt{1-P^2}}{\pi dHV} \right) + \sum_{i=1}^n t_{xi} + T_{\text{ДО}}}, \quad (7)$$

где Φ – объем модели, см^3 ;

d – диаметр лазерного пятна, см ;

V – скорость сканирования, см/мин ;

P – коэффициент технологичности формы модели.

При получении SLS-изделий необходимо обеспечить требуемое качество их поверхности. Эксперименты по получению SLS-изделий показывают, что разные участки поверхности (боковая стенка или граница слоев) изделий могут иметь различный рельеф (ступенчатый или волнообразный) – в зависимости от условий

спекания (рис. 3). Кроме того, независимо от рельефа, для всей поверхности изделий характерна шероховатость.

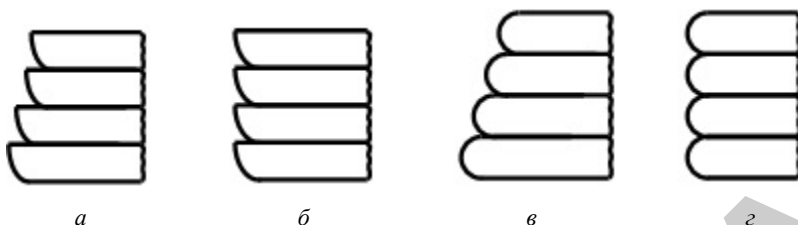


Рис. 3. Разновидности форм рельефа SLS-изделий:
а, в – ступенчатый рельеф; *б, г* – волнообразный рельеф;
а, б – на боковой стенке; *в, г* – на границе слоев

Ступенчатый и волнообразный рельефы на боковой стенке могут быть сглажены уменьшением толщины H слоев, формирующих изделие. В свою очередь, ступенчатый и волнообразный рельефы на границе слоев могут быть сглажены уменьшением ширины L полос спекания, формирующих слои и создаваемых построчно перемещающимся лазерным лучом, либо увеличением ширины l зон взаимного перекрытия полос спекания. Кроме того, ступенчатый и волнообразный рельефы на границе слоев могут быть практически полностью исключены при контурном перемещении луча.

Шероховатость поверхности изделия уменьшается с уменьшением размеров частиц порошка.

Методические указания

Для выполнения работы студентам предоставляются персональные компьютеры с установленной операционной системой MS Windows XP и офисным пакетом MS Office XP, включающим текстовый редактор MS Word и табличный редактор MS Excel. Компьютерная программа лабораторной работы выполнена в среде программирования Borland Delphi 7. Программный модуль работы представляет собой каталог SSM, включающий в себя следующие файлы:

- Основные положения.doc – файл MS Word. Во избежание модификации или повреждения данного файла он защищен паролем на изменение и открывается в ходе выполнения работы в режиме «только для чтения».

- Colok.dll и каталог data – служебные файлы проведения коллоквиума для осуществления контроля знаний студентов перед выполнением работы.

- Выполнение.xls – файл, предназначенный для выполнения расчетов в соответствии с индивидуальным заданием, содержит три рабочих листа для выполнения заданий. Во избежание модификации или повреждения данного файла он защищен паролем на изменение и открывается в ходе выполнения работы в режиме «только для чтения».

- Project11.exe – файл-оболочка, скомпилированный в среде Borland Delphi 7, предназначенный для запуска и выполнения работы.

Требования к конфигурации компьютера определяются требованиями офисных программ MS Excel и MS Word, запускаемых скомпилированной программой-оболочкой. Рекомендуемые параметры конфигурации персонального компьютера:

- 2,21 МБ свободного пространства на жестком диске для размещения необходимых файлов;

- не менее 256 МБ оперативной памяти;

- операционная система MS Windows XP и офисные программы MS Word и MS Excel, версии 2003 или выше для совместимости форматов.

Для выполнения работы следует руководствоваться компьютерной программой работы, представленной в электронном приложении к методическим указаниям.

Порядок выполнения работы

Схема выполнения работы представляется следующими шагами:

1. **Запуск программы** (запуск на выполнение скомпилированного файла-оболочки Project11.exe). После запуска появляется окно с содержанием работы (рис. 4).

2. **Ознакомление с основными положениями технологии лазерного спекания.** После нажатия активной кнопки «Основные положения» открывается документ Основные положения.doc – файл MS Word (только чтение), в котором приведены основные сведения о технологии лазерного спекания, необходимые для выполнения работы.

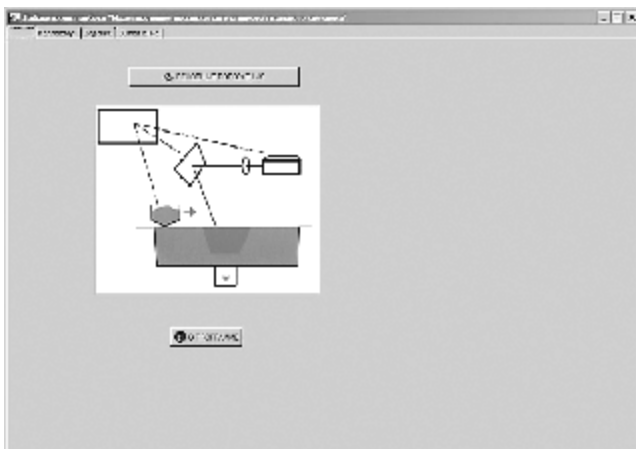


Рис. 4. Диалоговое окно при запуске программы

3. Коллоквиум. Для контроля усвоенных знаний необходимо ответить на вопросы коллоквиума. Для этого в основном окне программы необходимо выбрать закладку «Коллоквиум» (рис. 5) и ответить на 10 вопросов по теме выполняемой работы.

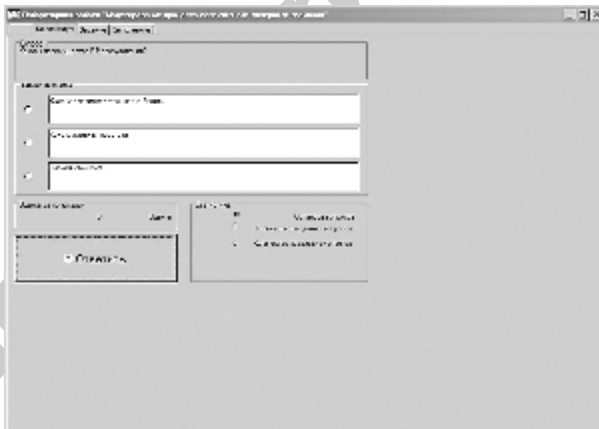


Рис. 5. Диалоговое окно при запуске закладки «Коллоквиум»

Вопросы выбираются программой в случайном порядке из общего списка 20 вопросов базы данных. Для ответа на вопрос необходимо установить флажок напротив правильного варианта

и нажать на кнопку «Ответить». Правильным ответом считается наиболее точный и полный из предложенных вариантов в соответствии с основными сведениями о технологии лазерного спекания, изложенными в документе «Основные положения». По ходу выполнения задания в рабочем окне приводится статистика: количество заданных и оставшихся вопросов и количество правильных ответов. При завершении коллоквиума студент получает оценку знаний и может приступить к выполнению работы, если эта оценка не ниже 4 (применяется 5-балльная система). При получении оценки ниже 4 баллов возможна следующая попытка ответить на вопросы, сочетание которых каждый раз произвольно меняется программой.

4. Выполнение работы. Для начала выполнения работы необходимо в окне программы перейти на закладку «Выполнение» и нажать на кнопку «Запуск программы Excel». При этом вызывается программа Excel и открывается файл Выполнение.xls (рис. 6).

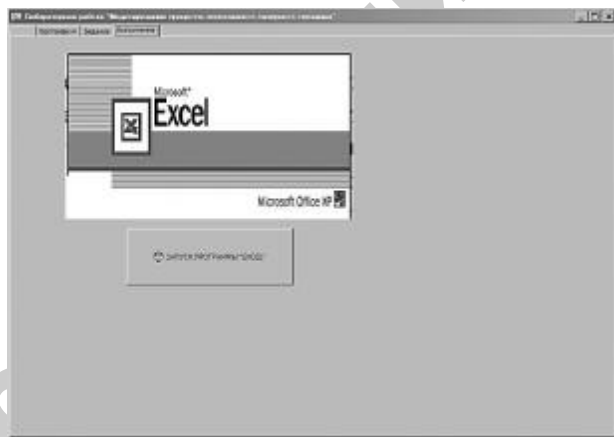


Рис. 6. Диалоговое окно при запуске закладки «Выполнение»

В этом документе открываются листы выполнения различных вариантов заданий, в которых необходимо заполнить таблицы в соответствии с заданием и получить информацию о моделируемом процессе в табличном и графическом виде. Для выполнения работы следует использовать исходные данные, указанные в закладке «Задание».

Для каждого задания исходные данные, полученные результаты моделирования (таблицы и графики) и выводы, сделанные на основе анализа этих результатов, необходимо представить в отчете о выполнении работы.

Варианты заданий

Задание 1. Выполнить анализ зависимости коэффициента поглощения смеси порошков от содержания компонентов в смеси.

Заполнить таблицы в программе Excel и построить графики зависимости коэффициента поглощения смеси порошков от содержания компонентов в смеси в соответствии с формулой (1) для трех наборов параметров процесса, приведенных в задании. Проанализировать построенные графики и сделать вывод о влиянии компонентов смеси на поглощательную способность порошков.

Задание 2. Выполнить анализ зависимости производительности SLS-процесса от толщины спекаемых слоев.

Заполнить таблицы в программе Excel и построить графики зависимости производительности SLS-процесса от толщины спекаемых слоев в соответствии с формулой (10) для двух наборов параметров процесса, приведенных в задании. Проанализировать построенные графики и сделать вывод о влиянии толщины спекаемых слоев на производительность SLS-процесса.

Задание 3. Выполнить анализ влияния условий лазерного спекания на геометрические характеристики качества поверхности SLS-изделия.

Используя экспериментальные данные, введенные в таблицы Excel, построить графики зависимости геометрических характеристик качества поверхности SLS-изделия из полимерпесчаной смеси от параметров SLS-процесса, в том числе: зависимость высоты волнообразного рельефа на боковой стенке изделия от толщины слоев; зависимость высоты волнообразного рельефа на границе слоев изделия от ширины полос спекания; зависимость высоты волнообразного рельефа на границе слоев изделия от ширины зон взаимного перекрытия полос спекания; зависимость шероховатости поверхности изделия от размеров частиц порошка.

Проанализировать построенные графики и сделать вывод о характере влияния параметров SLS-процесса на геометрические характеристики качества поверхности изделия.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о технологии селективного лазерного спекания.
3. Результаты моделирования, оформленные в соответствии с требованиями к выполнению заданий.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

Вопросы для контроля усвоенных знаний представлены в электронном приложении к методическим указаниям работы. Для ответа на вопросы в основном окне программы следует выбрать закладку «Коллоквиум» (см. раздел 3. Порядок выполнения работы).

4. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Цель работы – ознакомление со структурой наноматериалов.

Студент должен знать: разновидности наноматериалов, их размерные и структурные характеристики и связанные с ними особенности проявления свойств.

Студент должен уметь: анализировать структуру наноматериалов.

Основные сведения [4, 9]

Наноматериалы – это такие материалы, которые характеризуются нанометровым масштабом размеров хотя бы в одном из трех измерений. При этом нанометровый масштаб размеров может относиться как к образцу материала в целом, так и к его структурным элементам. Соответственно, в первом случае нанообъектами являются непосредственно образцы материалов, во втором – их структурные элементы. Принято условно считать, что к объектам наномира относятся такие объекты, характерные размеры которых лежат в пределах от 1 до 100 нм.

Существуют различные виды наноматериалов, каждый из которых характеризуется присущей ему спецификой структуры и, соответственно, свойств. Наноматериалы подразделяются по степени структурной сложности на наночастицы и наноструктурные материалы.

Наночастицы представляют собой наноразмерные комплексы определенным образом взаимосвязанных атомов или молекул. Среди них наиболее распространенными являются кристаллические наночастицы (нанокристаллы), которые чаще всего получают в виде нанопорошков. Кристаллические наночастицы обладают рядом необычных свойств, главная особенность которых заключается в проявлении размерных эффектов. Благодаря малости размеров они имеют большую удельную поверхность, которая заметно увеличивает их растворимость, реакционную, каталитическую и адсорбционную способность. Кроме того, из-за малости размеров они обладают повышенной проникающей способностью.

Особыми видами наночастиц, имеющих важное практическое применение благодаря необычным свойствам, являются фуллерены, состоящие из атомов углерода, образующих структуру в виде сфероподобного каркаса, и углеродные нанотрубки, состоящие

из атомов углерода, образующих структуру в виде цилиндрического каркаса. Фуллерены и углеродные нанотрубки характеризуются высокой прочностью, благодаря чему их перспективно использовать в качестве упрочняющего армирующего компонента в нанокompозитах.

Наноструктурные материалы представляют собой ансамбли наночастиц. В таких материалах наночастицы играют роль структурных элементов. Наноструктурные материалы подразделяются по характеру взаимосвязи наночастиц на консолидированные наноматериалы и нанодисперсии.

Консолидированные наноматериалы – это компактные твердофазные материалы, состоящие из наночастиц, которые имеют фиксированное пространственное положение в объеме материала и жестко связаны непосредственно друг с другом. К консолидированным наноматериалам относятся нанокристаллические материалы, нанокомпозиты (матричные и слоистые) и нанопористые материалы. Нанодисперсии представляют собой дисперсные системы с наноразмерной дисперсной фазой. К нанодисперсиям относятся указанные выше матричные нанокомпозиты и нанопористые материалы, а также нанопорошки, наносuspензии, наноэмульсии и наноаэрозоли.

В разных наноматериалах могут иметь место те или иные особенности проявления эффектов, связанных с малыми размерами составляющих их структур. Особенности структуры и свойств индивидуальных наночастиц накладывают определенный отпечаток на структуру и свойства образуемых на их основе наноструктурных материалов. К числу основных причин проявления необычных свойств наноматериалов относятся высокая удельная поверхность и связанная с ней высокая энергетическая активность наночастиц.

Среди различных видов наноматериалов особый практический интерес представляют конструкционные наноматериалы, которые предназначены для изготовления деталей машин и сооружений, воспринимающих силовую нагрузку.

К наиболее распространенным конструкционным наноматериалам относятся нанокристаллические и нанокомпозиционные материалы, обладающие улучшенными механическими свойствами. Кроме того, для изготовления определенных типов деталей машин применяются нанопористые материалы.

Необычными механическими свойствами обладают *металлические нанокристаллические материалы*, свойства которых существенным образом зависят от размера составляющих их зерен. С уменьшением размера зерен уменьшается плотность содержащихся в них дислокаций и вместе с тем увеличивается объемная доля границ раздела (границ зерен и тройных стыков), что приводит к изменению механических свойств материалов. Существует некоторый критический размер нанозерен R^* (приблизительно 10...20 нм), которым определяется степень устойчивости в них дислокаций: в нанозернах с размером $R < R^*$ вероятность существования дислокаций мала, наоборот, в нанозернах с размером $R > R^*$ может содержаться довольно большое число дислокаций. Если нанокристаллический материал состоит из нанозерен с размером $R < R^*$, то он обладает высокой прочностью, и, кроме того, сверхтвердостью. Например, предел текучести и микротвердость у нанокристаллической меди в 4 раза выше, чем у крупнозернистой меди. Если нанокристаллический материал состоит из нанозерен размером $R > R^*$, то он обладает сверхпластичностью, которая проявляется при сравнительно низких температурах и высоких скоростях деформации. Например, относительное удлинение до разрушения никеля с размером зерен 35 нм при температуре 420 °С и скорости деформации 10^{-2} с^{-1} составляет около 1000 %. Такой характер проявления механических свойств нанокристаллических материалов с изменением размеров зерен принципиально отличает их от крупнозернистых материалов, для которых прочность и твердость однозначно повышаются с уменьшением размера зерен (согласно эмпирическому закону Холла–Петча).

Возможность осуществления низкотемпературной сверхпластичности металлических наноматериалов открывает новые возможности для развития перспективных технологий сверхпластичной штамповки и формовки, а также комбинированных технологий, сочетающих сверхпластическую формовку и сварку давлением, что позволит существенно расширить ассортимент сложнопрофильных изделий.

Особенностью металлических нанокристаллических материалов является их большая износостойкость. Так, при уменьшении размера зерна в никеле от 10 мкм до 10 нм скорость износа снижается от 1330 до 7,9 мкм³/мкм.

Значительное внимание уделяется вопросам применения сталей с нанокристаллической структурой, прежде всего в силу присущих им повышенных прочностных свойств. Например, сталь 12X18H10T с размером зерна 100 нм имеет предел текучести 1340 МПа, что в 6 раз больше предела текучести этой же стали с крупнозернистой структурой. Кроме того, в нанокристаллической стали этой марки резко возрастает внутреннее трение по сравнению с ее крупнозернистыми аналогами, что обеспечивает повышение ее демпфирующих свойств.

К перспективным материалам относятся алюминиевые нанокристаллические сплавы, обладающие высокой износостойкостью, которая значительно выше износостойкости аналогичных крупнозернистых сплавов. Кроме того, в алюминиевых сплавах с уменьшением размеров зерен до нанометровых могут проявляться сверхпластичные свойства, что расширяет технологические возможности изготовления из них изделий обработкой давлением. Например, в субмикрокристаллическом сплаве Al-3%Mg-0,2%Sc при температуре 400 °С и скорости деформирования $3,3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ наблюдается удлинение 2280 %.

В промышленности довольно широко применяется титан, прочность которого существенно возрастает (предел прочности составляет 1100 МПа) при формировании в нем нанокристаллической структуры. Кроме того, в нанокристаллическом титане и его сплавах наблюдается уменьшение адгезионной составляющей коэффициента трения, а также склонности к схватыванию (налипанию, сварке), типичной при наличии крупнозернистой структуры.

Эффективным способом упрочнения металлических деталей является формирование на их поверхности нанокристаллического слоя в результате интенсивной многократной пластической деформации, которая может осуществляться, в частности, в процессе трения.

В разных отраслях промышленности большое распространение находят *металлические нанокompозиты*.

Типичными представителями металломатричных нанокompозитов являются твердые сплавы системы WC-Co. В них с переходом размеров зерен карбида вольфрама в нанометровую область увеличивается твердость зерен и уменьшается толщина межзеренной кобальтовой прослойки. Это приводит к уменьшению пластичности и затрудняет вырывание зерен при износе и, как следствие, способ-

ствуется значительному улучшению механических свойств. Так, в твердом сплаве состава WC-6%Co при уменьшении среднего размера зерен карбида вольфрама от 1,5 до 0,5 мкм прочность, твердость и износостойкость возрастают в 1,5–2 раза.

Нанокompозиты на стальной матрице армируют преимущественно наночастицами оксидов металлов (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2), которые играют роль упрочняющих компонентов. Выбор в качестве таких компонентов оксидов, а не карбидов или нитридов, обусловлен тем, что кислород значительно меньше растворяется в матричном материале, чем углерод или азот.

Легирование порошкового железа нанопорошковой медью (3 % масс.) вызывает значительное улучшение механических свойств спеченных порошковых сталей: относительное удлинение возрастает в 5 раз, ударная вязкость – в 3, твердость – в 1,25 раза по сравнению со сталями, легированными крупнодисперсным порошком меди.

Нанокompозиты на алюминиевой матрице, упрочненные наночастицами керамики (SiC , B_4C , BN) или синтетического алмаза, обладают более высокими антифрикционными свойствами и износостойкостью, чем матричные алюминиевые сплавы. Особенно широко применяются нанокompозиты типа САП (спеченная алюминиевая пудра), в которых алюминиевая матрица армирована наночастицами Al_2O_3 .

Нанокompозиты на медной матрице с включениями наночастиц оксидов металлов (Al_2O_3 , BeO_2 , ThO_2) или синтетических алмазов приобретают повышенную прочность, сохраняя при этом высокую электропроводность медной матрицы, что делает их перспективными для изготовления электроконтакторов, работающих при высоких динамических нагрузках.

Подобно металлматричным нанокompозитам высокие механические свойства демонстрируют металлические слоистые нанокompозиты. Так, многослойный наноламинат Mo-W толщиной 50 мкм, состоящий из слоев молибдена и вольфрама толщиной 4 нм, по прочности и твердости в 15 раз превышает сплав соответствующего состава.

При изготовлении деталей машин и агрегатов, наряду с металлматричными нанокompозитами, все большее применение находят *полимерные нанокompозиты*. В них полимерная матрица наполняется наночастицами глинистых минералов, металлов и их соединений,

а также наноалмазами, фуллеренами или углеродными нанотрубками. Такие композиты обладают повышенной износостойкостью. Так, скорость изнашивания для нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена, наполненного нанопорошком $MgAl_2O_4$ (2...5 мас.%), составляет 0,6...3,4 мг/ч, в то время как для традиционных аналогов, содержащих в качестве наполнителя кокс и дисульфид молибдена, – 12...16 и 40...45 мг/ч соответственно (при этом прочность и пластичность для всех материалов остаются практически одинаковыми).

При герметизации различных соединений, а также в качестве уплотнителей используются нанокомпозиты на основе эпоксидной смолы, модифицированной углеродными нанотрубками. У таких композитов наблюдается значительное повышение предела прочности при растяжении (на 400 %) и при изгибе (на 120 %). Из таких композитов также можно изготавливать детали, обладающие низким коэффициентом трения. На основе эпоксидной смолы с добавками фуллеренов разработаны клеевые композиции, которые применяются в ремонтном производстве.

При изготовлении деталей машин особая роль отводится конструкционной керамике, которая формируется на основе карбида и нитрида кремния, оксидов циркония и алюминия, нитридов алюминия, титана, бора, циркония и некоторых других соединений и обладает повышенной прочностью, твердостью, износостойкостью, температурной и коррозионной стойкостью. Из нее изготавливают режущие элементы, экструзионные головки, сопла, штуцеры, фильеры, уплотнители, крыльчатки и другие детали машин и агрегатов. В частности, она является весьма перспективным материалом для изготовления режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающей техники. К основным недостаткам керамики относятся низкая трещиностойкость и пластичность. Этих недостатков лишена *нанокристаллическая керамика*. Для нее характерна повышенная низкотемпературная пластичность, которую можно использовать в промышленных процессах экструзии и прокатки керамики. С уменьшением размеров зерен до нанометровых возникают возможности деформировать керамику при довольно высоких скоростях деформации ($\sim 10^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

Особое практическое значение имеют *нанопористые материалы*. Среди них наиболее широкое распространение получили нанопористые мембраны, служащие в качестве фильтрующих элементов.

Для осуществления эффективной нанофильтрации такие мембраны должны обладать механической и химической стабильностью, демонстрировать высокие значения удерживания целевых компонентов и транспорта органических растворителей. Этим требованиям отвечают мембраны из керамических и полимерных материалов. Керамические мембраны обычно изготавливают из оксидов металлов (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 и др.), полимерные – из стеклообразных полимеров (полиамидов, полиимидов, полисульфонов и др.) и эластомеров (сшитых силиконовых каучуков).

Довольно широкое применение находят мембраны особого типа – так называемые ядерные фильтры, которые получают с использованием ядерной технологии. Такие мембраны обладают калиброванными размерами пор, формируемых тяжелыми ионами, которые проходят сквозь пленку облучаемого вещества (слода, стекло, полимер) и образуют каналы размерами от 0,1 до 5,0 нм (в зависимости от толщины пленки).

Эффективность мембранных нанофильтров повышается в результате нанесения на них наночастиц серебра, благодаря чему становится возможным осуществлять одновременно и фильтрационную, и бактерицидную обработку продуктов.

Значительное место среди нанопористых материалов отводится цеолитам ввиду их особых свойств, таких, как способность к обратимой адсорбции, наличие пор с входными отверстиями строго определенных размеров, большая величина внутренней поверхности. С помощью цеолитов осуществляется сушка и очистка газов и жидкостей, сорбция токсичных веществ в жидких и газовых средах, разделение смесей различных веществ.

Методические указания

Для выполнения работы студентам предоставляются следующие необходимые принадлежности: компьютерный микроскоп с набором электронных фотоизображений структуры наноматериалов и программным обеспечением для обработки изображений; комплект измерительных накладных сеток; набор печатных фотоизображений структуры наноматериалов.

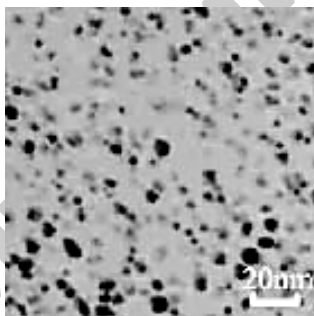
В работе требуется выполнить количественный анализ структуры наноматериалов, представленной на фотографиях в электронном

виде (с использованием техники компьютерной микроскопии) и в печатном виде (с использованием техники измерительных накладных сеток).

Количественный анализ структуры наноматериалов выполняется в соответствии с предлагаемыми преподавателем индивидуальными заданиями (с учетом особенностей исследуемых структур). Типичными структурными параметрами, численные значения которых подлежат определению, являются: средний размер наночастиц или нанопор, а также их распределение по размерам; средняя толщина нанотрубок или нановолокон; пористость; содержание армирующих включений и т. д.

Пример индивидуального задания по анализу структуры наноматериалов

На фотографии представлена структура матричного нанокompозита на основе полиэтилена с включениями наночастиц железа.



Требуется на основе анализа микроизображения определить средний размер армирующих наночастиц и их распределение по размерам с использованием техники компьютерной микроскопии (или техники измерительных накладных сеток).

Особенности применения техники компьютерной микроскопии изложены в Руководстве по программному обеспечению для обработки изображений и видео «ScopePhoto».

Особенности применения техники измерительных накладных сеток для структурных исследований изложены в описании работы «Изучение структуры порошковых материалов».

По результатам проведенных исследований следует описать порядок определения параметров структуры с указанием их численных значений. Кроме того, следует охарактеризовать свойства анализируемых наноматериалов с учетом их структурных особенностей.

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить основные положения работы.
3. Выполнить количественный анализ структуры наноматериалов.
4. Дать краткое описание корреляций между структурой и свойствами анализируемых наноматериалов.
5. Проанализировать полученные результаты.
6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о структурных особенностях наноматериалов.
3. Краткое описание порядка определения параметров структуры наноматериалов с указанием полученных численных значений.
4. Краткое описание корреляций между структурой и свойствами анализируемых наноматериалов.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое наноматериалы?
2. Как классифицируются наноматериалы?
3. Каковы особенности структуры и свойств наночастиц?
4. Каковы особенности структуры и свойств нанокристаллических материалов?
5. Каковы особенности структуры и свойств нанокomпозиционных материалов?
6. Каковы особенности структуры и свойств нанопористых материалов?

5. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Цель работы – изучение технологического оборудования и технологического процесса магнитно-абразивной обработки.

Студент должен знать: устройство и принцип работы технологического оборудования для магнитно-абразивной обработки; структуру и особенности реализации технологического процесса магнитно-абразивной обработки; технологические факторы повышения эффективности магнитно-абразивной обработки.

Студент должен уметь: составлять блок-схему оборудования для магнитно-абразивной обработки; разрабатывать технологический процесс магнитно-абразивной обработки; оценивать эффективность магнитно-абразивной обработки с учетом технологических факторов.

Основные сведения [6, 7]

Магнитно-абразивная обработка (МАО) – это разновидность абразивной обработки, осуществляемой при движении заготовки и абразивных зерен относительно друг друга в магнитном поле.

Сущность магнитно-абразивной обработки состоит в том, что ферромагнитный абразивный порошок (ФАП), уплотненный энергией магнитного поля, осуществляет абразивное воздействие на обрабатываемую деталь. Частицы ФАП, материал которых представляет собой ферромагнитную матрицу с вкраплениями в нее частиц абразива, располагаются вдоль направления силовых линий магнитного поля, создаваемого в рабочем зазоре между магнитными полюсами соответствующего устройства. Детали, введенной в рабочий зазор, сообщается движение относительно абразивных частиц, которые, прижимаясь к поверхности детали магнитным полем, оказывают давление на деталь практически в каждой точке ее поверхности, что в результате приводит к съему металла и сглаживанию микронеровностей. Механическое воздействие ФАП на поверхность детали в значительной степени усиливается электрохимическими явлениями, возникающими при введении смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону обработки.

МАО приводит к снижению шероховатости обрабатываемой поверхности и одновременно к изменению структуры поверхностного

слоя заготовки, что отражается на эксплуатационных свойствах изделий: повышается твердость их поверхности, износостойкость, коррозионная стойкость и контактная прочность.

Особенности МАО: отсутствие жесткого крепления абразивного зерна в связке и эластичный контакт абразива с поверхностью изделия, что снижает циклические нагрузки на изделие и способствует сохранению геометрии обрабатываемой поверхности; возможность управления жесткостью абразивного инструмента изменением напряженности магнитного поля в рабочем зазоре и, как следствие, возможность регулирования снятия металла с обрабатываемой поверхности; отсутствие трения связки о поверхность изделия; возможность использования всех режущих кромок абразивного зерна; проникновение стружки диспергированного металла между абразивными зёрнами, устраняющее засаливание абразивного инструмента.

Магнитно-абразивным способом можно успешно обрабатывать детали различных форм и размеров из разнообразных материалов. Наиболее распространенные типы обрабатываемых поверхностей: цилиндрические наружные и внутренние, плоские, сферические, винтовые, поверхности тел вращения с криволинейной образующей и др.

Преимущества МАО по сравнению с существующими методами абразивной обработки с использованием жесткого абразивного инструмента: полная механизация шлифовальных и полировальных операций, позволяющая повысить производительность труда в 3–5 раз; применение дешевого ФАП, снижающее в 2-3 раза затраты на абразивный инструмент; отсутствие необходимости периодической перезаточки и правки абразивного инструмента; обеспечение высокого качества обработки независимо от квалификации рабочего; отсутствие твердого крепления абразива в связке, что позволяет механизировать финишные операции при обработке меди, алюминия и других мягких материалов.

Эффективность процесса МАО характеризуется степенью повышения эксплуатационных свойств изделия, достигаемой в результате осуществления процесса при минимальных затратах. Повышение эксплуатационных свойств обеспечивается сглаживанием микрорельефа поверхности при одновременном улучшении качественных характеристик поверхностного слоя. Таким образом, оценка эффективности процесса МАО в наиболее полной мере осуществляется таким количественным показателем, как скорость

снижения высоты микронеровностей поверхности (мкм/с), которая определяется по формуле

$$V = \Delta R_a / \tau, \quad (1)$$

где ΔR_a – разность между исходной шероховатостью и полученной в процессе МАО, мкм;

τ – продолжительность МАО, с.

На эффективность процесса МАО оказывают влияние следующие технологические факторы: величина магнитной индукции, материалы магнитно-абразивного порошка и обрабатываемой детали, величина рабочего зазора, скорость относительного движения порошка и детали, состояние исходной поверхности (физико-механические свойства и микрогеометрические характеристики).

Повышению эффективности МАО способствует рациональный выбор ФАП, которые, являясь своеобразным инструментальным материалом, совмещают в себе высокие режущие и магнитные свойства.

Успешная работа большинства схем МАО зависит от того, смогут ли силы магнитного поля удерживать порошок в рабочем зазоре, насколько велики будут силы, действующие на каждое зерно порошка, и насколько высокую плотность магнитного потока удастся создать в рабочем зазоре. Силы резания в процессе МАО являются производными магнитных сил, которые действуют на каждую частицу и на порцию порошка в целом. Магнитные силы определяются магнитной индукцией и ее градиентами в пределах рабочего зазора и на его границах, а также магнитной проницаемостью порошковой среды, которая должна быть, по возможности, более высокой.

Для обеспечения высокой интенсивности съема металла ФАП должен обладать хорошими режущими свойствами. Экспериментально установлено, что внедрение абразивного зерна в обрабатываемый материал и образование стружки возможны, если твердость абразивного зерна превышает твердость обрабатываемого материала более чем в 2,5 раза.

Поскольку одной из важнейших задач МАО является получение заданного параметра шероховатости, то сравнение порошков должно производиться в первую очередь по их полирующей способности, т. е. способности за наименьшее время обеспечивать наименьшую шероховатость поверхности. Количественной

оценкой полирующей способности порошка может быть время достижения на конкретном материале заданного параметра шероховатости (R_z или R_a) при исходном ее уровне.

Разное отношение к выбору ФАП может определяться конкретными требованиями к МАО. Так, если при полировании точных изделий необходимо получить заданный параметр шероховатости и при этом не ухудшить уже имеющуюся точность размеров и формы обрабатываемой поверхности, то достаточно применять порошки с невысокой режущей способностью, с помощью которых удаляется минимально необходимый припуск. Если же условие сохранения точности не ставится, а исходная поверхность имеет грубую шероховатость, то от порошка требуется высокая режущая способность для удаления большого припуска.

В случае обработки труднообрабатываемых материалов целесообразно применять порошки в виде специальных композиций на основе железа и карбида титана $Fe-TiC$, в случае незакаленных сталей, цветных металлов и сплавов – порошки, получаемые из отходов электрокорундового производства на основе Al_2O_3 . Также перспективно применение в качестве порошков спеченных шлаков, получаемых при шлифовании и заточке инструментов из быстрорежущих сталей типа Р6М5.

При МАО температура обрабатываемой поверхности детали не превышает $100...200\text{ }^{\circ}C$. Поэтому охлаждающее действие СОЖ для данного процесса несущественно. Главное назначение СОЖ состоит в особом физико-химическом воздействии на поверхность детали и частицы порошка. При введении СОЖ в зону обработки возникает процесс электролиза, в результате которого растворяются поверхностный слой детали и ферромагнитное покрытие частиц порошка. Растворение поверхностного слоя детали облегчает съем с нее металла, а растворение ферромагнитного покрытия частиц обеспечивает вскрытие абразивных зерен и способствует увеличению их режущей способности. Состав и свойства СОЖ оказывают существенное влияние на кинематику зерен порошка и на процесс стружкообразования. Увеличение вязкости СОЖ способствует лучшему удержанию абразивной массы магнитным потоком, что препятствует свободному перемещению зерен в рабочем зазоре. Содержащиеся в СОЖ поверхностно-активные вещества оказывают расклинивающее действие на обрабатываемую поверхность,

снижая тем самым энергию, необходимую для осуществления процесса стружкообразования. Действие такого эффекта особенно проявляется при небольших глубинах резания ($< 0,3$ мкм), свойственных для процесса МАО. Наиболее эффективными являются СОЖ на основе водных растворов триэтаноламина, олеиновой кислоты с добавками различных синтетических ПАВ в виде олигомеров и их производных.

Широкие технологические возможности в сочетании со специально разработанными составами ФАП и СОЖ позволяют реализовать на практике процессы МАО для следующих основных задач: полирование контактирующих поверхностей деталей, подверженных значительным механическим нагрузкам и работающих на износ; очистка поверхностей от дефектных слоев, окисных пленок и загрязнений.

Полирование в магнитном поле с одновременным удалением заусенцев, а также закруглением острых кромок на витках и шлицах снижает шероховатость и волнистость рабочих поверхностей, улучшает качество поверхностного слоя, повышает износостойкость и контактную прочность, что обеспечивает повышенные значения нагрузочной способности и пониженные потери на трение.

Магнитно-абразивная очистка особенно эффективна для поверхностей сварных конструкций. Испытания таких конструкций на механическую прочность (предел прочности, предел текучести и др.) показывают, что очистка кромок в магнитном поле обеспечивает более высокие значения указанных характеристик, чем у образцов после электрохимического полирования и химического травления. Поскольку МАО не требует применения токсичных растворов кислот и щелочей, то в экологическом отношении эта технология более предпочтительна. Также эффективно подвергать магнитно-абразивной очистке поверхности перед нанесением покрытий, что способствует повышению их адгезионной прочности.

Для реализации процессов МАО в условиях серийного и массового производства применяются специальные высокопроизводительные магнитно-абразивные станки-полуавтоматы или автоматы. Для многономенклатурного производства с невысокой серийностью используются комплекты специальной оснастки для МАО, устанавливаемой по мере производственной необходимости или

постоянно на базовых станках разных типов, из которых наибольшее применение находят токарно-винторезные станки.

Общий вид магнитно-абразивного станка показан на рис. 1–3.

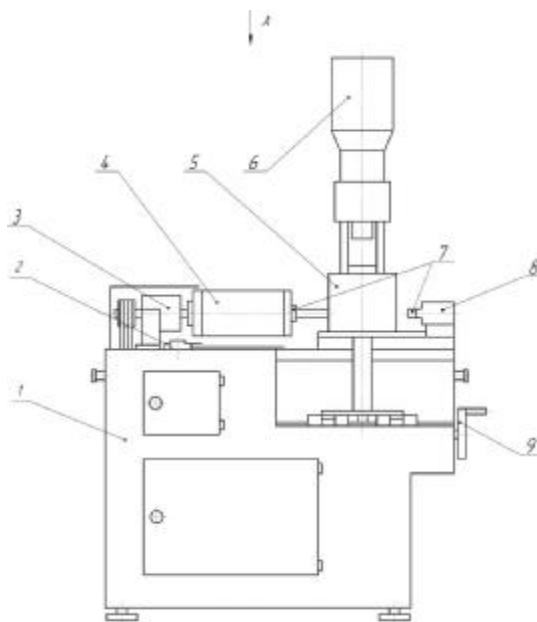


Рис. 1. Общий вид магнитно-абразивного станка (главный вид)

Станок состоит из следующих основных частей: станины 1, в которой размещаются двигатели приводов вращения и осцилляции детали, а также механизмы осцилляции 2; привода вращения 3; узла шпинделя 4; магнитной системы 5; электромагнитного бункера 6; приспособления для закрепления деталей 7; задней бабки 8; механизма перемещения магнитной системы 9; насосной установки с магнитным сепаратором 10; пульта управления 11 (рис. 2). К сердечникам электромагнитов магнитной системы крепятся сменные инструменты – полюсные наконечники 12 с рабочим профилем, соответствующим профилю обрабатываемой детали. Полюсные наконечники устанавливаются с некоторым зазором (0,5...2,0 мм) с двух сторон соосно относительно обрабатываемой детали.

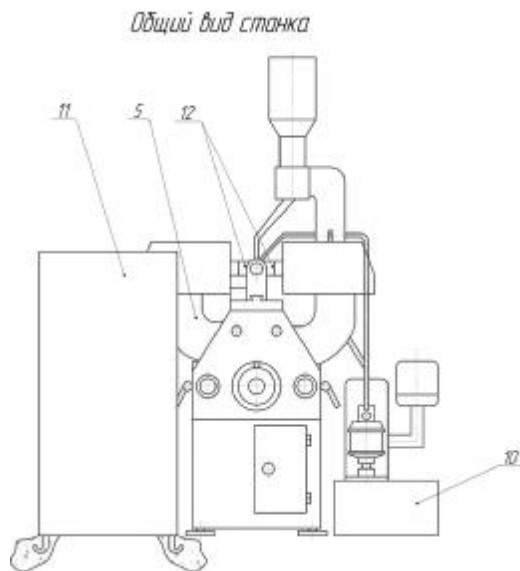


Рис. 2. Общий вид магнитно-абразивного станка (вид сбоку)

Обработка на станке основана на принципе воздействия рабочей среды, удерживаемой магнитным полем в зазорах между полюсными наконечниками и деталью, на поверхность обрабатываемой детали, вращающейся и осциллирующей вдоль оси.

В качестве ФАП применяются преимущественно порошки керметов на основе электрокорунда Al_2O_3 зернистостью 160...200 мкм и 60...100 мкм (более мелкие порошки применяются для получения более высоких классов чистоты обработки поверхности). В качестве СОЖ применяется 10%-ный раствор эмульсола в воде с добавкой 1%-ной олеиновой кислоты.

Станок имеет два режима работы: наладочный и полуавтоматический. В наладочном режиме все механизмы станка приводятся в действие независимо друг от друга в любой последовательности нажатием на соответствующие кнопки пульта управления.

Основной режим работы – полуавтоматический. Работа в полуавтоматическом режиме происходит следующим образом: на узел шпинделя и заднюю бабку устанавливаются соответствующие обрабатываемой детали приспособления для крепления детали.

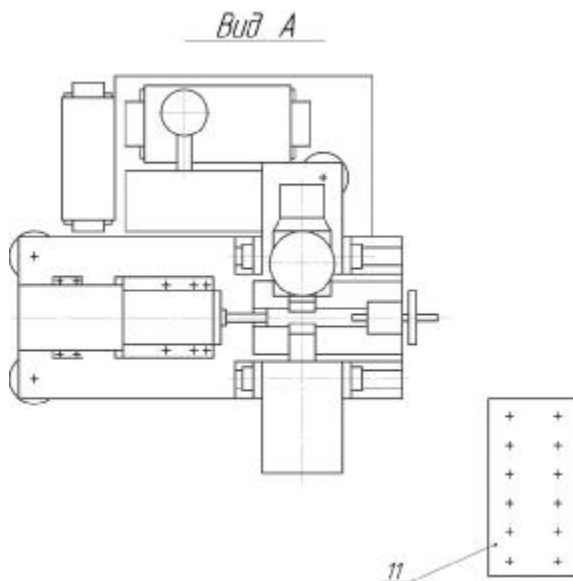


Рис. 3. Общий вид магнитно-абразивного станка (вид сверху)

На сердечники магнитной системы устанавливаются соответствующие полюсные наконечники. Вручную закрепляется деталь. Магнитная система маховиком перемещения подводится к детали и фиксируется зажимами в нужном положении. Тумблер переключения режимов работы на пульте управления переводится в положение «Наладка», и на пульт подается напряжение. С помощью реле времени и переключателей напряжения, размещенных в шкафу управления, устанавливаются: длительность обработки и демагнитизации, а также сила тока в рабочих катушках, необходимая для создания нужной индукции в рабочих зазорах при обработке и демагнитизации. Тумблер переключения режимов работы на пульте управления переводится в положение «Автомат». Затем нажатием на кнопку «Цикл» станок приводится в действие. Дальнейшая работа происходит автоматически. На катушки магнитной системы подается напряжение, сердечники сближаются до соответствующих упоров, образуя между деталью и полюсными наконечниками необходимый рабочий зазор, в котором наводится магнитное поле. Одновременно включается насос подачи СОЖ и магнитный

сепаратор насосной установки. Затем из электромагнитного бункера на деталь подается доза порошка, необходимая для обработки детали. Величина зазора устанавливается заранее перемещением верхней магнитной системы электромагнитного бункера. Затем включаются двигатели вращения и осцилляции детали. Происходит обработка детали, по истечении времени которой индукция в зазорах понижается до установленного уровня, и включается демагнитизация, после ее завершения все механизмы станка выключаются, и деталь снимается вручную со шпинделя.

Принцип реализации процесса МАО поясняется на рис. 4.



Рис. 4. Схема магнитно-абразивного полирования
наружных поверхностей тел вращения

Обрабатываемая деталь 1 помещается с рабочим зазором δ между полюсными наконечниками 3, на которые установлены электромагнитные катушки 4. Зазор заполняется порошком 2, который под действием энергии магнитного поля удерживается в зазоре и прижимается к поверхности детали. Последней сообщается вращательное и возвратно-поступательное движение, она перемещается относительно порошка, и таким образом происходит магнитно-абразивная обработка ее поверхности. При этом для эффективного протекания процесса обработки в зазор подается СОЖ.

Изменение величины зазора δ не оказывает существенного влияния на шероховатость обрабатываемой поверхности и размерный съем металла. Это объясняется тем, что при малых значениях ($\delta < 1$ мм), наряду с ростом магнитных сил, уменьшается порция ФАП и подвижность зерен порошка внутри зазора. Увеличение технологического тока и, соответственно, магнитной индукции приводит к увеличению сил резания и росту производительности обработки. При этом увеличивается съем металла.

Разработка технологического процесса МАО включает ряд этапов, из них завершающим этапом является составление технологической документации.

К основным типам технологических документов относятся маршрутная и операционная карты технологического процесса. Маршрутная карта содержит описание технологического процесса по всем операциям в их технологической последовательности с указанием данных об используемом оборудовании. Операционная карта содержит описание технологических операций с указанием составляющих их переходов, технологических режимов и данных об используемых приспособлениях, инструменте и материалах.

Как правило, технологический процесс МАО включает, кроме собственно операции МАО, ряд дополнительных операций.

Так, типовой технологический процесс МАО детали типа вала может состоять из следующей последовательности операций: слесарная (правка вала на гидравлическом прессе); токарная (черновая обработка поверхности и предварительное формообразование на токарном станке); круглошлифовальная (шлифование поверхности на круглошлифовальном станке); магнитно-абразивная (шлифование поверхности на установке для МАО); слесарная (очистка обработанной поверхности на слесарном верстаке); контрольная (проверка качества обработки поверхности и точности размеров на столе для контроля).

В свою очередь, каждая из перечисленных выше операций может характеризоваться определенным набором переходов и, соответственно, приспособлений, инструмента и материалов.

Как правило, слесарная операция (правка вала), а также токарная, круглошлифовальная и магнитно-абразивная операции начинаются с перехода по установке детали и заканчиваются переходом по ее снятию (при выполнении магнитно-абразивной операции деталь после снятия помещается в демагнетизатор). Правка вала осуществляется с выдерживанием заданных отклонений от оси, а шлифование поверхности – с выдерживанием заданных размеров, для чего обычно используются специальные контрольно-измерительные инструменты. Токарная обработка проводится на токарном станке с помощью токарных резцов. Шлифование проводится на круглошлифовальном станке с помощью шлифовальных кругов, а МАО – на установке для МАО с помощью ФАП.

Слесарная операция (очистка) обычно выполняется с помощью ветоши промышленной, ацетона и хлопчатобумажной ткани.

Контрольная операция обычно включает проверку следующих параметров: отсутствие загрязнения на обработанных поверхностях (путем внешнего осмотра); шероховатость обработанных поверхностей (с помощью профилографа-профилометра); радиальное биение вала (с помощью специальных индикаторов и контрольных центров); размеры (с помощью штангенциркуля и микрометра).

Методические указания

Для выполнения работы студентам предоставляются следующие необходимые материалы, оборудование и принадлежности: экспериментально-технологическая установка для МАО на базе токарно-винторезного станка; комплект заготовок деталей типа вала до и после МАО; набор образцов шероховатости поверхности; видеофильм, демонстрирующий технологический процесс МАО.

В работе требуется:

- составить блок-схему оборудования для МАО;
- разработать технологический процесс МАО;
- определить скорость снижения высоты микронеровностей поверхности в зависимости от условий МАО.

Перед составлением блок-схемы оборудования для МАО и разработкой технологического процесса МАО следует изучить устройство и принцип работы технологического оборудования для МАО, созданного на базе токарно-винторезного станка, а также структуру и особенности реализации технологического процесса МАО (на основании анализа основных положений работы и просмотра видеофильма о МАО).

Блок-схема оборудования – это графическое представление конструкции оборудования, в котором его отдельные элементы (конструктивно-функциональные узлы) изображаются в виде блоков различной геометрической формы, соединенных между собой линиями (конструктивно-функциональными связями). В отдельных случаях блоки могут быть непосредственно сопряжены друг с другом. К наиболее распространенным геометрическим формам, используемым для изображения блоков, относятся прямоугольники, трапеции, ромбы, овалы и др. Для изображения блоков некоторых

специальных элементов могут использоваться более сложные геометрические формы.

При составлении блок-схемы оборудования для МАО необходимо отразить основные элементы конструкции оборудования.

Разработка технологического процесса МАО включает разработку маршрутной и операционной карт технологического процесса, которые следует составлять в представленных ниже учебных формах, позволяющих в упрощенном виде отразить основную информацию, связанную с технологическим маршрутом и технологической операцией соответственно.

Маршрутная карта МАО (учебная форма)

№ операции	Наименование операции	Оборудование
1	2	3

Операционная карта МАО (учебная форма)

Наименование операции	
№ перехода	Содержание перехода. Приспособление, инструмент
1	2

Скорость снижения высоты микронеровностей поверхности определяется по формуле (1).

Шероховатость поверхности деталей до и после МАО оценивается путем визуального сравнения с образцами шероховатости. Оценка шероховатости проводится на выдаваемых преподавателем заготовках деталей, для которых указываются продолжительность, а также другие параметры процесса МАО (значения магнитной индукции, рабочего зазора, скорости относительного движения порошка и детали; характеристики порошка и т. д.). На основании анализа корреляции между скоростью снижения высоты микронеровностей и параметрами процесса делается заключение о характере влияния условий процесса МАО на его эффективность.

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить основные положения работы и просмотреть видеофильм.

3. Изучить устройство и принцип работы технологического оборудования для МАО.
4. Составить блок-схему оборудования для МАО.
5. Разработать технологический процесс МАО.
6. Выполнить оценку величины съема металла в зависимости от условий МАО.
7. Проанализировать полученные результаты.
8. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о МАО.
3. Блок-схема оборудования для МАО.
4. Маршрутная карта технологического процесса МАО.
5. Операционная карта технологического процесса МАО.
6. Краткое описание результатов оценки величины съема металла в зависимости от условий МАО.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит техническая сущность магнитно-абразивной обработки и каковы ее основные отличия от других видов абразивной обработки?
2. Укажите преимущества магнитно-абразивной обработки по сравнению с другими видами абразивной обработки.
3. Укажите требования к свойствам ферромагнитных абразивных порошков.
4. Какова роль смазочно-охлаждающей жидкости в процессе магнитно-абразивной обработки?
5. Назовите основные конструктивные части оборудования для магнитно-абразивной обработки.
6. Назовите основные операции технологического процесса магнитно-абразивной обработки.

6. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ НАПЫЛЕННЫХ И НАПЛАВЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Цель работы – практическое освоение методик анализа макро- и микроструктуры напыленных и наплавленных покрытий; изучение структурных особенностей напыленных и наплавленных покрытий.

Студент должен знать: методики анализа макро- и микроструктуры напыленных и наплавленных покрытий; структурные особенности напыленных и наплавленных покрытий.

Студент должен уметь: анализировать макро- и микроструктуру напыленных и наплавленных покрытий.

Основные сведения [6, 8]

Одним из наиболее эффективных путей упрочнения рабочих поверхностей деталей машин является нанесение напыленных и наплавленных покрытий.

Методы напыления покрытий делятся на две основных группы: газотермическое напыление и вакуумно-конденсационное напыление.

В *газотермических методах* напыляемый материал подвергают нагреву и плавлению, а затем диспергируют и разгоняют газовым потоком. В зависимости от вида источника нагрева различают следующие газотермические методы: электродуговую металлизацию, газопламенное, детонационное (или детонационно-газовое) и плазменное напыление. Для получения газотермических покрытий используют напыляемый материал в виде порошков, проволоки, стержней, гибких шнуров. При этом во всех случаях напыляемый материал диспергируется и попадает на поверхность детали в расплавленном или пластифицированном виде.

В *вакуумно-конденсационных методах* покрытие формируется из потока частиц, находящихся в атомарном, молекулярном или ионизированном состоянии. В зависимости от вида источника энергетического воздействия на напыляемый материал различают вакуумно-конденсационные методы, в которых формирование потока частиц осуществляется термическим испарением, ионным распылением или взрывным испарением-распылением материала.

Методы наплавки покрытий заключаются в нанесении расплавленного материала на оплавленную поверхность основы. Наплавленный материал после охлаждения прочно связывается с основой. В зависимости от вида источника нагрева различают методы электродуговой, газопламенной, плазменной, электромагнитной, лазерной, электронно-лучевой наплавки и др.

Упрочняющие эффекты покрытий обеспечиваются благодаря их высоким механическим свойствам, которые определяются их макро- и микроструктурой.

Макроструктура – это структура, видимая невооруженным глазом или при небольших (до 25 раз) увеличениях с помощью лупы. *Микроструктура* – это структура, видимая при больших увеличениях с помощью микроскопа.

При исследовании структуры покрытий важно выявить структурные особенности не только самого покрытия, но также основы, на которую оно нанесено, и, кроме того, границы покрытие–основа, качеством которой определяется величина адгезии покрытия к основе.

Макроструктура покрытий изучается непосредственно на поверхности покрытий или по излому изделия с нанесенным покрытием. Кроме того, ее исследуют на макрошлифах, представляющих собой специально подготовленные к макроструктурному анализу части изделия с нанесенным покрытием. Если изделие небольшое, то его разрезают на две части, если же оно большое, то из него вырезают фрагмент (темплет), имеющий хотя бы одну плоскую поверхность, которая обычно подвергается шлифовке и травлению растворами кислот или щелочей для выявления структурных элементов.

При макроанализе можно обнаружить нарушения сплошности материала (раковины, рыхлость, газовые пузыри, расслоения, трещины, поры и т. д.), оценить размеры, количество и характер распределения различных фаз, включений и примесей, а также размеры, форму и расположение зерен (кристаллитов).

Качество материала можно оценивать по виду излома, позволяющему установить характер и причины разрушения. Так, в случае хрупкого излома можно видеть зерна, которые по форме и размерам соответствуют исходному состоянию, поскольку разрушение происходит без значительной пластической деформации, в то время как в случае вязкого излома форма и размеры зерен сильно искажаются,

поскольку разрушение сопровождается большой пластической деформацией. Усталостный излом обычно имеет две характерные зоны разрушения: усталостную зону с мелкозернистым, зачастую сложным ступенчатым строением, и зону долома, которая может иметь характер вязкого или хрупкого разрушения в зависимости от свойств материала.

Изучение макроструктуры позволяет сделать заключение о качестве материала, обусловленном условиями его получения. Так, после обработки давлением внутреннее строение металлов оказывается более плотным, чем после литья, поскольку в процессе горячей обработки давлением частично уничтожаются пористость, рыхлость, трещины и т. д. Кроме того, в ходе обработки давлением структурные составляющие, а также неметаллические включения дробятся и вытягиваются вдоль направления деформации, образуя продольную волокнистость. Внутреннее строение металлов также может существенно изменяться после термической или химико-термической обработки. При этом макроанализ позволяет определить глубину закаленного, цементованного, азотированного, цианированного слоев. В частности, закаленный слой имеет более мелкое зерно.

Важными характеристиками покрытия, выявляемыми в ходе макроструктурных исследований, являются его толщина и рельеф поверхности.

Макроанализ не позволяет определить в достаточной мере все особенности структуры, поэтому он часто играет роль предварительного исследования, по данным которого можно выбрать те участки изучаемой детали, которые надо подвергнуть дальнейшему, более подробному микроанализу.

Микроструктура покрытий изучается на микрошлифах. Особенности приготовления и исследования микрошлифов изложены в описании лабораторной работы «Изучение структуры порошковых материалов».

Анализ микроструктуры покрытий дает возможность определить размеры, количество и характер распределения различных структурных элементов, в том числе мелких включений и различных фаз, определить размеры, форму и расположение зерен, выявить и изучить микродефекты, а также некоторые дефекты

кристаллического строения (дислокации и их скопления), проконтролировать состояние структуры поверхности покрытий.

Напыленные и наплавленные покрытия имеют ряд структурных особенностей, определяемых условиями их получения.

Газотермические покрытия представляют собой слоистый материал, состоящий из сильно деформированных частиц, соединенных между собой по контактным поверхностям сварными участками (рис. 1). Сварные участки диаметром D_x не заполняют всю площадь контакта между частицами, и поэтому напыленное покрытие по плотности и прочности уступает материалу покрытия в компактном состоянии. Прочность самих сварных участков зависит от количества очагов схватывания, образующихся в период удара, деформации и затвердевания частицы, и определяется развитием химического взаимодействия материалов в контакте.

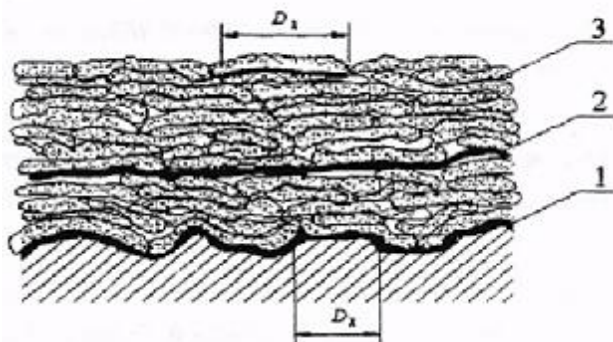


Рис. 1. Схема структуры газотермического покрытия:
1 – граница между покрытием и основой; 2 – межслойная граница;
3 – межчастичная граница; D_x – диаметр участка пятна контакта,
на котором происходит «приваривание» частицы

В газотермическом покрытии можно выделить ряд структурных элементов, которые отражают процессы его формирования и разделяются границами раздела с определенными свойствами. Граница раздела между покрытием и основой 1 определяет прочность сцепления между ними. Свойства самого покрытия обуславливаются прочностью сцепления частиц на межчастичной границе 3. Сцепление покрытия и основы называется адгезией, а сцепление частиц в самом покрытии – когезией. Межслойная

граница 2, получаемая за один проход распылителя, возникает из-за того, что за время выдержки между нанесением двух смежных слоев поверхность ранее нанесенного слоя покрытия окисляется и контактные процессы между ней и вновь напыляемыми частицами затрудняются.

Формирование покрытия последовательной укладкой множества деформирующихся частиц приводит к появлению микропустот (пор), прежде всего, на стыках частиц. Толщина слоя в различных покрытиях колеблется в довольно широком интервале в зависимости от назначения покрытия, условий его нанесения, материалов, входящих в состав покрытия и т. п.

Вакуумно-конденсационные покрытия характеризуются высокоплотной и мелкозернистой структурой. Возможности вакуумно-конденсационных методов позволяют получать тонкопленочные покрытия толщиной от десятков нанометров до сотен микрометров.

Структура вакуумно-конденсационного покрытия зависит от условий процесса конденсации. Наиболее существенным параметром этого процесса является температура подложки. Принципиально возможны два механизма конденсации испаренного вещества на подложке – ПК (пар–кристалл) и ПЖК (пар–жидкость–кристалл). Если реализуется механизм ПК, то частицы, конденсирующиеся на начальных стадиях испарения, имеют кристаллическое строение, и в дальнейшем формируется только кристаллическая пленка. Механизм ПЖК проявляется в том, что образование конденсированной фазы на подложке начинается с появления жидкой фазы в виде капель, которые длительное время существуют на подложке, после чего начинается процесс кристаллизации.

Наплавленные покрытия формируются в результате расплавления присадочного металла и его переноса на наплавляемую поверхность. При этом расплавляется поверхностный слой основного металла, так что слой наплавленного металла образуется из расплавленного присадочного металла и расплавленного основного металла.

Основные свойства наплавленных покрытий определяются присадочным материалом. Поэтому необходимо получить минимальное проплавление металла основы и минимальное перемешивание основного и присадочного металлов. В этой связи одним из важных параметров процесса наплавки является глубина проплавления основного металла: чем меньше глубина проплавления, тем меньше

основного металла в наплавленном слое и, соответственно, тем ближе наплавленный слой по химическому составу к присадочному металлу. Вместе с тем присадочный металл, прочно соединившись с металлом основы, должен не содержать пор, шлаковых включений, раковин, трещин и других дефектов.

Для обеспечения высокой адгезионной прочности напыленных и наплавленных покрытий проводится очистка поверхности изделий, в ходе которой удаляются жировые и другие виды загрязнений, оксидные пленки. Кроме того, перед напылением покрытий формируется соответствующая морфология поверхности и осуществляется активизация поверхности, т. е. повышение энергии поверхностных атомов до уровня обеспечения их химического взаимодействия с напыляемыми частицами. Благодаря этому создаются оптимальные условия для получения физического контакта между подложкой и напыляемыми частицами и для протекания физико-химических процессов, приводящих к прочной связи покрытий с подложкой. С этой целью применяются различные виды обработки поверхности: химическая, абразивная, электроразрядная и др.

Структура напыленных и наплавленных покрытий может быть существенно изменена (улучшена) в результате их дополнительной обработки. Так, для повышения эффективности эксплуатации деталей машин, работающих в экстремальных условиях (агрессивные среды, абразивный износ, высокоскоростное трение, высокие температуры, ударные нагрузки), применяют металлокерамические покрытия на основе высокодисперсных частиц тугоплавких химических соединений (карбиды, карбонитриды, оксиды и т. п.) с металлическим связующим, которые получают напылением металлокерамических порошковых частиц на металлическую основу. Общим недостатком таких покрытий является остаточная пористость. Принципиальным решением указанной проблемы является формирование в металлокерамических покрытиях высокоплотной внутренней структуры с многофазным микро- и нанокристаллическим состоянием компонентов, которое достигается при импульсном электронно-пучковом облучении, обеспечивающем сверхвысокие скорости нагрева (до 10^6 град/с) поверхностного слоя ($10^{-7} \dots 10^{-5}$ м) напыленного покрытия значительно выше температуры плавления металлического связующего. Благодаря такой обработке значительно повышаются механические свойства покрытий.

Методические указания

Для выполнения работы студентам предоставляются следующие необходимые материалы и принадлежности: набор образцов (темплетов) напыленных и наплавленных покрытий; комплект просмотровых и измерительных луп; набор фотоизображений микроструктуры напыленных и наплавленных покрытий; комплект измерительных накладных сеток; микрокалькуляторы.

В работе требуется:

- выполнить качественный анализ макроструктуры образцов напыленных и наплавленных покрытий, приготовленных в виде темплетов (изломов), путем визуального осмотра и с помощью лупы;
- выполнить количественный анализ микроструктуры напыленных и наплавленных покрытий, представленной на микрофотографиях, с использованием техники измерительных накладных сеток.

Особенности применения техники измерительных накладных сеток для структурных исследований изложены в описании лабораторной работы «Изучение структуры композиционных металлических макрогетерогенных материалов».

При качественном исследовании макроструктуры покрытий следует обращать внимание на наличие нарушений сплошности материала, на относительные размеры, количество и характер распределения различных фаз и включений, на относительные размеры, форму и расположение зерен. Кроме того, следует оценивать толщину покрытий, характер рельефа их поверхности и состояния границы покрытие–основа.

Анализ макроструктуры проводится на заранее приготовленных образцах напыленных и наплавленных покрытий, выдаваемых преподавателем.

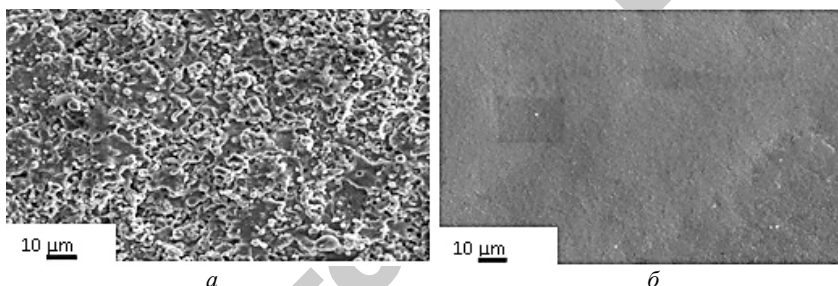
По результатам проведенных исследований следует зарисовать схемы анализируемых макроструктур и описать качественные характеристики макроструктур.

Количественный анализ микроструктуры покрытий выполняется в соответствии с предлагаемыми преподавателем индивидуальными заданиями (с учетом особенностей микроструктур, представленных на фотографиях). Типичными структурными параметрами, численные значения которых подлежат определению, являются: средняя толщина покрытия; средний размер зерен или пор покрытия, а также

их распределение по размерам; пористость; содержание структурных фаз или включений; средний размер элементов рельефа поверхности подложки, подвергнутой обработке перед напылением покрытия, и т. д.

Пример индивидуального задания по анализу микроструктуры покрытий

На фотографиях представлены микроструктуры плазменного покрытия из сплава TiC-(Ni-Cr) на стальной подложке после напыления (*а*) и после импульсной электронно-лучевой обработки (*б*), вызывающей быстрый нагрев поверхностного слоя покрытия выше температуры плавления и его последующее быстрое охлаждение, что приводит к значительному измельчению зерен покрытия.



Требуется на основе анализа микроизображений определить средний размер зерен покрытия после напыления и после электронно-лучевой обработки.

Особенности применения техники измерительных накладных сеток для микроструктурных исследований изложены в описании работы «Изучение структуры порошковых материалов».

По результатам проведенных исследований следует описать порядок определения параметров микроструктуры с указанием их численных значений.

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить основные положения работы.

3. Выполнить качественный анализ макроструктуры покрытий.
4. Выполнить количественный анализ микроструктуры покрытий.
5. Проанализировать полученные результаты.
6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о структурных особенностях напыленных и наплавленных покрытий.
3. Схематическое изображение макроструктуры покрытий и краткое описание ее качественных характеристик.
4. Краткое описание порядка определения параметров микроструктуры покрытий с указанием полученных численных значений параметров.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается различие между макро- и микроструктурой?
2. Каковы особенности технической реализации процессов получения напыленных и наплавленных покрытий?
3. Каковы особенности структуры напыленных покрытий, обусловленные процессами их получения?
4. Каковы особенности структуры наплавленных покрытий, обусловленные процессами их получения?
5. Каким видам обработки подвергается поверхность изделий для обеспечения высокой адгезионной прочности напыленных и наплавленных покрытий?

7. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИПЕКАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

Цель работы – ознакомление со структурой припекаемых покрытий.

Студент должен знать: структурные особенности припекаемых покрытий.

Студент должен уметь: анализировать структуру припекаемых покрытий.

Основные сведения [6, 8]

Существуют различные технологии нанесения порошковых покрытий: наплавка, напыление, гальваностегия. В последние годы широкое распространение получили *технологии припекания* порошковых покрытий, согласно которым покрытия из порошков наносятся путем соединения их частиц между собой и с поверхностью детали нагреванием без расплавления. Поскольку при припекании порошки не доводятся до плавления, то они сохраняют свои свойства, заложенные при их изготовлении.

Технологии припекания перспективно применять для упрочнения деталей, работающих в условиях интенсивного изнашивания. При этом для нанесения покрытий можно использовать порошки трудно деформируемых твердых сплавов, карбидов, боридов, нитридов и других материалов, обладающих высокой твердостью и прочностью.

В зависимости от способа нагрева порошка и детали припекание подразделяется на печное, индукционное, электроконтактное, лазерное.

Печное припекание осуществляется в две стадии: формирование слоя на поверхности детали и спекание детали со слоем на ее поверхности в печи. Печной нагрев обеспечивает точную выдержку температуры в течение длительного времени, т. е. контролируемое протекание процесса спекания.

Индукционное припекание отличается высокой производительностью вследствие значительного увеличения скорости спекания при нагреве током высокой частоты. Данная технология применяется, в основном, для нанесения покрытий на внутренние поверхности деталей типа втулки. При этом в полость заготовки засыпается

требуемая объемная доза порошка, после чего деталь с порошком приводится во вращение и подвергается индукционному нагреву. Порошок под действием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности вращающейся детали и распределяется по ней равномерным слоем.

Электроконтактное припекание предусматривает электронагрев порошка, помещенного между деталью и роликовым электродом, с одновременным формованием порошка в слой и спеканием его с поверхностью детали. Данная технология применяется, в основном, для нанесения покрытий на наружные поверхности деталей типа вала. При этом порошок непрерывно подается к месту контакта ролика с деталью и прокатывается между ними под действием давления, создаваемого роликом, и высоких температур, возникающих при пропускании электрического тока через порошок.

Лазерное припекание происходит путем нагрева лазерным лучом слоя порошка, нанесенного на поверхность детали. При этом слой порошка может наноситься свободной насыпкой, механическим втиранием, осаждением из суспензии, инфильтрацией или иным способом.

Индукционное и электроконтактное припекание (в силу особенностей присущих им механизмов нагрева) могут применяться для нанесения покрытий только из металлических порошков, в то время как печным и лазерным припеканием можно наносить покрытия как из металлических, так и из неметаллических (например керамических) порошков.

Технологии припекания перспективно использовать для улучшения свойств покрытий, предварительно полученных другими методами. Например, путем электроконтактного припекания можно эффективно упрочнять крупногабаритные детали, оплавление которых после нанесения на них газотермических покрытий практически невозможно. Кроме того, подвергая детали с предварительно напыленными покрытиями воздействию давления с одновременным пропусканием электрического тока, можно существенно повышать прочностные характеристики этих покрытий, по которым они будут превосходить аналогичные оплавленные покрытия.

Свойства припекаемых покрытий в значительной мере определяются их микроструктурой, которая, в свою очередь, зависит от условий их получения, в частности, от особенностей спекания частиц

порошка. В этом отношении формирование структуры припекаемых покрытий во многом подобно формированию структуры порошковых материалов (см. описание лабораторной работы «Изучение структуры порошковых материалов»). Вместе с тем следует отметить, что при получении припекаемого покрытия важно обеспечить образование надежных контактов частиц порошка не только между собой (как это имеет место при получении порошковых материалов), но и с поверхностью основы, на которую наносится покрытие.

Спекание частиц порошка в виде слоя и припекание этого слоя к основе происходят за счет развития процессов диффузии и сплавления, интенсивность которых возрастает с повышением роли факторов температурного и силового активирования порошка и поверхности основы. Температурное активирование заключается в ускоренном нагреве, в кратковременном создании локальных температур, превышающих температуру плавления, а также в снижении температуры плавления за счет введения активирующих присадок. Силовое активирование заключается в создании условий, при которых обеспечивается наиболее плотная упаковка частиц, их наиболее тесное прижатие друг к другу и к поверхности основы по наиболее возможным площадям взаимных контактов за счет перегруппировки и деформирования частиц под действием приложенных к ним сил давления. Так, при индукционном припекании такое прижатие обеспечивается за счет центробежных сил, при электроконтактном припекании – за счет сил давления, действующих со стороны ролика.

При спекании порошков большое значение имеют величина температуры и длительность температурного воздействия. Особенно важная роль отводится соотношению этих параметров при получении покрытий методами электроконтактного и лазерного припекания. Обычно в этих методах порошок и основа подвергаются высокотемпературному нагреву в течение короткого промежутка времени, которого явно недостаточно для реализации спекания по твердофазному механизму, поэтому имеется, в основном, жидкофазное спекание. Таким образом, для обеспечения надежного контакта между порошком и основой необходимо вызвать поверхностное оплавление частиц порошка и (или) основы. В этом случае образовавшийся расплав обеспечит связывание частиц порошка между собой, а также с подложкой.

Для надежного припекания частиц порошка к основе необходимо, чтобы материалы порошка и основы имели физико-химическое сродство. Так, при лазерном припекании важно обеспечить хорошее смачивание основы расплавом частиц или же частиц – расплавом основы. Очевидно, что смачивание будет наилучшим, когда порошок и основа состоят из того же материала либо из разных материалов, подобных по составу.

Если порошок и основа состоят из разнородных материалов, существенно различающихся температурами плавления, то обычно оплавлению подвергается либо порошок, либо подложка (в зависимости от того, у которого из них эта температура меньше). Если порошок и основа состоят из одного и того же материала или из разных материалов с температурами плавления, то возможно одновременное оплавление и порошка и основы. В этом случае следует учитывать, что основа (особенно выполненная из металла) является сильным источником теплоотвода. Поэтому на практике не исключена ситуация, при которой стремление вызвать оплавление основы ведет к полному плавлению порошка. Во избежание этого необходимо обеспечивать достаточно эффективный нагрев и порошка и основы одновременно.

Микроструктура припекаемых покрытий (как и порошковых материалов) в значительной мере определяется размерами частиц исходных порошков, их формой и рельефом поверхности. В частности, размер частиц является особо важным параметром процесса электроконтактного припекания (с учетом кратковременности температурного воздействия в этом процессе).

В ходе спекания частицы порошка объединяются в агрегаты, мелкие частицы поглощаются более крупными частицами. Из-за того, что частицы соединяются в отдельных контактирующих точках поверхности с формированием контактных перешейков, между частицами, а также между их агрегатами неизбежно образуются поры, так что в целом припекаемые покрытия характеризуются пористой структурой.

Методические указания

Для выполнения работы студентам предоставляются следующие необходимые принадлежности: компьютерный микроскоп с набором

электронных фотоизображений микроструктуры припекаемых покрытий и программным обеспечением для обработки изображений; комплект измерительных накладных сеток; набор печатных фотоизображений микроструктуры припекаемых покрытий.

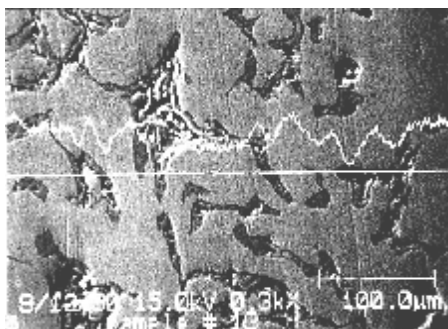
В работе требуется выполнить количественный анализ микроструктуры припекаемых покрытий, представленной на фотографиях в электронном виде (с использованием техники компьютерной микроскопии) и в печатном виде (с использованием техники измерительных накладных сеток).

Количественный анализ микроструктуры покрытий выполняется в соответствии с предлагаемыми преподавателем индивидуальными заданиями (с учетом особенностей исследуемых микроструктур). Типичными структурными параметрами, численные значения которых подлежат определению, являются: средняя толщина покрытия; средний размер зерен или пор покрытия, а также их распределение по размерам; пористость; содержание структурных фаз или включений и т. д.

Пример индивидуального задания по анализу микроструктуры покрытий

На фотографии представлена микроструктура покрытия из порошка железа на стальной подложке, полученного электроконтактным припеканием.

Требуется на основе анализа микроизображения определить средний размер армирующих наночастиц и их распределение по размерам с использованием техники компьютерной микроскопии (или техники измерительных накладных сеток).



Особенности применения техники компьютерной микроскопии изложены в Руководстве по программному обеспечению для обработки изображений и видео «ScorePhoto».

Особенности применения техники измерительных накладных сеток для структурных исследований изложены в описании лабораторной работы «Изучение структуры порошковых материалов».

По результатам проведенных исследований следует описать порядок определения параметров микроструктуры с указанием их численных значений.

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Выполнить количественный анализ микроструктуры припечаемых покрытий, представленной на микрофотографиях.
3. Проанализировать полученные результаты.
4. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о технологиях нанесения припечаемых покрытий.
3. Краткое описание порядка определения параметров микроструктуры покрытий с указанием полученных численных значений.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие разновидности процессов получения припечаемых покрытий вы знаете? В чем состоит их техническая сущность?
2. В чем заключается температурное активирование при реализации процессов припекания?
3. В чем заключается силовое активирование при реализации процессов припекания?
4. Каковы особенности структуры припечаемых покрытий, обусловленные процессами их получения?
5. Какими технологическими факторами определяется адгезионная прочность припечаемых покрытий?
6. Каковы особенности свойств припечаемых покрытий, обусловленные процессами их получения?

8. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Цель работы – изучение технологических процессов нанесения гальванических упрочняющих покрытий.

Студент должен знать: разновидности гальванических покрытий, особенности технологий их нанесения; принцип рационального выбора видов процессов нанесения гальванических покрытий с учетом функционального назначения покрытий.

Студент должен уметь: разрабатывать типовые технологические процессы нанесения гальванических покрытий; осуществлять рациональный выбор вида процесса нанесения гальванических покрытий с учетом их функционального назначения.

Основные сведения [6, 8]

Гальванические (электрохимические) покрытия представляют собой металлические пленки толщиной от долей микрометра до десятых долей миллиметра, наносимые на поверхность металлических изделий электролитическим путем для придания им твердости, износостойкости, антифрикционных, антикоррозийных, декоративных свойств.

Гальванические покрытия формируются в процессе электролиза в результате осаждения на катоде (в роли которого выступает основное изделие) положительно заряженных ионов металлов при пропускании через водный раствор их солей постоянного электрического тока. При этом соли металлов распадаются на ионы, которые под действием электрического поля направляются к разным электрическим полюсам: отрицательно заряженные ионы кислотных остатков – к аноду, а положительно заряженные ионы металлов – к катоду, т. е. к изделию.

Технологический процесс нанесения гальванических покрытий (гальванизация) включает три основных этапа: подготовку поверхности к нанесению покрытия, осаждение покрытия, обработку нанесенного покрытия. Подготовка поверхности к нанесению покрытия в общем случае включает следующую последовательность операций: механическая обработка, промывка, обезжиривание, промывка, активирование (декапирование), промывка. В свою очередь, обработка нанесенного покрытия в общем случае

включает следующую последовательность операций: промывка, пассивирование, промывка, сушка.

В зависимости от назначения конкретного покрытия могут использоваться различные сочетания и различные виды операций подготовки поверхности к нанесению покрытия и обработки нанесенного покрытия.

Механическая обработка поверхности, как правило, включает шлифование и последующее полирование. Шлифование применяется для устранения царапин, забоин, рисок и других дефектов на поверхности деталей, а также для получения гладкой и ровной поверхности, полирование – для сглаживания мельчайших неровностей предварительно шлифованной поверхности, получения блестящей (зеркальной) поверхности.

Шлифование и полирование осуществляются на шлифовально-полировальных станках. Используемые на этих станках шлифовальные и полировальные круги изготавливают из войлока, бязи, брезента, сукна, байки и других материалов, на рабочую поверхность которых наносят абразив, удерживаемый специальной связкой. Для проведения полирования применяются специальные тонкие абразивные материалы вместе со связующими веществами, называемые полировальными пастами.

К другим видам механической обработки поверхности перед гальванизацией относятся: струйно-абразивная обработка (обработка деталей струей сжатого воздуха с абразивным материалом), галтовка (обработка деталей во вращающейся емкости совместно с абразивным материалом), крацевание (обработка деталей при помощи металлических щеток).

Обезжиривание применяется для снятия с поверхности пленок органических жиров и минеральных масел, а также различных твердых загрязнений (мелкой металлической и минеральной пыли), удерживаемых на поверхности жировой или масляной пленкой. Обезжиривание осуществляется химическим или электрохимическим способом. Химическое обезжиривание основывается на взаимодействии с жирами органических растворителей или растворов щелочей, приводящих к их растворению, омылению или образованию эмульсий. Электрохимическое обезжиривание проводят под воздействием постоянного тока в щелочных растворах, подобных тем, которые используют для химического обезжиривания.

Отличительная особенность электрохимического обезжиривания состоит в его более высокой интенсивности, обусловленной особой ролью газовых пузырьков, выделяющихся на электродах, которые не только способствуют отрыву слоя загрязнений от поверхности, но и облегчают их эмульгирование.

Активирование (декапирование) проводится для обеспечения прочного сцепления покрытия с основным металлом. Поверхность деталей активируется путем травления слабыми растворами кислот, в результате чего с поверхности удаляются тонкие окисные пленки, ухудшающие сцепление покрытия с основой.

Пассивирование представляет собой процесс образования на поверхности металла устойчивых к коррозии оксидных пленок. Такие защитные (пассивные) пленки, обеспечивающие резкое уменьшение скорости коррозии в сильных окислителях, образуются, например, в результате обработки некоторых покрытий на основе ряда металлов (железа, алюминия, хрома, ванадия и др.) концентрированными азотной и серной кислотами. Пассивирование цинковых покрытий проводят путем обработки в растворе хромовой кислоты (такой процесс называется хроматированием). Пассивные пленки также способствуют улучшению внешнего вида покрытий.

Сушка проводится после нанесения гальванического покрытия и соответствующих промывок в холодной и горячей воде для полного удаления влаги с поверхности и пор в нанесенном покрытии. Толстостенные массивные детали простой конфигурации сушат на воздухе при температуре 15...30 °С, а сложной конфигурации – обдувкой сжатым воздухом при 15...60 °С. Детали, обрабатываемые на подвесках, сушат в сушильной камере с циркуляцией воздуха, нагретого до температуры 105...115 °С. Мелкие детали, обрабатываемые насыпью, сушат в центрифуге при температуре 70 °С или специальных движущихся ситах, шнековых устройствах, конвейерах с циркуляцией воздуха, нагретого до температуры 105...115 °С.

Промывка проводится с целью тщательно удалить с поверхности изделий растворы и другие продукты от предыдущих операций механической обработки, обезжиривания, активирования и пассивирования. Как правило, после механической обработки, активирования и нанесения покрытия проводят промывку в проточной

холодной воде, после обезжиривания – в горячей, а после пассивирования (перед сушкой) – в холодной, а затем в горячей.

Если промывки в воде оказывается недостаточно (например, после активирования и пассивирования), то покрытия подвергаются *нейтрализации*, в результате которой удаляются кислоты, оставшиеся на поверхности и в порах покрытий. Нейтрализация проводится путем обработки в растворе углекислого натрия.

Существуют разнообразные методы нанесения гальванических покрытий, из них наиболее распространенными являются: хромирование, железнение, никелирование, меднение, цинкование, кадмирование.

Хромирование обеспечивает весьма значительные упрочняющие эффекты. Оно существенно увеличивает твердость, износостойкость и жаростойкость металлических изделий. Хромовые покрытия обладают большой стойкостью против воздействия кислот и щелочей, а также отличаются высокой прочностью сцепления с основным металлом.

Хромирование широко применяется для повышения износостойкости деталей двигателей внутреннего сгорания, металлообрабатывающих станков, пневматических и режущих инструментов, шаблонов, форм для отливки под давлением и других деталей, подвергаемых сильному механическому износу. Благодаря высокому сопротивлению механическому износу, коррозии и стойкости к высоким температурам хромовые покрытия эффективно наносятся на детали паросилового оборудования, пароводяной арматуры, клапанов, вентилей патрубков, а также другие детали, работающие на износ в агрессивных средах и при повышенном нагреве. Хромовые покрытия имеют небольшой коэффициент трения и могут использоваться для придания антифрикционных свойств поверхности. Хромирование также применяется для декоративной отделки поверхности деталей.

Недостатками процессов хромирования являются их сравнительно высокая стоимость и малая производительность. Поэтому восстановление деталей хромированием целесообразно применять при наращивании слоем, как правило, не превышающим 0,2...0,3 мм, так как хромирование деталей с более значительным износом на сторону обходится довольно дорого.

Железнение является эффективным способом восстановления деталей. Его широко применяют как средство наращивания металла на изношенную поверхность стальных и чугунных изделий. Скорость наращивания слоя довольно высокая, производительность железнения в 10 раз выше, чем хромирования. Компоненты электролитов, используемых для железнения, довольно дешевы и легкодоступны. Поэтому в ремонтной практике при восстановлении деталей с большим износом применяют железнение (осталивание) как более экономичный способ, чем хромирование. При этом толщина наращиваемого слоя железа может достигать нескольких миллиметров. Вместе с тем железнение обеспечивает меньшую износостойкость восстановленных деталей по сравнению с хромированием. Поэтому для повышения износостойкости рекомендуется после железнения проводить дополнительно хромирование поверхностей.

Железнением восстанавливают стержни клапанов, толкатели, валики привода масляного или водяного насосов, валы и оси трансмиссий, шкивы, ступицы и другие детали машин. Кроме этого, железнением устраняют дефекты литья (раковины, углубления и т. д.).

Никелирование применяется для повышения износостойкости и коррозионной стойкости изделий. Никелевые покрытия наносятся на сталь, цветные металлы и сплавы. Особенно эффективны покрытия из никель-фосфорных сплавов, которые характеризуются высокой твердостью и износостойкостью. Их применяют для упрочнения и восстановления изношенных шпинделей металлообрабатывающих станков, коленчатых валов, поршневых пальцев, гильз цилиндров и других деталей. Благодаря высокой коррозионной стойкости в растворах щелочей никелевые покрытия применяют для защиты химических аппаратов от щелочных растворов. Их также применяют для декоративной отделки поверхности деталей.

Меднение проводится для улучшения приработки трущихся деталей, уплотнения зазоров, восстановления изношенных поверхностей, повышения способности к пайке, а также для создания на поверхности металла токопроводящего слоя с малым электросопротивлением. Медные покрытия играют заметную роль благодаря своей пластичности и свойству легко полироваться. Особое значение меднение приобретает в многослойных покрытиях, где образует

промежуточные слои между основным металлом и покрытиями из других металлов.

Цинкование является одним из наиболее распространенных гальванических методов. Это объясняется тем, что цинковое покрытие весьма устойчиво против воздействия атмосферы и воды, а сам процесс цинкования относительно дешев и прост. Цинкованию подвергаются поверхности стальных деталей, прежде всего, для повышения коррозионной стойкости. Цинком покрывают пружины, втулки, шайбы, винты, болты, листы проката и многие другие изделия. Цинковые покрытия широко применяются для декоративной отделки поверхности изделий.

Кадмирование применяется, подобно цинкованию, для получения антикоррозионных и декоративных покрытий деталей из стали, а также цветных металлов. Кадмиевые покрытия по сравнению с цинковыми лучше защищают от коррозии в условиях воздействия атмосферы, насыщенной морскими испарениями и соевыми брызгами, однако являются более дорогими. Кадмиевые покрытия отличаются высокой эластичностью и паяемостью.

Основным видом оборудования гальванических цехов являются гальванические ванны и ванны для химической обработки (обезжиривания, активирования, пассивирования) с соответствующими рабочими растворами, а также ванны для промывки с холодной или горячей водой. Важным конструктивным элементом гальванических ванн являются электродные штанги, которые служат для подвода и равномерного распределения тока к деталям и анодам. Ванны по способу загрузки принято разделять на две группы: ванны с ручной загрузкой (стационарные) и ванны с механизированной загрузкой.

Ванны располагаются в составе технологических линий в соответствии с последовательностью выполняемых технологических операций. Детали, на которые наносятся покрытия, размещаются на подвесных приспособлениях. Перемещение подвесок с деталями вдоль линии, а также их погружение в ванны и извлечение из них осуществляется с помощью специальных подъемно-транспортных устройств. Монтаж деталей на подвески проводится после механической обработки, а демонтаж деталей с подвесок – после сушки.

Нанесенные покрытия после завершения их обработки подвергаются контролю по толщине и качеству. Контроль качества покрытия

проводится наружным осмотром при помощи лупы и сравнивается качество поверхности с эталоном. При необходимости проверяется твердость покрытия. Если покрытия отслаиваются, имеют трещины, раковины, полосы, то их бракуют.

Методические указания

Для выполнения работы студентам предоставляется видеофильм, демонстрирующий технологические процессы нанесения гальванических покрытий.

В работе требуется:

- разработать типовой технологический процесс нанесения гальванических покрытий;
- осуществить рациональный выбор видов процессов нанесения гальванических покрытий с учетом функционального назначения покрытий.

Разработка типового технологического процесса нанесения гальванических покрытий проводится на основе анализа сведений, представленных в разделе 1, а также в видеофильме; она включает разработку маршрутной карты технологического процесса, которую следует составлять в представленной ниже учебной форме, позволяющей в упрощенном виде отразить основную информацию, связанную с технологическим маршрутом.

№ операции	Наименование операции	Оборудование, приспособления
1	2	3

Рациональный выбор процессов нанесения гальванических покрытий осуществляется на основе анализа сведений, представленных в разделе 1, в соответствии с предлагаемыми преподавателем вариантами индивидуальных заданий, в которых указывается назначение выбираемых покрытий.

Сведения о выбранных видах процессов нанесения гальванических покрытий следует представить в виде таблицы:

Назначение покрытий	Виды процессов нанесения покрытия

**Пример представления сведений о выбранных видах процессов
нанесения гальванических покрытий**

Назначение покрытий	Вид процесса нанесения покрытия
1. Увеличение износостойкости деталей	Хромирование, никелирование

**Варианты индивидуальных заданий по рациональному выбору
процессов нанесения гальванических покрытий**

№ задания	Назначение покрытия
1	1. Увеличение поверхностной твердости и износостойкости деталей, работающих в условиях сильного износа. 2. Увеличение поверхностной твердости, износостойкости и коррозионной стойкости деталей. 3. Улучшение прирабатываемости трущихся деталей
2	1. Увеличение поверхностной твердости и износостойкости деталей, работающих в условиях сильного износа в агрессивных средах. 2. Восстановление размеров изношенных деталей с большой величиной износа. 3. Улучшение паяемости деталей
3	1. Увеличение поверхностной твердости и износостойкости деталей, работающих в условиях сильного износа при высоких температурах. 2. Устранение дефектов литья деталей. 3. Декоративная отделка деталей
4	1. Увеличение поверхностной твердости и износостойкости деталей, работающих в условиях сильного износа в агрессивных средах и при высоких температурах. 2. Восстановление размеров изношенных деталей. 3. Увеличение коррозионной стойкости и декоративная отделка деталей
5	1. Восстановление размеров изношенных деталей с малой величиной износа. 2. Увеличение коррозионной стойкости деталей. 3. Уплотнение зазоров между сопряженными деталями

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить основные положения работы и просмотреть видеофильм.
3. Разработать типовой технологический процесс нанесения гальванических покрытий.
4. Осуществить рациональный выбор процессов нанесения гальванических покрытий с учетом функционального назначения покрытий и внести сведения о выбранных процессах в таблицу.
5. Проанализировать полученные результаты.
6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о технологии нанесения и свойствах гальванических покрытий.
3. Маршрутная карта технологического процесса нанесения гальванических покрытий.
4. Таблица, содержащая сведения о выбранных видах процессов нанесения гальванических покрытий.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой гальванические покрытия?
2. Какие разновидности процессов нанесения гальванических покрытий вы знаете?
3. Дайте сравнительную характеристику свойств и особенностей применения различных видов гальванических покрытий.
4. Какова структура технологического процесса нанесения гальванических покрытий?
5. Назовите последовательность операций подготовки поверхности к нанесению гальванических покрытий.
6. Назовите последовательность операций обработки нанесенных гальванических покрытий.
7. Какое оборудование для нанесения гальванических покрытий вы знаете?

9. РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Цель работы – приобретение навыков выбора сталей для деталей машин, обеспечивающих повышение прочностных свойств деталей с учетом условий их эксплуатации.

Студент должен знать: классификацию, маркировку, свойства и области применения сталей; принципы рационального выбора сталей для изготовления деталей машин.

Студент должен уметь: осуществлять рациональный выбор сталей для деталей машин при проектировании технологических процессов машиностроительного производства с учетом требований обеспечения прочностных свойств деталей.

Основные сведения [3, 32]

В современном машиностроении, том числе в сельхозмашиностроении, применяются следующие конструкционные материалы: сталь, чугун, цветные металлы и сплавы, спеченные материалы, пластмассы, дерево, техническая резина, а также различные виды покрытий. Выбор материала определяется, в первую очередь, условиями эксплуатации.

Детали машин и приборов, передающих нагрузку, должны обладать жесткостью и прочностью, достаточными для ограничения упругой и пластической деформации при гарантированной надежности и долговечности. Из многообразия материалов в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют сплавы на основе железа – особенно стали. Стали обладают высоким, наследуемым от железа, модулем упругости ($E = 2,1 \cdot 10^6$ МПа) и, тем самым, высокой жесткостью, уступая в этом лишь бору, вольфраму, молибдену, бериллию, которые из-за высокой стоимости используются только в специальных случаях. Высокая жесткость и доступность обуславливают широкое применение сталей для изготовления строительных металлоконструкций, корпусных деталей, ходовых винтов станков, различных валов, зубчатых колес и многих других деталей машин. Высокую жесткость стали сочетают с достаточной статической и циклической прочностью, значение которой можно регулировать

в широком диапазоне изменением концентрации углерода, легирующих элементов и технологии термической и химико-термической обработки.

Применяемые в технике сплавы на основе меди, алюминия, магния, титана, а также пластмассы уступают стали по жесткости, прочности или надежности. Кроме комплекса этих важных для работоспособности деталей свойств, стали могут обладать и рядом других ценных качеств, делающих их универсальным материалом. При соответствующем легировании и технологии термической обработки сталь становится износостойкой либо коррозионно-стойкой, либо жаростойкой и жаропрочной, а также приобретает особые магнитные, тепловые или упругие свойства. Стали также характеризуются хорошими технологическими свойствами.

Вследствие этих достоинств, сталь – основной металлический материал промышленности. Большое разнообразие химического состава стали позволяет получать различные свойства сталей и удовлетворять запросы многих отраслей техники.

Выбор материала для конкретной детали определяется следующими основными факторами:

- служебным назначением детали; например, для почвообрабатывающих орудий необходим износостойкий материал, а для трущихся поверхностей – антифрикционный и т. п.;

- способом соединения детали с другими деталями; например, не следует соединять детали из алюминиевых сплавов стальными деталями крепежа, так как это приводит к быстрому разрушению алюминиевых изделий из-за активной электрохимической коррозии;

- условиями получения заготовки, а из нее – детали; например, для деталей, получаемых гибкой из листа, усилие гибки должно быть выше предела текучести σ_T материала, но ниже предела прочности σ_B , а при резке на прессовых штампах усилие пресса должно превышать σ_B и т. д.;

- конфигурацией детали; например, детали сложной конфигурации предпочтительнее получать литьем, следовательно, для таких деталей необходимы материалы, позволяющие получать качественные отливки: сталь, чугун, силумины и т. д.

- при выборе заготовки следует широко использовать прокат, сортамент которого весьма разнообразен (прилож. 1).

Кроме того, приступая к выбору материала, необходимо учитывать, что, в общем случае, черные сплавы дешевле цветных. Если в требованиях к изделию не содержится особых условий, то должен быть выбран такой материал, стоимость которого минимальна. Здесь также следует помнить, что при массовом и крупносерийном способах производства выгоднее применить литье и штамповку, а при мелкосерийном и индивидуальном – обработку резанием.

Таким образом, выбор материала есть многовариантная задача.

Классификация сталей

Сталью называется сплав железа с углеродом (до 2,14 % C). Кроме углерода, в стали содержатся постоянные примеси (кремний, марганец, фосфор и сера).

Углерод является важнейшей примесью, определяющей механические, физические, химические, технологические и эксплуатационные свойства стали. Углерод определяет структуру стали и, соответственно, вызывает значительное изменение ее свойств. С увеличением в стали углерода увеличиваются предел прочности при растяжении σ_b и твердость по Бринеллю *HB*, уменьшаются относительное удлинение δ , относительное сужение ψ , ударная вязкость *KCU* и плотность γ , увеличивается удельное электросопротивление ρ .

Кремний в углеродистой стали не превышает 0,4 %. Он растворяется в феррите, повышает прочность, твердость, упругость, снижает пластичность стали, а главное, хорошо раскисляет ее.

Марганец в углеродистой стали составляет 0,25...0,80 %. Он раскисляет сталь, растворяется в феррите и частично образует карбиды, и этим самым повышает прочность, твердость, упругость, снижает пластичность стали.

Содержание *фосфора* в стали не должно превышать 0,05 %. Растворяясь в феррите, он резко снижает его пластичность и вызывает хладноломкость.

Сера в стали не превышает 0,05 %. Она нерастворима в феррите, но образует сульфид железа FeS, который вызывает красноломкость стали.

Стали классифицируются по способу производства, назначению, химическому составу, структуре и качеству.

По *назначению* различают конструкционные, инструментальные и специальные стали. Конструкционные стали объединяют машиностроительные, машиностроительные специального назначения, строительные.

Специальные стали объединяют – специальные с особыми физическими свойствами и специальные с особыми химическими свойствами.

По *химическому составу* различают углеродистые и легированные стали, по содержанию углерода – малоуглеродистые (до 0,25 % С), среднеуглеродистые (0,25...0,60 % С), высокоуглеродистые (0,60...1,30 % С).

По *качеству* стали классифицируют на стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные, содержащие фосфора и серы в суммарном количестве не более 0,10, 0,08 и 0,05 % соответственно.

По *прочности*, оцениваемой временным сопротивлением, конструкционные стали с некоторой условностью можно разделить на стали нормальной (средней) прочности ($\sigma_b \sim$ до 1000 МПа), повышенной прочности ($\sigma_b \sim$ до 1500 МПа) и высокопрочные ($\sigma_b \sim$ более 1500 МПа).

Легированной называется сталь, содержащая один или несколько специально вводимых элементов, заметно изменяющих ее структуру и свойства.

Низколегированные стали содержат в сумме до 3 % легирующих элементов, среднелегированные – от 3 до 10 %, высоколегированные – свыше 10 %. По структуре легированные стали подразделяют на 5 классов: ферритный, перлитный, аустенитный, мартенситный и карбидный.

Легирующие элементы вводят для повышения конструкционной прочности стали. Легированные стали производят качественными, высококачественными или особо высококачественными. Их применяют после закалки и отпуска, поскольку в отожженном состоянии они по механическим свойствам практически не отличаются от углеродистых.

Улучшение механических свойств обусловлено влиянием легирующих элементов на свойства феррита, дисперсность карбидной

фазы, устойчивость мартенсита при отпуске, прокаливаемость, размер зерна.

Маркировка и применение углеродистых сталей

Углеродистые стали делятся на конструкционные и инструментальные. Конструкционные углеродистые стали, в свою очередь, делятся на стали обыкновенного качества и качественные.

Углеродистые стали обыкновенного качества

Углеродистая сталь обыкновенного качества предназначена для изготовления горячекатаного проката: сортового, фасонного, толстолистового, тонколистового, широкополосного и холоднокатаного тонколистового, а также слитков, блюмов, слябов, заготовки катаной и непрерывнолитой, труб, поковок и штамповок, лент, проволоки, метизов и др.

Углеродистая сталь обыкновенного качества в соответствии с ГОСТ 380–2005 маркируется буквами «Ст», что обозначает «Сталь» и цифрой (от 0 до 6), которая обозначает условный номер марки в зависимости от химического состава. Стоящие после цифры буква «Г» (в некоторых марках) и буквы «кп», «пс», «сп» обозначают: буква «Г» – марганец при его массовой доле в стали 0,80 % и более, буквы «кп», «пс», «сп» – степень раскисления стали: «кп» – кипящая, «пс» – полуспокойная, «сп» – спокойная.

Раскисление – процесс удаления из жидкого металла кислорода, проводимый для предотвращения хрупкого разрушения стали при горячей деформации.

Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно без газовыделения. Кипящие стали раскисляют только марганцем. Перед разливкой в них содержится повышенное количество кислорода, который при затвердевании, частично взаимодействуя с углеродом, удаляется в виде CO. Выделение пузырей CO создает впечатление кипения стали, с чем и связано ее название. Кипящие стали дешевы, их производят низкоуглеродистыми и практически без кремния (менее 0,07 %), но с повышенным количеством газообразных примесей.

Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

Химический состав стали (основные элементы) по анализу ковшевой пробы должен соответствовать нормам, указанным в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %		
	Углерод	Марганец	Кремний
Ст 0	Не более 0,23	—	—
Ст 1кп	0,06–0,12	0,25–0,50	Не более 0,05
Ст 1пс	0,06–0,12	0,25–0,50	0,05–0,15
Ст 1сп	0,06–0,12	0,25–0,50	0,15–0,30
Ст 2кп	0,09–0,15	0,25–0,50	Не более 0,05
Ст 2пс	0,09–0,15	0,25–0,50	0,05–0,15
Ст 2сп	0,09–0,15	0,25–0,50	0,15–0,30
Ст 3кп	0,14–0,22	0,30–0,60	Не более 0,05
Ст 3пс	0,14–0,22	0,40–0,65	0,05–0,15
Ст 3сп	0,14–0,22	0,40–0,65	0,15–0,30
Ст 3Гпс	0,14–0,22	0,80–1,10	Не более 0,15
Ст 3Гсп	0,14–0,20	0,80–1,10	0,15–0,30
Ст 4кп	0,18–0,27	0,40–0,70	Не более 0,05
Ст 4пс	0,18–0,27	0,40–0,70	0,05–0,15
Ст 4сп	0,18–0,27	0,40–0,70	0,15–0,30
Ст 5пс	0,28–0,37	0,50–0,80	0,05–0,15
Ст 5сп	0,28–0,37	0,50–0,80	0,15–0,30
Ст 5Гпс	0,22–0,30	0,80–1,20	Не более 0,15
Ст 6пс	0,38–0,49	0,50–0,80	0,05–0,15
Ст 6сп	0,38–0,49	0,50–0,80	0,15–0,30

Примерное назначение конструкционной углеродистой стали обыкновенного качества приведено в табл. 2.

Примерное назначение углеродистой стали обыкновенного качества

Марка стали	Примерное назначение
Ст 0 Ст 1кп Ст 1пс Ст 2кп Ст 2пс Ст 3кп	Для изготовления строительных конструкций неотвечественного назначения: ограждений, прокладок, шайб. Для изготовления деталей высокой вязкости, не подвергающихся действию больших напряжений: анкерных болтов, гнутых профилей. Для арматуры периодического профиля диаметром от 6 до 90 мм. Гайки, клинья, чеки, шпонки, крюки, пластины цепей
Ст 2сп Ст 3пс Ст 3сп Ст 4кп Ст 4пс	Для менее ответственных деталей, рычагов, угольников, щитов, без их термической обработки. Для фасонных специальных профилей. Для деталей средних напряжений: звездочек, шайб, упоров подшипников, деталей, применяемых в термически обработанном состоянии (после нормализации или улучшения)
Ст 3Гсп Ст 4сп Ст 5пс Ст 5сп Ст 5Гпс Ст 6пс Ст 6сп	Кожухи, штампованные детали, шплинты, кулачки зубьев барабанов, шестерен, пальцев поршней (при низких удельных давлениях), в термически обработанном состоянии, валы, оси, втулки, фланцы

Углеродистые качественные стали

По ГОСТ 1050–88 эти стали делятся на две группы: I-я – с нормальным содержанием Mn (до 0,6 %) и II-я – с повышенным содержанием Mn (0,8...1,0 %).

Стали I-й группы отличаются от сталей обыкновенного качества пониженным содержанием серы и фосфора (до 0,03 %), а также соблюдением всех металлургических стандартов качества стали (ограниченное содержание газов, неметаллических включений и т. д.).

Максимальное содержание углерода в рассматриваемых сталях – 0,85 %, минимальное – 0,05 %. Маркируются такие стали в соответствии с содержанием углерода в сотых долях процента 05,

08, 10, 15-85. Механические свойства углеродистых качественных сталей представлены в табл. 3.

Таблица 3

Механические свойства углеродистых качественных сталей

Марка стали	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	Твердость по Бринеллю в состоянии поставки, <i>HB</i>	Твердость по Бринеллю после отжига, <i>HB</i>
1	2	3	4	5	6
Группа I					
05кп	—	—	—	—	—
08кп	300	180	35	131	—
08	330	200	33	131	—
10кп	320	190	33	137	—
10	340	210	31	137	—
15кп	360	210	29	143	—
15	380	230	27	143	—
20кп	420	250	25	156	—
20	420	250	25	156	—
25	460	280	23	170	—
30	500	300	21	179	—
35	540	320	20	187	—
40	580	340	19	217	187
45	610	360	16	241	197
50	640	380	14	241	207
55	660	390	13	255	217
60	690	410	12	255	229
65	710	420	10	255	229
70	730	430	9	269	229
75	1100	900	7	285	241
80	1100	950	6	285	241
85	1150	1000	6	302	255
Группа II					
15Г	420	250	26	163	—
20Г	460	280	24	197	—
25Г	500	300	22	207	—

1	2	3	4	5	6
30Г	550	320	20	217	—
35Г	570	340	18	229	197
40Г	600	360	17	229	207
50Г	660	380	15	241	217
60Г	710	420	11	269	229
65Г	750	440	9	285	229
70Г	800	460	8	285	229

Из сталей этой группы изготавливаются самые разнообразные детали, подвергаемые термической и химико-термической обработке. Причем, стали с содержанием углерода до 0,25 %, как известно, не закаляются, а их низкие прочностные свойства не позволяют использовать их для изготовления деталей машин и конструкций без дополнительной упрочняющей обработки. В качестве такой обработки используется холодное деформирование или цементация. Цементуемые стали подвергаются еще и закалке с низким отпуском. В результате они имеют высокую твердость поверхности (~60 *HRC* на глубине до 1,5 мм) и не упрочненную сердцевину с высокой пластичностью и вязкостью. Конструкционные качественные стали с более высоким содержанием углерода упрочняются термообработкой – улучшением (закалка и высокий отпуск на сорбитную структуру с твердостью около 25...30 *HRC* соответствующей высокой вязкости).

Стали этой группы нашли широкое применение для изготовления деталей сельхозмашин благодаря не только своим высоким эксплуатационным характеристикам, но и хорошим технологическим свойствам: стали с низким содержанием углерода хорошо штампуются (05, 08, 10, 15кп) и свариваются (10, 15кп, 20кп, 25), более высоким – хорошо льются (30Л–70Л).

Цементуемые углеродистые стали (10, 15, 20) после цементации применяют для изготовления деталей относительно небольших размеров, работающих на износ при малых нагрузках, когда прочность сердцевины не влияет на эксплуатационные свойства (втулки, валы, оси, шпильки и пр.). Из среднеуглеродистых сталей (35, 40, 45) изготавливают детали, испытывающие небольшие напряжения (сталь 35),

и детали, требующие повышенной прочности (стали 40, 45). С увеличением сечения детали механические свойства снижаются, так как эти стали обладают низкой прокаливаемостью. Средненагруженные детали из сталей 40, 45, не работающие на износ (тяги, рычаги, шатуны, гайки и проч.), подвергают улучшению. Детали, от которых требуется повышенная твердость (шпиндели, валы, оси, шайбы и т. п.), закаливают и отпускают на твердость 40...50 HRC. Детали, от которых требуется высокая поверхностная твердость, подвергаются закалке с нагревом ТВЧ. Этот способ закалки получил широкое распространение и дал возможность их использовать также для ответственных деталей (коленчатые валы, распределительные валики, звездочки, зубья и др.).

Стали II-й группы с повышенным содержанием Mn (до 1 %) относятся к углеродистым сталям.

Среди конструкционных углеродистых сталей можно выделить несколько функциональных групп сталей со специальными технологическими свойствами.

Стали для отливок. Многие машиностроительные предприятия имеют собственные сталелитейные цеха. Специфика такого производства не позволяет выплавлять высококачественные конструкционные стали. Такие стали содержат повышенное количество серы и фосфора (для электростали – до 0,06 %) и имеют в конце маркировки букву «Л»: 20Л, 25Л, 30Л, 35Л, 45Л, 53Л, 65Л, 70Л. Стали этой категории идут на изготовление разнообразных деталей, подлежащих механической и термической обработке. Из них получают, как правило, изделия сложной конфигурации, не испытывающие больших знакопеременных нагрузок и удельных давлений: кронштейны, головки шарниров, звездочки и т. п. При этом многие детали подвергают закалке ТВЧ (звездочки из стали 35Л закаливают на твердость HRC 40..50 на глубину 2...3 мм) или наплавке специальными материалами. Так, например, лемех плуга изготавливается из сталей 53Л или 65Л. Лезвие лемеха закаливается в воде до HRC 47...59, отпуск проводят при 350 °С. Затем для повышения износостойкости лезвия с обеих его сторон наплавляется сплав повышенной твердости толщиной 1,7 мм. Из тех же сталей может изготавливаться и полевая доска корпуса плуга.

Листовая сталь для глубокой вытяжки. Для штамповки деталей из тонкого листа с глубокой вытяжкой применяют малоуглероди-

стую сталь 05кп, 08кп, 10кп. Она отличается уменьшенным содержанием нормальных примесей, особенно Si (до 0,03 %), что значительно повышает пластичность и уменьшает твердость. Данная сталь имеет феррито-перлитную структуру с мелкими включениями перлитных зерен. Выделение третичного цементита по границам зерен в этой стали недопустимо, так как ведет к разрывам при штамповке.

Существенное значение имеет и зернистость стали: лучше всего штампуются сталь с мелким зерном; при штамповке стали с крупным зерном получается шероховатая поверхность (дефект «апельсиновая корка»).

Наиболее употребительной из этой категории сталей является сталь 08кп. Из нее изготавливают кузова автомобилей и тракторов, крылья, фасонные панели, семяпроводы сеялок, бункеры зерноуборочных комбайнов, различные крышки и колпаки для сельскохозяйственных машин.

Стали для сварных конструкций. Масса сварных конструкций в сельскохозяйственном машиностроении составляет более 70 % в общей металлоемкости машин. Для сварных конструкций используются стали с невысоким содержанием углерода (до 0,35 %). Из углеродистых конструкционных сталей – это 10, 15кп, 20кп, 25, 30, 35, а сталей обыкновенного качества – это Ст 3, Ст 5пс, Ст 4, Ст 5. Однако свариваемость стали в значительной степени зависит от ее химического состава. Для упрощенной оценки свариваемости углеродистых сталей и сталей с небольшим содержанием марганца и кремния пользуются следующей эмпирической зависимостью:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{4} + \frac{\text{Si}}{4},$$

где $C_{\text{экв}}$ – условный эквивалент углерода.

Стали, имеющие $C_{\text{экв}} < 0,45$, относятся к хорошо сваривающимся. Сварными изготавливаются следующие ответственные узлы сельхозмашин: рамы, несущие брусья, резервуары, трубопроводы дождевальных установок, молотильные и режущие барабаны, а также кожухи и различные ограждения, узлы для оборудования животноводческих ферм, погрузочные щиты трелевочных тракторов.

Сталь Ст 3 группы А любой степени раскисленности чаще других применяется для изготовления различных кожухов, ограждений желобов и других малоответственных и слабонагруженных узлов.

Области применения углеродистых качественных сталей приведены в табл. 4.

Таблица 4

Назначение углеродистых качественных сталей

Марка стали	Примерное назначение
08 10	Для штампуемых деталей, а также цементируемых и цианируемых деталей, не требующих высокой прочности сердцевины (втулки ушка рессоры, шайбы диафрагмы, коромысла клапанов крана автомобиля, зубчатые колеса, фрикционные диски и др.). Для деталей, которые должны обладать высокой пластичностью (трубки, прокладки, шайбы, вилки, тяги и др.)
15 20 15Г 20Г	Для цементируемых и цианируемых деталей, от которых требуется высокая твердость поверхности и невысокая прочность сердцевины (фрикционные диски, поршневые пальцы мало-мощных двигателей, пальцы рессор, неотчетственные шестерни и червяки). Для термически необрабатываемых осей, втулок, вкладышей, трубок, штуцеров. Для сварных и штамповых деталей с невысокой прочностью (подмоторные рамы, башмаки, косынки и т. п.)
25	Для осей, муфт, валиков, рычагов, фланцев, шайб и других некрупных деталей. Применяется в нормализованном, термически обработанном цементуемом или цианированном состоянии
30 35	Для деталей, испытывающих небольшие напряжения (оси, валики, шпиндели, втулки, звездочки, тяги, траверсы, рычаги, цилиндры прессов, валы, крепежные детали, шлицевые валики и др.)
25Г 30Г 35Г	Для рычагов сцепления, вилок переключения передач, тяг, рулевого управления, тормозных педалей, фланцев, кронштейнов, крепежных деталей в нормализованном состоянии
40 45	Для коленчатых валов, шатунов, зубчатых венцов маховиков, шестерен, распределительных валиков, болтов,

Марка стали	Примерное назначение
	гаек, шпонок, храповиков, бандажей, фрикционных дисков, плунжеров, шпинделей, осей, муфт, зубчатых реек, пальцев траков гусениц и для других нормализуемых, улучшаемых и подвергаемых поверхностной термообработке деталей, от которых требуется повышенная твердость поверхности
40Г 45Г	Для полуосей грузовых автомобилей, распределительных валиков, коленчатых валов, шатунов, передних осей, карданных валов, тормозных рычагов, дисков трения, шестерен непрерывного зацепления, шлицевых и шестеренных валов, крепежных деталей. Стали обладают большой прочностью и высокими упругими свойствами. Применяются в холоднотянутом виде, в нормализованном состоянии и после закалки и высокого отпуска (улучшение)
50Г	Для втулок подшипника кривошипа, зубчатого обода колеса, обода маховика, рессор, дисков трения, лицевых и шестеренных валов. Применяется после термообработки (закалка и отпуск, иногда в нормализованном состоянии)
50 55	Для шестерен, прокатных валков, штоков, валов, осей, бандажей, эксцентриков, малонагруженных пружин и рессор, отвалов и др. Применяются после закалки и соответствующего отпуска и в нормализованном состоянии
60	Для прокатных валков, эксцентриков, осей, шпинделей, бандажей, пружинных колец, пружин амортизаторов, пружин сцепления, замочных шайб, дисков сцепления. Применяется после закалки и соответствующего отпуска, а также после нормализации (для крупных деталей). Обладает высокими прочностными и упругими свойствами
65 70 75 85	Для изготовления пружин различных механизмов и машин: рессор, пружин клапанов двигателей автомобиля, плоских пружин прямоугольного сечения толщиной от 3 до 12 мм (сталь 65Г), пружин из проволоки диаметром 0,14...8,00 мм с холодной навивкой пружин различных размеров после закалки с последующим средним отпуском при 300 °С

Марка стали	Примерное назначение
60Г 65Г	Для изготовления плоских и крупных пружин, рессор, пружинных колец, шайб гровера и других деталей пружинного типа, от которых требуются высокие упругие свойства и повышенное сопротивление износу, рабочие органы почвообрабатывающих машин, сегменты режущего аппарата косилок после закалки и среднего отпуска

Инструментальные углеродистые стали

Инструментальными сталями называют углеродистые стали, обладающие высокой твердостью ($HRC\ 60\dots 64$), прочностью и износостойкостью и применяемые для изготовления различного инструмента. Обычно это стали, структура которых после закалки и низкого отпуска, – мартенсит–избыточные карбиды.

Инструментальные углеродистые стали не теплостойки и обладают небольшой прокаливаемостью.

Углеродистые инструментальные стали маркируют буквой У (углеродистая), следующая за ней цифра (У7, У8, У10 и т. д.) показывает среднее содержание углерода в десятых долях процента. Буква А в конце (У10А) указывает, что сталь высококачественная.

ГОСТ 1435–74 предусматривает восемь марок качественной и восемь марок высококачественной углеродистой инструментальной стали. Высококачественные углеродистые стали содержат меньше серы и фосфора и менее склонны к образованию трещин при закалке и шлифовании.

Углеродистые инструментальные стали применяются для изготовления инструментов, для которых требуется сквозная закалка толщиной или диаметром не более 10...12 мм, а также для более крупных инструментов (толщиной 15...30 мм), у которых режущая часть приходится на поверхностный слой (напильники, зенкеры и др.). Назначение и общая характеристика углеродистых инструментальных сталей приведены в табл. 5.

Таблица 5

Назначение и общая характеристика углеродистых инструментальных сталей

Марка стали	Примерное назначение
У7 У7А	Для инструмента, подвергающегося ударам: зубила, штампы, кузнечные и слесарные молотки, плотницкий инструмент (стамески, долота)
У8 У8Г У8А У8ГА	Для инструмента, подвергающегося ударам: штампы, матрицы, пуансоны, пробойники, слесарный инструмент, пилы, зубила
У9 У9А	Для инструмента, требующего твердости и некоторой вязкости: кернеры, столярный инструмент, зубила по камню
У10 У10А У11 У11А	Для изготовления режущего и мерительного инструмента: резцы, калибры, плитки. Вытяжные, обрезающие и вырубные штампы небольших размеров и простой формы
У12 У12А	Режущий и мерительный инструмент, хирургический инструмент
У13 У13А	Резцы по твердому металлу, бритвы, граверный инструмент, шаберы, напильники

Твердость является одной из основных характеристик инструментальных сталей. Твердость углеродистых инструментальных сталей после термообработки представлена в табл. 6.

Таблица 6

Твердость углеродистых инструментальных сталей после термообработки

Марки сталей	Режим закалки		Твердость после закалки, <i>HRC</i>	Твердость <i>HRC</i> после отпуска при температуре (в °C)		
	Температура, °C	Охлаждающая среда		200	300	400
1	2	3	4	5	6	7
У7А	790–810	Сначала в воде до температуры 200–250 °C, а затем в масле до полного охлаждения	62–64	60–62	52–56	48–52
У8А	780–800		63–65	61–63	52–56	48–52
У9А	770–790		63–65	61–63	52–56	48–52
У10А	770–790	до полного охлаждения	62–64	61–63	54–58	48–52

1	2	3	4	5	6	7
У11А	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52
У12А	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52
У13А	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52

Маркировка легированных сталей

Марка легированных сталей состоит из сочетания букв и цифр, обозначающих ее химический состав. По ГОСТ 4543–71 принято обозначать хром – Х, никель – Н, марганец – Г, кремний – С, молибден – М, вольфрам – В, титан – Т, ванадий – Ф, алюминий – Ю, медь – Д, ниобий – Б, бор – Р, кобальт – К. Цифра, стоящая после буквы, указывает на примерное содержание легирующего элемента в процентах. Если цифра отсутствует, то легирующего элемента меньше или около 1 %.

Две цифры в начале марки конструкционной легированной стали показывают содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 20ХН3А в среднем содержит 0,20 % углерода, ~1 % хрома и 3 % никеля. Буква А в конце марки означает, что сталь высококачественная. Особо высококачественные стали имеют в конце марки букву Ш, например 30ХГСШ.

Такой же принцип маркировки характерен для инструментальных сталей. Однако в начале марки стоит одна цифра, показывающая содержание углерода в десятых долях процента. При содержании в них 1 % С или более начальную цифру опускают. Например, в стали ХВ4 содержится более 1 % углерода, ~1 % хрома и 4 % вольфрама.

Некоторые группы узкоспециализированных сталей содержат дополнительные обозначения: марки шарикоподшипниковых сталей начинаются с буквы Ш, электротехнических – с буквы Э, автоматных – с буквы А.

Иногда в конце некоторых марок стали индексами указывается вид дополнительной улучшающей металлургической обработки: ЭШП – электрошлаковый переплав, ЭЛП – электронно-лучевой переплав и пр.

Стали экспериментальных марок, не включенные в ГОСТ, обозначаются буквами с номером, присваиваемым разработчиком. Например, стали, выплавляемые заводом «Электросталь», маркируют сочетанием букв ЭИ (электросталь исследовательская) или ЭП (электросталь пробная) и порядковым номером (например, ЭИ415, ЭП716 и т. д.). После промышленного освоения условное обозначение заменяют на марку, отражающую примерный состав стали.

Улучшение механических свойств обусловлено влиянием легирующих элементов на свойства феррита, дисперсность карбидной фазы, устойчивость мартенсита при отпуске, прокаливаемость, размер зерна.

При взаимодействии легирующих элементов с железом и углеродом могут образовываться механические смеси, твердые растворы, химические и интерметаллические соединения. Сталь несколько упрочняется при образовании твердых растворов и значительно – при образовании химических и интерметаллических соединений.

Легирующие элементы, растворяясь в феррите, повышают его твердость, прочность, снижают пластичность. Такими элементами являются кремний, марганец, хром, никель, кобальт, вольфрам, молибден и др. Никель сильно упрочняет феррит, не снижая его вязкости.

К основным элементам-карбидообразователям, образующим химические соединения типа MeC , относятся железо, марганец, хром, вольфрам, молибден, ванадий, титан, тантал, ниобий, цирконий. Они придают сталям высокую твердость, прочность и износостойкость.

Склонность к перегреву сталей увеличивают бор и марганец, уменьшают алюминий, ванадий, вольфрам, хром, титан и др.

Прокаливаемость сталей увеличивают бор, вольфрам, кремний, марганец, никель, хром, уменьшают – алюминий, кобальт, титан.

Жаропрочность сталей повышают хром, бор, ванадий, вольфрам, кобальт, марганец, молибден, никель, ниобий, титан.

Коррозионную стойкость сталей улучшают хром, кобальт, кремний, молибден, никель, хром, титан, ниобий, ухудшает бор.

Конструкционные легированные стали

В зависимости от наличия легирующих элементов бывают хромистые, марганцовистые, хромомарганцовистые, хромокремнистые,

хромоникелевые и другие легированные стали; по степени легирования – низко- (до 3 %), средне- (3...10 %) и высоколегированные (свыше 10 % легирующих элементов). Если в сталях содержание железа менее 50 % и содержание легирующих элементов больше, чем железа, то такие стали называют *сплавами*.

Примеры марок некоторых конструкционных легированных сталей: 10Г2, 40Г2, 50Г2, 55С2, 60С2, 70С2, 15Х, 38ХА, 45Х, 30ХС, 20ХН3А, 30ХН2МА, 30ХРА, 30ХМА, 20ХГСА, 14Х2Н3МА, 18ХГТШ, 20ХГНТР, 45ХН2МФА, 18Г2АФД, 38Х2МЮА.

Из конструкционных сталей, легированных одним компонентом, наиболее широко в сельскохозяйственном машиностроении применяются марганцевые, кремнистые и хромистые стали.

Марганцевые стали

К этим сталям по ГОСТ 14959–79 относят качественные углеродистые стали группы II с повышенным содержанием Мн. Для изготовления деталей сельхозмашин применяются конструкционные стали с 1 или 2 % Мн: 15Г, 20Г, 25Г, 30Г, 50Г2, 65Г, 70Г. Изделия из сталей 30Г и с большим содержанием углерода (50Г, 65Г, 70Г) подвергаются закалке и отпуску, а стали 15Г, 20Г, 25Г предварительно проходят еще и цементацию.

Марганец в таких сталях находится в твердом растворе. Он повышает прочность и твердость, но особенно заметно увеличивает упругие свойства стали (табл. 7).

Таблица 7

Механические свойства сталей 40, 40Г

Сталь	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	<i>НВ</i>	δ , %	<i>КС</i> , кДж/м ²
40	540	300	190	17	400
40Г	640	320	225	28	1800

Примечание. Указанные металлические свойства приведены для отожженного состояния сталей; $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести, *КС* – ударная вязкость.

Марганец значительно повышает устойчивость аустенита, снижает температуру мартенситного превращения и критическую скорость закалки, тем самым увеличивая прокаливаемость стали. При содержании Мн > 1,5 % у стали появляется склонность к необра-

тимой отпускной хрупкости, поэтому для таких сталей необходимо избегать значения температуры отпуска более 500 °С или проводить его с высокой скоростью охлаждения.

Из марганцевых сталей изготавливают:

- кольца, рессоры, оси, втулки, болты, толкатели, валы-шестерни (сталь 20Г) с цементацией при значениях температуры 920...950 °С на глубину 1,6 мм с последующей закалкой при значениях 810...830 °С в масле и отпуском при значениях температуры 180...200 °С на твердость *HRC* 56...63;

- звенья крючковой приводной цепи (сталь 30Г) с закалкой при значениях температуры 850...870 °С в воде и отпуском при значениях температуры 300...400 °С на твердость *HRC* 38...45;

- втулки, фланцы, стаканы, рычаги, дисковые звездочки (сталь 50Г) с закалкой в воде при значениях температуры 840...850 °С и отпуском при значениях температуры 450...600 °С на твердость *HRC* 25...40;

- рессоры (сталь 50Г2) с закалкой в масле при значениях температуры 810...830 °С и отпуском при значениях температуры 450...500 °С на твердость *HRC* 38...42;

- пружины, рессоры; кольца стопорные (сталь 65Г) с закалкой в масле при значениях температуры 780...810 °С и отпуском при значениях температуры 320...380 °С на твердость *HRC* 40...50; лапы культиватора с закалкой ТВЧ рабочих кромок на твердость *HRC* 55...62;

- сегменты режущего аппарата жатки (сталь 70Г, а также сталь У9А).

Марганцевые стали часто используются для сварных конструкций. На изготовление ответственных сварных конструкций (несущие брусья, подъемные стрелы и т. п.) идут низкоуглеродистые марганцевые стали 09Г2, 10Г2, 15Г, обладающие хорошей свариваемостью ($C_{\text{экр}} < 0,45$). Стали марок 20Г, 25Г относятся к удовлетворительно сваривающимся и применяются для малоответственных и слабонагруженных узлов.

Кремнистые стали

В сельскохозяйственном машиностроении получили распространение кремнистые стали 55С2, 60С2 и 70С2, содержащие 1,5...2,0 % Si. В таких концентрациях кремний образует твердый раствор с железом, уменьшает критическую скорость заковки

и повышает прокаливаемость стали. Кремний повышает прочность, твердость, упругость и снижает пластичность стали (табл. 8):

Таблица 8

Механические свойства сталей 60, 60C2

Сталь	σ_b , МПа	σ_t , МПа	<i>HV</i>	δ , %	ψ , %
60	930	780	280	12	10
60C2	1300	1200	400	20	6

Примечание. Указанные свойства приведены после отжига, ψ – относительное сужение.

В промышленности эти стали имеют строгое функциональное назначение: из них изготавливают пружины, рессоры, шайбы, натяжные пружины и другие упругие детали. Основные требования к таким деталям – высокий предел упругости σ_y и усталости. Этим требованиям удовлетворяют стали, легированные такими элементами, которые повышают предел упругости, приближая отношение σ_y/σ_b к единице. Таким элементом является, прежде всего, Si, кроме него Mn, Cr, V, W.

Изделия из указанных сталей проходят закалку в масле при значениях температуры, равных 870...890 °С и средний отпуск при значениях температуры 400...500 °С. Получающаяся при этом трооститная структура с твердостью *HRC* 40...45 отличается мартенситоподобной игольчатостью и дает $\sigma_y/\sigma_b \approx 0,8$. Наблюдаемое при этом некоторое снижение ударной вязкости не влияет на качество работы пружины. Отличительная черта кремнистых сталей – устойчивость против отпуска. Этим они выделяются в группе пружинно-рессорных сталей 65, 70, 65Г, 60C2A, 50ХФА, 60C2H2A и др.

Хромистые стали

Конструкционные хромистые стали, применяемые в сельхозмашиностроении, содержат не более 2 % Cr. В таких концентрациях хром обычно входит в α -твердый раствор Fe, увеличивая его прочностные свойства (табл. 9).

Таблица 9

Механические свойства сталей 40, 40Х

Сталь	σ_b , МПа	σ_{τ} , МПа	HV	δ , %	KIC , кДж/м ²
40	540	300	190	17	400
40Х	700	480	240	15	500

Примечание. Свойства указаны для отожженного состояния стали.

Хром значительно повышает прокаливаемость стали, способствует более равномерному распределению твердости по сечению. Хромистые стали обладают значительно большей устойчивостью переохлажденного аустенита, чем углеродистые, особенно при значениях температуры, равных 450..600 °С. Кроме того, в этих сталях возможно получение бейнитной структуры даже при охлаждении на воздухе, не говоря уже об охлаждении в масле и воде. Поэтому хромистые стали охотно используются для ответственных в отношении прочности деталей, которым необходима прочность по всему сечению, в частности для деталей, работающих на износ при повышенных нагрузках. Помимо всего прочего, детали с бейнитной структурой почти не деформируются при закалке.

Недостатком хромистых сталей является склонность их к отпускной хрупкости, которая, впрочем, является обратимой (II рода) и устраняется ускоренным охлаждением детали после отпуска (в воде или масле), в отличие от отпускной хрупкости I рода (необратимой).

Хромистые стали нашли в сельхозмашиностроении следующее применение:

– цементуемые стали 15Х, 20Х проходят цементацию при значениях температуры 920...950 °С на глубину 0,8...1,2 мм, а затем закалку при значениях температуры, равных 780...820 °С в масле и низкий отпуск; из них изготавливают тяговые втулочно-роликовые цепи, крестовины карданных соединений (20Х), валы, шестерни, оси, толкатели, пальцы, шпиндели, червяки;

– улучшаемые 38ХА, 40Х, 45Х подвергаются закалке при значениях температуры 820...860 °С в воде и отпуску при различных значениях температуры на необходимую твердость. Их используют для изготовления пластин крупных тяговых втулочно-роликовых

цепей, главных приводных валов жаток (40X); пальцев роликов (45X); звездочек с закалкой венца ТВЧ до *HRC* 40...50 на глубину 2...3 мм (40X); деталей крепежа, осей, шпинделей, штоков, кулачков, втулки (38XA, *HRC* 35...45); валов шестерней, осей, полуосей, ступиц (38XA, *HRC* 25...30); дисков сцепления, шатунов, вилки, рычагов, шестерней (40X).

Многокомпонентные конструкционные стали

Введением в сталь нескольких легирующих элементов можно в широких пределах варьировать механические свойства, добиваясь, в частности, сочетания высоких прочностных, пластических и упругих свойств. Все легирующие элементы, кроме никеля, повышают прочность, но снижают в большинстве случаев пластичность и вязкость стали. Никель вводится в сталь главным образом для сохранения высокой ударной вязкости. Поэтому никельсодержащие стали применяют для работы в сложнапряженных условиях.

В сельскохозяйственном машиностроении используют цементуемые стали 12ХН3М, 30Х2Н4А для изготовления шестерен, валов, червяков. Цементацию проводят при значениях температуры, равных 930...950 °С, закалку – при значениях температуры 830-850 °С (в масле), отпуск – 180...200 °С на твердость не ниже *HRC* 58. Однако хромоникелевые стали еще больше чувствительны к отпускной хрупкости II рода, чем хромистые стали. Поэтому после отпуска их охлаждают в воде или масле. Но в крупных деталях и эта мера может быть недостаточной из-за низкой скорости охлаждения сердцевины. В этом случае необходимо дополнительное введение молибдена или вольфрама, которое резко увеличивает прокаливаемость стали не только цементируемой, но и улучшаемой. Поэтому стали, например, 18ХНВА и 40ХНМА закалывают на воздухе и изготавливают из них крупногабаритные детали, работающие в условиях динамических нагрузок.

Хромоникелевые цементуемые стали 20ХН, 12ХН3А, 12ХН2, аналогично сталям 15Х, 20Х, имеют в сердцевине бейнитную структуру с высокой прочностью (при небольшом сечении изделия) и применяются для деталей, работающих на износ при повышенных нагрузках (втулки, валики, оси, шестерни, кулачковые муфты и др.). Однако все стали, содержащие никель, склонны к образованию карбидной сетки, плохо обрабатываются и имеют

в структуре остаточный аустенит. Поэтому часто никель заменяют марганцем с добавками титана (0,05...0,12 %). Титан способствует получению мелкозернистого строения и делает сталь технологичной. Из таких сталей достаточно широко распространены 18ХГТ, 20ХГР, 30ХГТ.

Механические свойства всех указанных типов цементованных сталей (12ХНЗА, 18НВА, 18ХГТ) близки по своим значениям: $\sigma_b \approx 1000$ МПа; $\sigma_t \approx 800$ МПа; $\psi \approx 50\%$; $\delta \approx 10\%$; $KC \approx 850$ кДж/м². Поэтому при изготовлении сложных, с технологической точки зрения, деталей предпочтение отдается стали 18ХГТ перед сталью 12ХНЗА, например, для крестовин карданных соединений (цементация на глубину 0,8...1,4 мм с закалкой и отпуском на твердость *HRC* 58...65).

Цементуемые безникелевые стали 18ХГТ, 20ХГР, 30ХГТ подвергают газовой цементации или нитроцементации при значении температуры, равной 950 °С на глубину 0,7...1,4 мм с объемной или индукционной закалкой при значениях температуры 840...850 °С и отпуском – 180...200 °С. Так, например, вал-шестерня из стали 25ХГТ зерноуборочного комбайна после такого комплекса операций имеет твердость поверхности зуба *HRC* 57...64, а сердцевины – *HRC* 36...46.

Для цементуемых сталей, содержащих 3...4 % Ni, чтобы снизить количество остаточного аустенита, в зависимости от технологического процесса проводят или высокий отпуск после химико-термической обработки, или обработку холодом после закалки.

Низколегированные цементуемые стали часто применяют для изготовления ответственных и тяжелонагруженных сварных конструкций и узлов:

– 10Г2Б, 12Г2Б, 16Г2Б, 09Г2С, 09Г2ДТ, 12ГС – для сварных конструкций почвообрабатывающих машин (рамы плугов) взамен сталей Ст 3 и Ст 5;

– 17ХГ2САФР, 18Г2АФпс – рамы, платформы, прицепы, тяги, стойки, испытывающие высокие напряжения при циклическом и динамическом нагружении, особенно при пониженных температурах.

Все рассмотренные выше цементуемые стали в состоянии эксплуатации изделия имеют твердость сердцевины в пределах *HRC* 35...45.

Из улучшаемых многокомпонентных конструкционных сталей в сельхозмашиностроении используются 40ХН, 45ХН (пальцы, оси, поводки), 30ХНЗА (втулки, фланцы, стаканы), 40ХНМА (крупногабаритные детали, работающие с динамическими нагрузками), 50ХФА и 60С2Н2А (тяжело нагруженные рессоры и пружины тракторов и комбайнов). Такие стали подвергают закалке при значениях температуры 830...870 °С в масле или на воздухе (40ХНМА) и отпускают при различных значениях температуры в зависимости от назначения изделия и необходимой твердости.

К рассматриваемой группе можно было бы отнести и широко распространенные стали 35ХМФА, 38ХМЮА, 18Х2Н4ВА и т. п., обладающие высокой механической прочностью и подвергающиеся азотированию для повышения износостойкости и усталостной прочности. Но такие стали применяются, главным образом, для двигателей тракторов и сельхозмашин и поэтому подлежат рассмотрению в специальной литературе по тракторо- и двигателестроению.

Стали и сплавы с особыми свойствами (ГОСТ 5949–75)

Износостойкие стали и сплавы

Износ деталей машин заключается в изменении формы и массы сочлененных движущихся тел под действием сил трения. Он зависит от условий взаимодействия трущихся пар и определяется влиянием многих факторов. Однако характер и интенсивность разрушения металла определяются, как правило, доминирующим видом износа.

По характеру взаимодействия трущихся тел в сельскохозяйственных машинах можно выделить шесть видов трения:

- скольжение со смазкой, когда механизм износа заключается в истирании оксидных пленок и деформации, который наблюдается в подшипниковых парах (антифрикционный сплав-сталь);
- качение со смазкой: контактные и коррозионно-механические повреждения в шариковых и роликовых подшипниках (сталь по стали);
- полусухое трение: истирание оксидных пленок, передеформирование неровностей в сочленениях механизмов сельскохозяйственных машин (сталь по чугуну, сталь по стали);
- скольжение с абразивной прослойкой: передеформирование и единичное микрорезание в пальцах и траках гусениц (сталь по стали);

– скольжение в абразивной среде (почве): передеформирование, истирание оксидных пленок и выкрашивание при работе плугов и культиваторов (сталь или твердый сплав по почве);

– резание органической массы: абразивный износ, истирание оксидных пленок, выкрашивание (сегменты косилок, режущие пары стригальных машинок).

При любом виде трения механизм износа определяется свойствами материалов трущихся пар и условиями взаимодействия. Поэтому, зная механизм износа, можно делать необходимые выводы о методах упрочнения материала, повышающих его износостойкость. Так, при передеформировании (смятии) поверхностных слоев металла необходимо повышать предел прочности и твердость: при выкрашивании – динамическую прочность, сопротивление контактной усталости, при истирании окисных пленок – коррозионную стойкость сплава.

Графитизированная сталь

Графитизированная сталь представляет собой заэвтектоидную сталь (1,2...1,7 % C) с повышенным содержанием кремния (0,7...1,4 %) и возможными небольшими добавками легирующих элементов. В литом и горячедеформированном состоянии ее структура ничем не отличается от углеродистых заэвтектоидных сталей (пластинчатый перлит и карбиды, *HB* 350). После двух стадий графитизации (подобно ковкому чугуну) часть углерода из цементита переходит в структурно свободное состояние в виде округлых или вытянутых включений графита.

Графитизированная сталь со структурой феррит и графит (*HB* 100...110) имеет низкий коэффициент трения. Такая сталь с высокими антифрикционными свойствами применяется для втулок подшипников скольжения, сепараторов подшипников качения, поршней, стаканов тормозных колодок и т. п.

Графитизированная сталь по своим литейным свойствам близка к чугуну. В то же время она легко куется и прокатывается (при содержании графита до 0,5 %), хорошо обрабатывается резанием, поскольку на поверхности трения находится свободный графит. Закаленная графитизированная сталь не склонна к схватыванию или налипанию. Она отличается хорошей износостойкостью и способностью к поглощению вибраций.

Цикл термической обработки, формирующий в этой стали наилучший комплекс механических свойств и износостойкости, состоит из графитизирующего отжига на зернистый перлит, закалки при значениях температуры 800...860 °С в масле или воде и отпуска при значениях температуры 150...180 °С на твердость *HRC* 55.

В графитизированную сталь вводятся легирующие элементы: W и Mo – способствуют измельчению зерна; Si, Al, Cu, Ni – ускоряют графитизацию; Cr и W – повышают износостойкость; все эти элементы, кроме Al, повышают ее прокаливаемость.

Из графитизированной стали 125C2РЛ изготавливают литые пальцы режущего аппарата жатки. Применяются также графитизированные стали в ковном состоянии (ЭИ293, ЭИ336, ЭИ366).

Сталь Гадфильда

Высокомарганцовистая литейная сталь Г13Л или 110Г13Л (в ковном состоянии – ЭИ256) относится к аустенитному классу. В литом состоянии эта сталь имеет карбиды по границам аустенитных зерен, что является причиной высокой хрупкости. Для растворения карбидов и придания однородности аустениту сталь закаливают в воде при значениях температуры 1050...1100 °С. Твердость после закалки – *HB* 170...220. Однако эта твердость не определяет износостойкость стали Гадфильда. Однородный аустенит чрезвычайно склонен к наклепу, поэтому эта сталь в условиях высоких динамических (ударных) нагрузок и высоких контактных давлений накаливается, значительно увеличивая свою износостойкость по сравнению с обычными сталями той же твердости. Твердость поверхностного слоя может возрастать до *HB* 550...580. Хотя при небольших контактных давлениях в условиях абразивного износа и трения сталь Гадфильда не имеет преимуществ перед другими сталями.

Из этой стали изготавливают звенья гусеничных цепей (траки) сельскохозяйственных машин и тракторов, щеки, конусы, билы, бронеплоскостные плиты различных дробилок и мельниц, зубья ковшей экскаваторов и т. п.

Шарикоподшипниковые стали

Как и в любой машиностроительной отрасли, при производстве сельхозтехники без шарикоподшипников не обойтись. Для их производства используются высокоуглеродистые хромистые стали

ШХ15 и ШХ15СГ заэвтектоидного типа. Эти стали при высокой твердости, прочности и износостойкости отличаются высоким сопротивлением деформации и, особенно, контактной усталости. Термообработка заключается в закалке при значениях температуры 820...840 °С в масле и отпуске при значениях температуры 150...160 °С на твердость *HRC* 58...62. Рабочие поверхности подвергают тонкому шлифованию, а затем полированию и доводке, так как микронеровности при трении служат очагами усталостного шелушения металла.

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали

Коррозией называют поверхностное разрушение металла под воздействием внешней среды. Для того чтобы обладать антикоррозионными свойствами, сталь должна содержать не менее 12 % хрома. В этом случае сталь приобретает положительный электрохимический потенциал. Она не ржавеет, не окисляется на воздухе, в воде, в ряде кислот, солей и щелочей.

Кроме хрома, в состав коррозионно-стойких сталей (до 0,4 % С) могут входить никель (8...15 %; сталь аустенитного класса), титан (до 0,8 % для измельчения зерна). В зависимости от степени содержания легирующих элементов сталь будет относиться к разным структурным классам и, соответственно, иметь разные свойства и области применения.

Нельзя сказать, что при изготовлении сельхозтехники коррозионностойкие (нержавеющие) стали применяются широко. Условия эксплуатации сельхозмашин позволяют использовать в качестве защиты от коррозии разнообразные виды недорогих покрытий, поэтому в этой отрасли машиностроения встречается сталь Х13 для деталей, подвергающихся действию слабоагрессивных сред и ударных нагрузок (предметы домашнего обихода), и сталь Х17 для деталей, работающих в агрессивных средах (трубопроводы и емкости для удобрений, кислот).

Стали 12Х13 и 20Х13 применяются после закалки и низкого отпуска для изготовления деталей с повышенной пластичностью, подвергаемых при работе ударным нагрузкам, работающих в слабоагрессивных средах при комнатной температуре.

Стали 30Х13, 40Х13 применяются после закалки и низкого отпуска с обязательной полировкой или шлифовкой для изготовления

режущего, мерительного и хирургического инструмента, пружин, карбюраторных игл и т. д. Отличаются повышенной твердостью.

Сталь применяется для изготовления тяжелонагруженных деталей, работающих на истирание и удар в агрессивных средах.

Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы

Жаростойкие (окалиностойкие) стали и сплавы обладают стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 550 °С и работают в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Назначение и общая характеристика некоторых марок жаростойких сталей и сплавов приведена в табл. 10.

Жаропрочность – это способность стали или сплава противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах (не изменять характеристики прочности) длительное время. Назначение и общая характеристика некоторых марок жаропрочных сталей и сплавов приведена в табл. 11.

Таблица 10

Назначение и общая характеристика марок жаростойких сталей и сплавов

Марка стали	Рекомендуемая максимальная температура применения в течение длительного времени (до 1000 ч), °С	Назначение
1	2	3
15X5	600...650	Трубы
40X9C2 40X10C2M 30X13H7C2	—	Клапаны выпуска автомобильных, тракторных и дизельных двигателей, трубы рекуператоров, теплообменники, колосники
15X6C10	—	Трубы, детали котельных установок
15X25T 15X2B	950	Аппаратура, детали, чехлы термопар, электроды искровых зажигательных свечей, трубы пиролизных установок, теплообменники

1	2	3
08X20H14C2	–	Трубы
20X20H14C2 36X18H25C2	1000	Печные конвейеры, ящики для цементации

К сплавам с особыми физическими свойствами относятся сплавы высокого электросопротивления (реостатные медно-никелевые сплавы – манганин и константан; фехраль Х1304 и нихром Х20Н80 для электронагревателей), сплавы с постоянным коэффициентом линейного расширения (инвар Н36), сплавы с постоянным модулем упругости (элинвар ЭИ25), магнито-жесткие сплавы для постоянных магнитов (ЕХ, ЕХ5К5, алнико, магнико), магнито-мягкие сплавы для сердечников реле и трансформаторов (техническое железо, электро-техническая сталь Э1, Э2, трансформаторное железо ЭЗ, Э4) и немагнитные сплавы (аустенитные стали Г13Л, Х18Н12 и др.).

Таблица 11

Назначение и общая характеристика некоторых марок
жаропрочных сталей и сплавов

Марка стали	Температура работы, °С	Температура начала интенсивного окалинообразования, °С	Назначение
1	2	3	4
40X9C2	650	850	Клапаны автотракторных двигателей, крепежные детали
40X10C2М	650	850	
45X14H14B2M	650	850	
12X18H10T	600	850	Детали выхлопных систем
12X18H12T	600	850	
12X25H16Г7А	950	1050...1100	Листовые детали, газопроводы, работающие при умеренных напряжениях
ХР38ВТ	1100	1200	
ХР60Ю	950	1050	
ХН75МБТЮ	1100	1200	

1	2	3	4
20Х23Н18	1000	1050	Детали установок в химической и нефтяной промышленности, газопроводы, камеры сгорания (может применяться для нагревательных элементов сопротивления)

Эти сплавы с заданными физическими свойствами используются для изготовления электротехнического оборудования и приборов, применяемых на тракторах и сельскохозяйственных машинах.

Инструментальные легированные стали

Инструментальные легированные стали, как и углеродистые, обладают высокой твердостью (*HRC* 60...64), прочностью и износостойкостью и применяются для изготовления различного инструмента. Обычно это заэвтектоидные или ледебуритные стали, структура которых после закалки и низкого отпуска – мартенсит-избыточные карбиды.

Одной из главных характеристик инструментальных сталей является теплостойкость (или красностойкость), т. е. устойчивость против отпуска при нагреве инструмента в процессе работы.

Все инструментальные стали подразделяют на три группы: не обладающие теплостойкостью (углеродистые и легированные стали, содержащие до 3...4 % легирующих элементов), полутеплостойкие (содержащие свыше 0,6...0,7 % С и 4...18 % Cr) и теплостойкие (высоколегированные стали, содержащие Cr, W, V, Mo, Co, ледебуритного класса) получившие название быстрорежущих.

Другой важной характеристикой инструментальных сталей является прокаливаемость. Высоколегированные теплостойкие и полутеплостойкие стали обладают высокой прокаливаемостью.

Для инструмента, требующего повышенной вязкости (например для штампов горячего деформирования), применяют доэвтектоидные стали, которые после закалки на мартенсит подвергают отпуску при более высокой температуре для получения структуры троостита и даже сорбита. Износостойкость и твердость этих сталей ниже, чем заэвтектоидных.

Легированные инструментальные стали X, 9X, 9XC, 6XВГ и другие маркируют цифрой, показывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента, если его содержание $< 1\%$. Если содержание углерода $\sim 1\%$, то цифра чаще отсутствует. Буквы означают легирующие элементы, а следующие за ними цифры – содержание (в целых процентах) соответствующего легирующего элемента.

Быстрорежущие стали маркируют буквой Р. Следующая за ней цифра указывает среднее содержание главного легирующего элемента быстрорежущей стали – вольфрама (в процентах). Среднее содержание ванадия в стали обозначают цифрой, проставляемой за буквой Ф, кобальта – цифрой за буквой К и т. д. Среднее содержание хрома в большинстве быстрорежущих сталей составляет 4% , и поэтому в обозначении марки стали не указывается.

Стандарт устанавливает две группы инструментальных легированных сталей:

I. Стали для режущего и мерительного инструмента:

- 1) неглубокой прокаливаемости: 7ХФ; 9ХФ; 11ХФ; 13Х; ХВ и др.
- 2) глубокой прокаливаемости: Х; 9ХС; ХВГ; 9Х5Ф; 9Х5ВФ.

II. Стали для штампового инструмента:

- 1) для деформирования в холодном состоянии: 9Х; Х6ВФ; Х12; Х12М; Х12Ф1; Х12ВМ и др.
- 2) для деформирования в горячем состоянии: 4Х8В2; 7Х3; 8Х3; 5ХНМ и др.
- 3) для ударного инструмента: 4ХС; 6ХС; 5ХВ2С; 6ХВ2С; 6ХВНГ и др.

В табл. 12 приведены области применения наиболее часто используемых инструментальных легированных сталей.

Таблица 12

Назначение и общая характеристика легированных сталей после термообработки

Марка стали	Назначение
7ХФ	Для рамных, круглых и ленточных пил с плющенными и разведенными зубьями, для деревообрабатывающих инструментов (топоры, долота), а также для инструментов, работающих с ударными нагрузками (зубила, пуансоны)
9ХФ	Для ременных, ленточных, круглых пил, для ножей при холодной резке металла, для обрезных матриц и пуансонов при холодной обрезке заусенцев, для кернов
11ХФ	Для метчиков и другого режущего инструмента диаметром до 30 мм, закаливаемого с охлаждением в горячих средах
ІЗХ	Для бритвенных ножей и лезвий, острого хирургического инструмента, шаберов, гравировального инструмента
ХВ	Для резцов и фрез при обработке с небольшой скоростью резания твердых материалов, для гравировальных резцов при очень напряженной работе
Х	Для зубил, применяемых при насечке напильников, для очень твердых кулачков эксцентриков и пальцев, для гладких цилиндрических калибров и калиберных колец штемпелей, для токарных, строгальных и долбежных резцов в лекальных и ремонтных мастерских
9ХС	Для сверл, резверток, метчиков, плашек, гребенок, фрез, машинных штемпелей, клейм для холодных работ
ХВГ	Для измерительных и режущих инструментов, для которых повышенное коробление при закалке особенно недопустимо, для резьбовых калибров, протяжек, длинных метчиков, длинных резверток, плашек и других видов специального инструмента
9Х5Ф 9Х5ВФ	Для ножей, применяемых для фрезерования древесины, строгальных пил и других деревообрабатывающих инструментов подобного типа
9Х	Для валов холодной прокатки, пробойников холодновысадочных матриц и пуансонов, для деревообрабатывающего инструмента

Марка стали	Назначение
X6ВФ	Для резбонакатного инструмента (роликов и плашек), деревообрабатывающих инструментов, ручных ножовочных полотен, бритв, матриц, пуансонов, накатников и других инструментов, предназначенных для холодной деформации
X12	Для холодных штампов высокой устойчивости против истирания (преимущественно с рабочей частью округлой формы), не подвергающихся сильным ударам и толчкам, для волочильных досок и волок, глазков для калибрования пруткового металла под накатку резьбы, гибочных и формовочных штампов, сложных секций кузовных штампов, которые при закалке не должны подвергаться значительным объемным изменениям и короблению, для матриц и пуансонов вырубных и просечных штампов, для штамповки активной жести электрических машин и электромагнитных систем электрических аппаратов
X12М X12Ф1 X12ВМ	То же, что для стали марок X12, но когда требуется большая вязкость, для профиловочных роликов сложных форм, сложных дыропрошивочных матриц при формовке листового металла, эталонных шестерен, накатных плашек, волок, для матриц и пуансонов вырубных и просечных штампов (в том числе совмещенных и последовательных) со сложной конфигурацией рабочих частей
4X8В2	Для матриц и пуансонов, работающих в тяжелых условиях нагрева, для пресс-форм, применяемых при формовке изделий из пластмасс, для пресс-форм цветного литья под давлением
7X38X3	Для матриц при горячей высадке металлических машинных частей и болтов на прессах и горизонтально-ковочных машинах со сменными рабочими вставками, для формовочных и прошивных пуансонов при горячей гибке и обрезке, для холодных штампов

Значение твердости наиболее часто применяемых инструментальных легированных сталей после термообработки приведены в табл. 13.

Таблица 13

Значение твердости наиболее часто применяемых инструментальных легированных сталей после термообработки

Марка стали	Температура закали, °С	Охлаждающая среда	Твердость по Роквеллу после закали и низкого отпуска, <i>HRC</i>
7ХФ	820–840	Масло	58
	800–830	Вода	58
9ХФ	850–830	Масло	60
	820–840	Вода	60
11Х	810–830	Масло	62
13Х	780–810	Вода	64
ХВ4	800–820	Вода	65
Х	840–860	Масло	62
9ХС	840–860	Масло	62
ХВГ	830–850	Масло	62
9Х5Ф	950–1000	Масло	59
9Х5ВФ	950–1000	Масло	59
9Х	820–850	Масло	62
Х6ВФ	980–1000	Масло	61
Х12	950–1000	Масло	58
Х12М	950–1000	Масло	58
Х12Ф1	1050–1100	Масло	58
4Х8В2	1025–1075	Масло	45
7Х3	850–880	Масло	54
8Х3	850–880	Масло	55
5ХНМ	830–860	Масло	47
4Х5В2ФС	1030–1050	Воздух	50
4ХС	880–900	Масло	47
6ХС	840–860	Масло	56
8ХВГ	850–900	Масло	57
5ХВ2С	860–900	Вода	53
6ХВ2С	860–900	Масло	57

Быстрорежущие инструментальные стали предназначены в основном для изготовления режущих инструментов, работающих при значениях температуры, равных 560...725 °С, содержат 6...18 % W, 3...4 % Cr, 1...3 % V и другие элементы. Марки быстрорежущих сталей, химический состав и технические требования установлены ГОСТ 19265–73 (табл. 14).

По ТУ 14-1-2804–79 и ТУ 12-2998–80 поставляются порошковые быстрорежущие стали марок Р6М5К5-МП и Р6М5Ф3-МП для изготовления крупногабаритного режущего инструмента сложной формы.

Быстрорежущие стали, перечисленные в первой колонке табл. 14 – умеренной (нормальной) теплостойкости (615...625 °С), во второй и третьей колонках – повышенной теплостойкости (625...650 °С), в четвертой – высокой теплостойкости (700...725 °С). Для обработки конструкционных сталей с твердостью до 220...230 *НВ* применяют быстрорежущие стали умеренной теплостойкости, а для резания конструкционных сталей с высокой твердостью до 450 *НВ* аустенитных жаропрочных и коррозионно-стойких сталей применяют быстрорежущие стали повышенной и высокой теплостойкости.

Таблица 14

Теплостойкость быстрорежущих сталей разных марок

Нормальная теплостойкость	Повышенная теплостойкость		Высокая теплостойкость
Р6М3	Р9Ф5	10Р8М3	В3М12К23
Р6М5	Р9К5	Р12Ф3	В11М7К23
Р8М3	Р9К10	Р12Ф4К5	В18М4К25
Р9	Р10К5Ф5	Р8М3К6С	В18М7К25
Р12	Р14Ф4	Р9М4К8Ф	3В20К16ХФ
Р18	Р18Ф2К5	Р12М3А2К8	25В20К25ХФ

Быстрорежущие стали В3М12К23, В11М7К23 и другие, расположенные в четвертой колонке табл. 14, имеют интерметаллидное упрочнение, их применяют для резания титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов.

Таким образом, быстрорежущие стали предназначены для изготовления режущего инструмента (отрезные, резьбовые, расточные,

фасонные, строгальные и долбежные резцы, сверла, метчики, плашки, различные фрезы, долбяки, шаберы, пилы машинные и ручные для обработки древесины, ножовочные полотна, напильники и др.), подшипников качения, деталей дизельной топливной аппаратуры, тяжелонагруженных штампов холодного деформирования и других деталей, работающих при значениях температуры, равных 615...725 °С, что значительно выше, чем для других инструментальных сталей.

Методические указания

В работе требуется осуществить рациональный выбор сталей для деталей машин с учетом требований обеспечения прочностных свойств деталей. В частности, требуется указать марки сталей, выбранные для деталей машин определенных типов, а также режимы их термообработки, обеспечивающие заданную твердость.

Выбор сталей проводится на основе анализа данных табл. 1 в соответствии с предлагаемыми преподавателем вариантами индивидуальных заданий, в которых указываются наименования деталей, а также твердость сталей, которую необходимо обеспечить с учетом условий эксплуатации деталей в процессе термообработки, осуществляемой в соответствующем режиме.

Режим термической обработки следует назначать, руководствуясь данными табл. 15.

Сведения о выбранных марках сталей и режимах термообработки следует представить в виде таблицы:

Наименование детали (марка стали)	Твердость*	Режим термообработки				
		Отжиг		Закалка		Отпуск
		$t_{\text{нагрева}} , \text{ }^{\circ}\text{C}$	Условия охлаждения	$t_{\text{нагрева}} , \text{ }^{\circ}\text{C}$	Охлаждающая среда	$t_{\text{нагрева}} , \text{ }^{\circ}\text{C}$
1						
2						
3						
и т. д.						

*Таблица сопоставления значений твердости

<i>HV</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HRA</i>	<i>HV</i>	<i>HB</i>	<i>HRC</i>	<i>HRA</i>
240	228	20,3	60,7	510	475	49,8	75,7
245	233	21,3	61,2	520	483	50,5	76,1
250	237	22,2	61,6	530	492	51,1	76,4
255	242	23,1	62,0	540	500	51,7	76,7
260	247	24,0	62,4	550	509	52,3	77,0
265	252	24,8	62,7	560	517	53,0	77,4
270	256	25,6	63,1	570	526	53,6	77,8
275	261	26,4	63,5	580	535	54,1	78,0
280	266	27,1	63,8	590	543	54,7	78,4
285	271	27,8	64,2	600	552	55,2	78,6
290	275	28,5	64,5	610	560	55,7	78,9
295	280	29,2	64,8	620	569	56,3	79,2
300	285	29,8	65,2	630	577	56,8	79,5
310	294	31,0	65,8	640	586	57,3	79,8
320	304	32,2	66,4	650		57,8	80,0
330	313	33,3	67,0	660		58,3	80,3
340	323	34,4	67,6	670		58,8	80,6
350	332	35,5	68,1	680		59,2	80,8
360	342	36,6	68,7	690		59,7	81,1
370	351	37,7	69,2	700		60,1	81,3
380	361	38,8	69,8	720		61,0	81,8
390	370	39,8	70,3	740		61,8	82,2
400	380	40,8	70,8	760		62,5	82,6
410	390	41,8	71,4	780		63,3	83,0
420	399	42,7	71,8	800		64,0	83,4
430	408	43,6	72,3	820		64,7	83,8
440	418	44,5	72,8	840		65,3	84,1
450	423	45,3	73,3	860		65,9	84,4
460	432	46,1	73,6	880		66,4	84,7
470	442	46,9	74,1	900		67,0	85,0
480	450	47,7	74,5	920		67,5	85,3
490	456	48,4	74,9	940		68,0	85,6

Примечание. *HV* – твердость по Виккерсу; *HB* – твердость по Бринеллю; *HRC* – твердость по Роквеллу (шкала C); *HRA* – твердость по Роквеллу (шкала A).

Таблица 15

Общая характеристика основных видов термической обработки

Вид термической обработки	Температура нагрева, °С	Условия охлаждения	Назначение
1	2	3	4
<i>Отжиг I рода</i>			
Отжиг гомогенизационный	На 150–300 °С выше точки A_{c3} , 1100–1150 °С. Продолжительность выдержки 8–15 ч	Медленное (с печью)	Для крупных фасонных отливок и слитков из легированной стали для получения однородной (гомогенной) структуры путем устранения (ослабления) дендритной ликвации. Для уменьшения возможности образования флокенов, шиферности, карбидной ликвации и других дефектов после обработки давлением и улучшения механических свойств фасонных отливок
Отжиг рекристаллизационный	Выше температуры начала рекристаллизации, 660–710 °С. Продолжительность выдержки 3–6 ч (масса садки до 2 т)	Медленное до 550 °С (под колпаком или фалем)	После холодной обработки давлением (калибровка, прокатка, вытяжка, штамповка, волочение и т. д.) как межоперационная обработка для уменьшения твердости и увеличения пластичности, снятия наклепа
Отжиг, уменьшающий напряжения	200–700 °С	Медленное	Для снятия остаточных напряжений после литья, пластической деформации или механической обработки

1	2	3	4
<i>Отжиг II рода</i>			
Отжиг полный доэвтектоидной стали	На 30–50 °С выше точки A_{c3}	Медленное до 500 °С, чтобы обеспечить распад аустенита при небольшом переохлаждении, скорость охлаждения в зависимости от состава стали, величины и размера поковки колеблется от 15 до 150 °С, 1 ч	Для доэвтектоидных сталей с целью снижения твердости, улучшения обрабатываемости, снятия внутренних напряжений, устранения или уменьшения структурной неоднородности, измельчения зерна, подготовка стали к последующей термической обработке
Отжиг изотермический	На 30–50 °С выше точки A_{c3} (для доэвтектоидной стали) или A_{c1} (для заэвтектоидной стали)	Ускоренное до температуры наименьшей устойчивости аустенита в перлитной области (650–680 °С), выдержка при данной температуре для полного распада аустенита и последующее ускоренное охлаждение	Для ускорения отжига небольших садок проката или поковок из легированной стали
Отжиг неполный	В интервале температур A_{c1} и A_{c3} (A_{c1})	Медленное до 500–650 °С	То же для эвтектоидной стали

1	2	3	4
Отжиг сфероидизирующий (для сфероидизации цементита)	Несколько выше температуры A_{c1}	а) 30–40 °С в час до 600 °С и далее на воздухе; б) 20–30 °С в час до 680 °С, выдержка для выравнивания температуры и охлаждение до 600 °С с той же скоростью, дальнейшее охлаждение на воздухе	Для инструментальных сталей для снижения твердости, улучшения обрабатываемости резанием, подготовки структуры к окончательной термической обработке и устранения остаточных напряжений, а также для низкоуглеродистых сталей (листы, прутки) перед холодной штамповкой или волочением для повышения пластичности
<i>Нормализация</i>			
Нормализация (отжиг нормализационный)	На 50–60 °С выше точки A_{c3} для доэвтектоидной или A_{cm} для заэвтектоидной стали	На спокойном воздухе	Для получения мелкого зерна, равномерного распределения структурных составляющих, улучшения обрабатываемости низкоуглеродистой стали, устранения карбидной сетки в заэвтектоидной стали перед сфероидизацией, улучшения механических свойств, снижения порога хладноломкости
<i>Закалка</i>			
Непрерывная (в одном охладителе)	На 40–60 °С выше точки A_{c3} для доэвтектоидной и точки A_{c1} для заэвтектоидной	Быстрое охлаждение (вода, масло и другие среды) для переохлаждения аустенита до мартенситной точки M_{nc}	Применяется в сочетании с отпуском для получения высокой твердости, износостойкости, а также для получения высокого комплекса механических свойств

1	2	3	4
	стали или температуры растворения избыточных фаз	Скорость охлаждения должна быть выше критической	
Прерывистая (в двух средах)	То же	Сначала быстрое охлаждение в воде до температуры несколько выше M_n с последующим более медленным охлаждением в масле. Выдержка в воде – ориентировочно 1 с на каждые 5–6 мм диаметра (толщины)	Для инструмента из углеродистой стали. Замедленное охлаждение в области температур образования мартенсита способствует уменьшению остаточных напряжений и деформаций
Ступенчатая	То же	В расплавленных солях, имеющих температуру несколько выше точки M_n . Выдержка в расплавленных солях должна обеспечить выравнивание температуры по сечению изделий. Окончательное охлаждение на воздухе или в другой закалочной среде	Для закалки мелкого инструмента из углеродистой стали (У8, У10, У12, У13), более крупного – из легированной (Х, 9ХВГ, ХВГН, ХС и др.) и быстрорежущей стали (Р18, Р12, Р9 и др.). Рекомендуется для уменьшения напряжений, деформаций (коробления) и устранения трещин

1	2	3	4
Изотермическая	То же	В расплавленных солях, имеющих температуру несколько выше точки M_n (250–400 °С). Выдержка в солях должна обеспечить, возможно, более полный распад аустенита, чаще 20–40 мин	Наряду с минимальными деформациями для ряда конструкционных сталей (30ХГС, 30ХГСНМА и др.) повышает прочность и сопротивление хрупкому разрушению (сопротивление отрыву и работу распространения трещины). При изотермической закалке инструментальных сталей (6ХС, 5ХВС2, 9ХС, ХВГ и др.) на твердость HRC 40–50 возрастают пластичность, вязкость, предел выносливости и сопротивление износу
<i>Отпуск</i>			
Низкий	120–250 °С	Медленное или ускоренное охлаждение	Для снижения внутренних напряжений; сохранения высокой твердости и износостойкости при повышении сопротивления хрупкому разрушению. Для режущего и мерительного инструмента, после поверхностной индукционной закалки, после закалки цементированных изделий и т. д.
Средний	350–500 °С	То же	Для пружин и рессор. Обеспечивает высокий предел упругости
Высокий	500–680 °С	Медленное или быстрое (масло, вода) для сталей, склонных к обратной отпускной хрупкости	Для получения максимальной вязкости при сохранении относительно высоких значений предела прочности и текучести и повышенного сопротивления хрупкому разрушению для получения минимальных внутренних напряжений

Варианты индивидуальных заданий

№ задания	Наименование детали (дополнительные требования при эксплуатации или к материалу детали)	Твердость <i>HRC</i> , (<i>HB</i>)
1	Палец поршневой	<i>HRC</i> 55–60
	Рессора	<i>HRC</i> 40–45
	Шабер (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 61–63
	Матрица (легированная сталь)	<i>HRC</i> 50–55
	Внутреннее кольцо шарикового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
2	Ось	<i>HB</i> 260–300
	Кольцо стопорное	<i>HRC</i> 35–40
	Матрица (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	Метчик (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–2
	Внутреннее кольцо роликового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
3	Полуось	<i>HB</i> 300–360
	Зубило (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 58–60
	Пружина	<i>HRC</i> 40–45
	Сверло (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–60
	Ролик подшипника	<i>HRC</i> 58–62
4	Шестерня	<i>HRC</i> 45–50
	Рессора	<i>HRC</i> 40–45
	Скоба (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	Накатная плашка (легированная сталь)	<i>HRC</i> 56–58
	Шарик подшипника	<i>HRC</i> 58–62
5	Фланец	<i>HRC</i> 30–35
	Лезвия ножниц для холодной резки металла	<i>HRC</i> 55–57
	Пружина	<i>HRC</i> 40–45
	Строгальный резец	<i>HRC</i> 56–58
	Наружное кольцо игольчатого подшипника	<i>HRC</i> 58–62
6	Втулка	<i>HRC</i> 25–30
	Калибр-скоба (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 58–60
	Напильник (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 61–63
	Фреза пальцевая	<i>HRC</i> 56–58
	Нож мясорубки	<i>HRC</i> 56–58

№ задания	Наименование детали (дополнительные требования при эксплуатации или к материалу детали)	Твердость <i>HRC</i> , (<i>HB</i>)
7	Шатун	<i>HB</i> 200–250
	Пружина клапана	<i>HRC</i> 40–45
	Стамеска (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 50–55
	Прошивной пуансон (легированная сталь)	<i>HRC</i> 54–55
	Внутреннее кольцо роликового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
8	Болт шатуна	<i>HB</i> 250–300
	Рессора	<i>HRC</i> 45–50
	Пуансон (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 55–58
	Матрица (легированная сталь)	<i>HRC</i> 56–58
	Внутреннее кольцо шарикового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
9	Шток	<i>HB</i> 300–350
	Пружина плоская	<i>HRC</i> 45–50
	Пила (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 48–52
	Фреза (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	Наружное кольцо шарикового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
10	Рычаг	<i>HRC</i> 35–40
	Пружина натяжная	<i>HRC</i> 40–45
	Калибр (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 60–62
	Сверло (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	Шарик шарикового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
11	Зубчатое колесо	<i>HRC</i> 50–55
	Рессора	<i>HRC</i> 40–45
	Штамп вырубной (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 54–58
	Калибр (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	Наружное кольцо шарикового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
12	Ось	<i>HRC</i> 40–45
	Рессора	<i>HRC</i> 45–50
	Скальпель (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 61–63
	Пресс-форма (легированная сталь)	<i>HRC</i> 40–45
	Внутреннее кольцо роликового подшипника	<i>HRC</i> 58–62

№ задания	Наименование детали (дополнительные требования при эксплуатации или к материалу детали)	Твердость <i>HRC</i> , (<i>HB</i>)
13	Шпиндель	<i>HB</i> 350–400
	Пружина	<i>HRC</i> 40–45
	Пробойник (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 50–55
	Нож гильотины (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–60
	Наружное кольцо роликового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
14	Вилка	<i>HRC</i> 35–45
	Рессора	<i>HRC</i> 38–42
	Зенкер (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 61–63
	Гибочный штамп (легированная сталь)	<i>HRC</i> 56–58
	Ролик подшипника	<i>HRC</i> 58–62
15	Дисковая звездочка	<i>HRC</i> 30–40
	Кольцо стопорное	<i>HRC</i> 40–45
	Эксцентрик (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	Фреза (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	Внутреннее кольцо шарикового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
16	Шестерня	<i>HRC</i> 45–50
	Пружина	<i>HRC</i> 40–45
	Развертка (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 58–60
	Плашка (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	Наружное кольцо шарикового подшипника	<i>HRC</i> 58–62
17	Карданный вал	<i>HRC</i> 35–40
	Рессора	<i>HRC</i> 45–50
	Напильник (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 61–63
	Развертка (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	Шарик подшипника	<i>HRC</i> 58–62
18	Рычаг	<i>HRC</i> 35–40
	Фланец	<i>HRC</i> 25–30
	Сегмент режущего аппарата жатки	<i>HRC</i> 55–60
	Фреза (легированная сталь)	<i>HRC</i> 56–58
	Рессора	<i>HRC</i> 40–45

№ задания	Наименование детали (дополнительные требования при эксплуатации или к материалу детали)	Твердость <i>HRC</i> , (<i>HB</i>)
19	Звенья приводной цепи	<i>HRC</i> 38–45
	Шайбы гровера	<i>HRC</i> 35–40
	Матрица (легированная сталь)	<i>HRC</i> 50–55
	Пуансон (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 55–60
	Шпиндель	<i>HRC</i> 35–40
20	Храповик	<i>HRC</i> 25–30
	Пружина прямоугольного сечения	<i>HRC</i> 40–45
	Развертка (углеродистая сталь)	<i>HRC</i> 58–60
	Калибр (легированная сталь)	<i>HRC</i> 58–62
	Ролик подшипника	<i>HRC</i> 58–62

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить основные положения работы.
3. Выбрать марки сталей для деталей машин определенных типов (в соответствии с предлагаемыми вариантами заданий) и внести сведения о выбранных марках сталей, а также режимах термообработки в таблицу.
4. Пояснить техническую сущность выбранных видов термообработки.
5. Проанализировать полученные результаты.
6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о принципах выбора материалов для изготовления деталей машин.
3. Таблица, содержащая сведения о выбранных марках сталей, а также режимах термообработки.
4. Краткое описание технической сущности выбранных видов термообработки.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое сталь?
2. Как маркируются углеродистые стали?
3. Как маркируются легированные стали?
4. Укажите принципы классификации сталей.
5. Какими факторами определяется выбор материала для конкретного изделия?
6. Какие разновидности термической обработки вы знаете?

10. РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Цель работы – приобретение навыков выбора методов обработки заготовок разных типов деталей сельскохозяйственной техники поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающих повышение прочностных свойств деталей с учетом условий их эксплуатации.

Студент должен знать: разновидности методов обработки заготовок поверхностным пластическим деформированием, принципы их рационального выбора и особенности их практической реализации применительно к различным типам деталей.

Студент должен уметь: осуществлять рациональный выбор методов обработки заготовок различных типов деталей сельскохозяйственной техники поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающих повышение прочностных свойств деталей с учетом условий их эксплуатации.

Основные сведения [8]

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) представляет собой одну из разновидностей обработки заготовок деталей давлением, при которой пластически деформируется только поверхностный слой материала заготовки.

Существуют разнообразные методы ППД. Все они имеют широкие возможности в управлении параметрами состояния поверхностного слоя деталей и, следовательно, их эксплуатационными свойствами. Однако их применение требует научно обоснованного подхода, поскольку каждый из этих методов имеет вполне определенные области применения, наиболее предпочтительные в технологическом и экономическом отношении.

ППД осуществляется инструментом, деформирующие элементы которого взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью по схемам качения, скольжения или внедрения.

В методах ППД, реализуемых по схеме качения, деформирующие элементы (ролик или шарик) прижимаются к поверхности детали с некоторой фиксированной силой и перемещаются относи-

тельно нее, совершая при этом вращение вокруг своей оси. В зоне локального контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью возникает очаг пластической деформации, который перемещается вместе с инструментом, благодаря чему поверхностный слой последовательно деформируется. ППД при качении инструмента по поверхности деформируемого материала называется *накатыванием*. В свою очередь, накатывание подразделяется на *обкатывание* и *раскатывание* в зависимости от того, какие поверхности обрабатываются: наружные (выпуклые) или внутренние (вогнутые).

К методам ППД, в которых деформирующие элементы работают по схеме скольжения, относятся: *выглаживание* – осуществляется инструментом с деформирующим элементом из твердого сплава или алмаза, который скользит по обрабатываемой поверхности; *дорнование* – осуществляется специальным инструментом – дорном, который протягивается через отверстие; *калибрование* – применяется для обработки внутренних и наружных поверхностей вращения с помощью различных инструментов: шариков, роликов, деформирующих прошивок, калибрующих фильтров и т. п.

Накатывание, выглаживание, дорнование и калибрование относятся к методам статического ППД. Наряду с ними существуют большое число методов динамического (ударного) ППД, в которых инструмент внедряется в поверхностный слой детали. К этим методам относятся: *дробеструйная обработка* – осуществляется потоком чугуновой, стальной или другой дроби, который направляется, например, роторным дробеметом; *центробежно-ударная обработка* – осуществляется с помощью стальных шариков или роликов, расположенных на периферии вращения диска; *виброобработка* – характеризуется наличием колебательного движения деформирующих элементов. Разновидностями виброобработки являются вибронакатывание, вибровыглаживание, ультразвуковая обработка.

Особую группу методов ППД составляют методы *электромеханической обработки*, характерное отличие которой заключается в искусственном нагреве металла электрическим током в зоне пластической деформации.

В зависимости от назначения методы ППД подразделяются на три класса. К первому классу относятся методы, связанные только с пластическим деформированием поверхностных слоев заготовок

и практически не изменяющие исходную точность их размеров (накатывание, выглаживание, дробеструйная, центробежно-ударная, виброобработка). Ко второму классу относятся методы, формирующие форму и размеры отдельных элементов заготовок (накатывание зубьев, резьб, фасонных поверхностей). Третий класс объединяет методы отделочно-упрочняющей обработки поверхности заготовок без изменения их формы (дорнование, калибрование).

Методы ППД способствуют повышению долговечности деталей машин. В частности, благодаря применению этих методов увеличиваются:

- *статическая, динамическая и усталостная прочность* – свойство материала не разрушаться под действием, соответственно, статических (постоянных) нагрузок, динамических (быстро изменяющихся во времени по величине, направлению или точке приложения) нагрузок и циклических нагрузок (периодически повторяющихся нагрузок с регулярно возникающими напряжениями в материале, что способствует образованию усталостных трещин);

- *контактная прочность* – способность рабочей поверхности сопротивляться разрушению под действием контактных напряжений сжатия или сдвига, многократно возникающих в процессе эксплуатации (на поверхности зуба зубчатого колеса, шарика и беговой дорожки подшипника и т. п.), а также *контактная жесткость* – способность поверхностных слоев контактирующих тел сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать;

- *прочность посадок*, т. е. прочность соединения деталей, характер которого определяется величиной получающихся в нем зазоров и натягов;

- *износостойкость* – сопротивление материалов или деталей изнашиванию, оцениваемое длительностью работы до предельного износа.

Выбор метода ППД зависит от вида обрабатываемого материала, требований к свойствам поверхностного слоя, формы и размеров деталей и эксплуатационных условий.

Методические указания

В работе требуется осуществить рациональный выбор методов обработки заготовок различных типов деталей сельскохозяйственной техники поверхностным пластическим деформированием,

обеспечивающих повышение прочностных свойств деталей с учетом условий их эксплуатации, а также указать эффекты упрочнения, обеспечиваемые выбранными методами.

Рациональный выбор методов обработки заготовок поверхностным пластическим деформированием осуществляется на основании анализа данных табл. 1 в соответствии с предлагаемыми преподавателем вариантами индивидуальных заданий, в которых указываются наименования упрочняемых деталей (поверхностей). Следует также пояснить техническую сущность каждого из выбранных методов и эффектов упрочнения, достигаемых выбранными методами.

Сведения о выбранных методах ППД следует оформить в виде таблицы:

Деталь (поверхность)	Метод ППД	Эффект упрочнения
1		
2		
3		
и т. д.		

Пример представления сведений о выбранных методах ППД

Деталь (поверхность)	Метод ППД	Эффект упрочнения
1. Рабочая поверхность матрицы (плоская поверхность)	Электромеханическая обработка роликами и многошариковыми и роликовыми торцовыми головками	Повышение износостойкости, контактной прочности и жесткости

Таблица 1

Области применения методов ППД

Метод ППД	Область применения	Улучшающие эксплуатационные свойства
Плоские поверхности		
1	Накатывание роликами и шариками	Прямолинейные направляющие и торцовые поверхности оборудования
		Износостойкость, контактная жесткость

Метод ППД		Область применения	Улучшающие эксплуатационные свойства
2	Обкатывание многошариковыми торцовыми жесткими и упругими головками	Прямолинейные направляющие оборудования	Износостойкость, контактная жесткость
3	Вибронакатывание одно- и многошариковыми головками	Прямолинейные направляющие оборудования, торцовые поверхности дисков, подпятников	Износостойкость, контактная жесткость
4	Дробеструйная обработка	Направляющие оборудования, рессоры	Износостойкость, усталостная прочность
5	Обработка инструментом центробежно-ударного действия	Прямолинейные и торцовые поверхности оборудования, рессоры и др.	Износостойкость, усталостная прочность
6	Алмазное выглаживание и вибровыглаживание	Торцовые поверхности фланцев, распределителей и блоков гидромашин	Износостойкость, контактная прочность и жесткость
7	Электромеханическая обработка роликами и многошариковыми и роликовыми торцовыми головками	Прямолинейные направляющие качения оборудования, торцовые рабочие поверхности фланцев, колец упорных конических подшипников	Износостойкость, контактная прочность и жесткость
8	Формообразование обкатыванием жестким многороликовым обкатником	Кольцевые торцовые пазы	Износостойкость, контактная жесткость

Метод ППД		Область применения	Улучшающие эксплуатационные свойства
Наружные поверхности вращения			
9	Обкатывание однороликовым обкатником	Жесткие оси, валы гладкие и ступенчатые, штоки, шейки коленчатых валов	Износостойкость, прочность посадок, усталостная прочность
10	Обкатывание двухроликовым обкатником	Маложесткие оси, валы и штоки (вытяжной инструмент, шток гидроамортизатора, вал ротора нагнетателя, ось центрифуги, шестерня привода, крестовина карданного вала, кулачковые валы)	Износостойкость, усталостная прочность
11	Обкатывание трехроликовыми упругими обкатками	Жесткие и маложесткие оси, валы, трубы и штоки гладкие и ступенчатые	Износостойкость, усталостная прочность, прочность посадок
12	Обкатывание многошариковыми обкатниками	Нежесткие гладкие оси, валы, штоки и трубы, ось центрифуги	Износостойкость, усталостная прочность
13	Обкатывание жесткими и дифференциальными многороликовыми обкатниками	Нежесткие оси, штоки, валы гладкие и ступенчатые, длинные штоки гидроцилиндров	Износостойкость, усталостная прочность, контактная прочность
14	Обкатывание между роликами	Небольшие маложесткие оси и валики	Износостойкость, контактная и усталостная прочность
15	Виброобкатывание	Оси, штоки, валы и трубы гладкие	Износостойкость, контактная

Метод ППД		Область применения	Улучшающие эксплуатационные свойства
		и ступенчатые (шток гидроцилиндра, прецизионные цилиндрические направляющие, плунжер, прокатные валки, каретка направляющая, поверхности валов под уплотнения, поршни, шарниры, вальцы)	и усталостная прочность
16	Алмазное выглаживание и вибровыглаживание	Маложесткие оси, валы, штоки и трубы гладкие и ступенчатые (штоки гидроцилиндров и амортизаторов, поверхности валов под уплотнения, золотники распределительных устройств, плунжеры гидросистем, кулачковый вал, поршневые кольца, поршни, прокатные валки, ролики подшипников качения, шаровые опоры и крестовины карданных валов, вал водяного насоса и ротора нагнетателя, шарнирные пальцы)	Износостойкость, контактная прочность
17	Дробеструйная обработка	Крупногабаритные оси и валы	Износостойкость, усталостная прочность
18	Обработка инструментом центробежно-	Жесткие оси, валы гладкие и ступенчатые (крестовины, пальцы	Усталостная прочность

Метод ППД		Область применения	Улучшающие эксплуатационные свойства
	ударного действия	траков, крупногабаритные поршневые кольца)	
19	Электромеханическая обработка	Маложесткие оси, валы, трубы и штоки, штоки гидроцилиндров, поворотные кулаки автомобиля, вытяжные пуансоны, поршневые пальцы, опорные шейки валов под подшипники, крестовина, валики рес-сорных подвесок, втулки и пальцы траков, поршневые кольца	Износостойкость
20	Формообразующая калибрующая обработка	Малогабаритные цилиндрические детали (поршневые пальцы)	Износостойкость, усталостная прочность
<i>Внутренние поверхности вращения</i>			
21	Раскатывание одношариковым раскатным устройством	Для отверстий большого диаметра, малой и средней длины (втулки подшипников скольжения)	Износостойкость
22	Раскатывание многошариковым раскатником упругого действия	Для отверстий среднего диаметра и длины (цилиндры поршневых насосов и гидрозажимов)	Износостойкость
23	Раскатывание многошариковым жестким раскатником	Для отверстий $d > 20$ мм средней длины (гильзы гидроцилиндров)	Износостойкость
24	Раскатывание однороликовым	Для отверстий большого диаметра,	Износостойкость

Метод ППД		Область применения	Улучшающие эксплуатационные свойства
	раскатным устройством	средней и большой длины (станины, платформы)	
25	Раскатывание многороликовым раскатником упругого действия	Для отверстий среднего диаметра и неограниченной длины (гильзы гидроцилиндров)	Износостойкость
26	Раскатывание многороликовым жестким раскатником	Для отверстий $d > 20$ мм и неограниченной длины (гильзы гидроцилиндров)	Износостойкость
27	Раскатывание с запрессовкой	Для тонкостенных втулок	Износостойкость, прочность посадок
28	Калибрование шариками	Для отверстий малого диаметра и длины (отверстия проушин)	Износостойкость, контактная прочность
29	Прошивка выглаживающими прошивками	Для отверстий $d < 100$ мм и малой длины ($l < 50$ мм) (втулки подшипников скольжения, поршневые пальцы, корпус распылителя, гильза плунжера, седло нагнетательного клапана)	Износостойкость
30	Дорнование	Для отверстий $d < 200$ мм и неограниченной длины (гильзы гидроцилиндров, втулки накатных роликов, вариаторов и траков, цилиндры амортизаторов)	Износостойкость

Метод ППД		Область применения	Улучшающие эксплуатационные свойства
31	Дорнование с запрессовкой	Для запрессованных втулок подшипников скольжения	Износостойкость, прочность посадок
32	Алмазное выглаживание и вибровыглаживание	Для отверстий различных диаметров и небольшой длины (втулки и вкладыши подшипников скольжения, крышка маслососа, шестерня промежуточная, крышка лабиринта корпуса подшипника, отверстие шатуна, диск компрессора)	Износостойкость, прочность посадок
33	Виброраскатывание	Для отверстий $d > 20$ мм и неограниченной длины (втулки гидропередач, втулки шарнирных соединений)	Износостойкость, прочность посадок
34	Обработка инструментом центробежно-ударного действия	Для отверстий $d > 70$ мм и неограниченной длины (тормозной барабан)	Износостойкость, контактная и усталостная прочность
35	Электромеханическое раскатывание	Для отверстий $d > 50$ мм и неограниченной длины (гильзы гидроцилиндров, блок цилиндров двигателя)	Износостойкость
36	Комбинированная обработка протяжками-дорнами	Для отверстий $d < 200$ мм и неограниченной длины (гильзы и кольца гидроцилиндров, втулки траков,	Износостойкость

Метод ППД		Область применения	Улучшающие эксплуатационные свойства
		шестерни, звездочки, ступицы)	
37	Комбинированная обработка (расточивание + раскатывание)	Для отверстий $d > 50$ мм и неограниченной длины (корпус редуктора, гильзы гидроцилиндров, отверстия под поворотный кулак)	Износостойкость
38	Комбинированная обработка ротационным инструментом	Для отверстий $d > 100$ мм и неограниченной длины (гильзы гидроцилиндров)	Износостойкость
Фасонные поверхности			
39	Обкатывание, выравнивание, электромеханическая обработка галтелей и сферических канавок	Галтели $r > 1$ мм (валы, штоки, плунжеры, торсионы, оси колесных пар)	Усталостная прочность, износостойкость
40	Дробеструйная центробежно-ударная обработка галтелей и сферических канавок	Галтели $r > 2$ мм (валы, плунжеры)	Усталостная прочность
41	Обкатывание, виброобкатывание, выравнивание, дробеструйная и центробежно-ударная обработка,	Сферические и фасонные поверхности тел вращения $d > 10$ мм и неограниченной длины (сфера шарнирного пальца, дифференциалы, пружины)	Износостойкость, контактная прочность

Метод ППД		Область применения	Улучшающие эксплуатационные свойства
	электромеchanическая обработка сферических и фасонных поверхностей вращения неосесимметричных фасонных поверхностей		
42	Формообразующее раскатывание	Детали типа тонкостенных втулок $d < 200$ мм и $l < 100$ мм	Износостойкость, контактная прочность
<i>Червяки и наружные резьбы</i>			
43	Обкатывание и электромеchanическая обработка роликом	Крупномодульные червяки	Износостойкость
44	Формообразующее накатывание плоскими плашками	Мелкие резьбы на деталях $d < 20$ мм (шпильки, болты)	Статическая, динамическая и усталостная прочность
45	Формообразующее радиальное накатывание резьбовыми роликами	Мелкие резьбы с шагом $P < 2$ мм на деталях с $d > 10$ мм и $d < 20$ мм (шпильки, болты)	Статическая, динамическая и усталостная прочность
46	Формообразующее продольное накатывание резьб	Мелкие резьбы с шагом $P < 2$ мм на деталях $d > 5$ мм и неограниченной длины (шпильки, болты)	Статическая, динамическая и усталостная прочность
<i>Внутренние резьбы</i>			
47	Раскатывание резьб	Крупные резьбы ходовых механизмов	Статическая, динамическая

Метод ППД		Область применения	Улучшающие эксплуатационные свойства
			и усталостная прочность, износостойкость
<i>Зубья зубчатых колес</i>			
48	Накатывание роликами	Впадины зубьев тяжело нагруженных зубчатых колес	Усталостная прочность
49	Обкатывание и электромеханическая обработка червячно-роликовыми обкатниками	Боковые поверхности крупномодульных $m > 3$ мм зубчатых колес	Износостойкость, контактная прочность
50	Обкатывание и электромеханическая обработка червяками	Боковые поверхности мелко- и среднемодульных зубчатых колес	Износостойкость
51	Обдувка дробью и обработка инструментом центробежно-ударного действия	Боковые поверхности средне- и крупномодульных зубчатых колес	Усталостная и контактная прочность
<i>Шлицы</i>			
52	Формообразующее накатывание шлицов	Шлицы небольших размеров	Усталостная прочность

Варианты индивидуальных заданий

№ задания	Наименование упрочняемых деталей (поверхностей)
1	Направляющие оборудования (плоские поверхности)
	Крупногабаритные оси и валы (наружные поверхности вращения)

№ задания	Наименование упрочняемых деталей (поверхностей)
	Гильзы гидроцилиндров (внутренние поверхности вращения)
	Втулки гидропередат, втулки шарнирных соединений (внутренние поверхности вращения)
	Шлицы (шлицевые поверхности)
2	Торцовые поверхности дисков, подпятников, колец упорных конических подшипников, фланцев, деталей станков и оборудования, кольцевые торцовые пазы (плоские поверхности)
	Поршневые пальцы (наружные поверхности вращения)
	Втулки подшипников скольжения (внутренние поверхности вращения)
	Корпус редуктора, отверстия под поворотный кулак (внутренние поверхности вращения)
	Крупные резьбы (внутренние резьбовые поверхности)
3	Маложесткие оси, валы и штоки (наружные поверхности вращения)
	Цилиндры поршневых насосов и гидрозажимов (внутренние поверхности вращения)
	Втулки накатных роликов, вариаторов и траков, цилиндры амортизаторов (внутренние поверхности вращения)
	Крупногабаритные оси и валы (наружные поверхности вращения)
	Кольца гидроцилиндров, втулки траков, шестерни, звездочки, ступицы (внутренние поверхности вращения)
4	Гильзы гидроцилиндров (внутренние поверхности вращения)
	Отверстия в станинах (внутренние поверхности вращения)
	Запрессованные втулки подшипников скольжения (внутренние поверхности вращения)
	Крупномодульные червяки (резьбовые поверхности)
	Впадины зубьев тяжело нагруженных зубчатых колес (поверхности зубьев)
5	Жесткие оси, валы, штоки, шейки коленчатых валов, трубы (наружные поверхности вращения)
	Тонкостенные втулки (внутренние поверхности вращения)

№ задания	Наименование упрочняемых деталей (поверхностей)
	Поршневые пальцы, корпус распылителя, гильза плунжера, седло нагнетательного клапана (внутренние поверхности вращения)
	Тормозной барабан (внутренние поверхности вращения)
	Мелкие резьбы (наружные резьбовые поверхности)
6	Нежесткие гладкие оси, валы, штоки и трубы (наружные поверхности вращения)
	Отверстия проушин (внутренние поверхности вращения)
	Вкладыши подшипников скольжения, крышка маслососа, шестерня промежуточная, крышка лабиринта корпуса подшипника, отверстие шатуна, диск компрессора (внутренние поверхности вращения)
	Галтели (фасонные поверхности)
	Боковые поверхности зубчатых колес (поверхности зубьев)

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить основные положения работы.
3. Выбрать методы ППД, используемые для обработки деталей (поверхностей) определенных типов (в соответствии с предлагаемыми вариантами заданий) и внести сведения о выбранных методах ППД в таблицу.
4. Пояснить техническую сущность выбранных методов.
5. Проанализировать полученные результаты.
6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о методах ППД.
3. Таблица, содержащая сведения о выбранных методах ППД.
4. Краткое описание технической сущности выбранных методов ППД.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Укажите особенности ППД как одной из разновидностей обработки заготовок деталей давлением.
2. Дайте классификацию методов ППД по схемам взаимодействия деформирующих элементов инструментов с обрабатываемой поверхностью.
3. Дайте классификацию методов ППД по назначению.
4. Какие разновидности методов статического ППД вы знаете?
5. Какие разновидности методов динамического (ударного) ППД вы знаете?
6. Какие разновидности эффектов упрочнения, достигаемых методами ППД, вы знаете?
7. Укажите принципы выбора методов ППД для обработки заготовок деталей машин.

11. УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН ИМПУЛЬСНЫМ ЗАКАЛОЧНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ЖИДКОСТЬЮ

Цель работы – изучение особенностей технологии импульсного закалочного охлаждения жидкостью, приобретение практических навыков в обосновании оптимальных технологических параметров режима упрочнения.

Студент должен знать: основные технологические параметры и особенности реализации процесса импульсного закалочного охлаждения жидкостью.

Студент должен уметь: обосновывать оптимальные технологические параметры режима упрочнения деталей и разрабатывать технологические процессы импульсного закалочного охлаждения жидкостью.

Общие сведения [10]

Условия работы деталей рабочих органов машин (ДРОМ) являются определяющими при выборе материала и технологии их изготовления. Абразивная среда (песок, глина, гравелистые частицы и камни), в которой эксплуатируются сменные детали почвообрабатывающих и кормоуборочных машин, создает экстремальные условия для их работы. Для обеспечения длительной эксплуатации сменных деталей, работающих в тяжелых условиях абразивного изнашивания, характерных для почв республики, необходимо при их производстве применять качественные конструкционные стали и соответствующие технологии их упрочнения.

Ведущие фирмы – производители деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин – выпускают широкий набор сменных деталей нового поколения: лемех, отвал, долото, полевая доска, диски борон, ножи измельчающих аппаратов кормоуборочных машин, ножи косилок, сегментные ножи кукурузных жаток, копачи и подрезающие ножи ботвы свеклоуборочных комбайнов, оборотные лапы и зубья культиваторов с активными рабочими органами, стрелчатые лапы, лапы глубокорыхлителей и др. Все они характеризуются высокими физико-механическими свойствами и показателями работоспособности. Конкурентоспособность изделий

обеспечивается наукоемкими технологиями обработки соответствующего стального проката.

Высокие показатели надежности деталей достигаются разработкой и реализацией западноевропейскими фирмами наукоемких технологий (рис. 1): «Conit» – *Kverneland*, Норвегия; «Triplex» и «Dreilagenmaterial» – *Huard*, Франция; «Rabid» – *Rabewerk*, Германия; *Rabe*, Венгрия. Применяются лазерные и плазменные способы упрочнения деталей в сочетании со специальными процессами термической обработки, а также новые материалы, например, «Permanit» – *Vogel&Noot*, Австрия.

Изделия, полученные с применением технологий «Conit» и «Triplex», обладают высокой конкурентоспособностью и наиболее соответствуют ударно-абразивным условиям эксплуатации. Отличительной особенностью этих изделий является 3-слойное поперечное сечение, так называемое диссипативное (градиентное) структурное строение. Поверхностные слои изделий имеют твердость до 67 HRC и высокую прочность – 1200...1800 МПа. При этом сравнительно пластичная сердцевина обеспечивает повышенную ударную вязкость изделий.

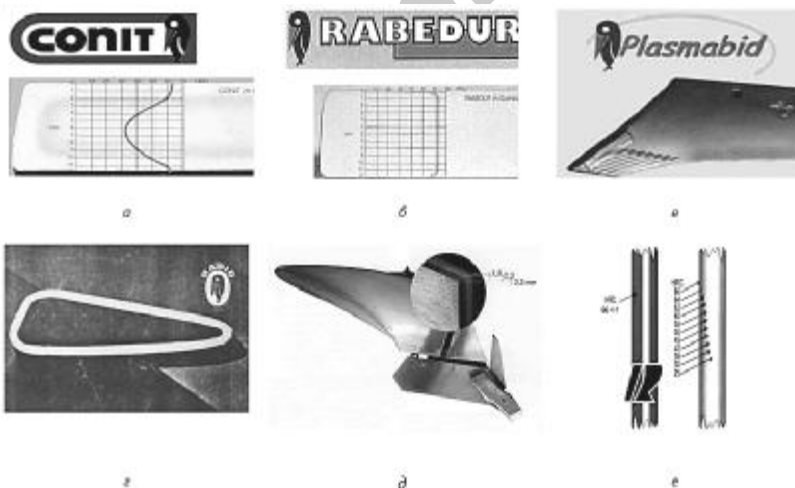


Рис. 1. Характерные признаки образцов деталей, изготовленных западноевропейскими фирмами по технологиям:

а – «Conit»; б – «Rabedur»; в – «Plasmabid»; г – «Rabid»;
 д, е – «Triplex» (Dreilagenmaterial)

Западноевропейские фирмы-производители почвообрабатывающих и посевных машин используют более 30 марок стали с различными свойствами. В обязательном порядке поставляемый специализированными фирмами-поставщиками металлопрокат подвергается входному контролю его качества (соответствие хим-составу). Ключевое место при производстве ДРОМ специалисты фирм отводят целенаправленной термической обработке, обеспечивающей изделиям соответствующее структурное строение и твердость. Поэтому, после входного контроля качества стального проката, контроль осуществляется на всех последующих операциях технологического маршрута.

Для изготовления ДРОМ применяются разработанные отечественные технологии, позволяющие производить конкурентоспособные изделия. В последние годы при производстве ДРОМ (рис. 2) получила применение технология импульсного закалочного охлаждения жидкостью (ТИЗОЖ). Она применяется для объемно-поверхностной заправки сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин, преимущественно изготавливаемых из сталей пониженной прокаливаемости.

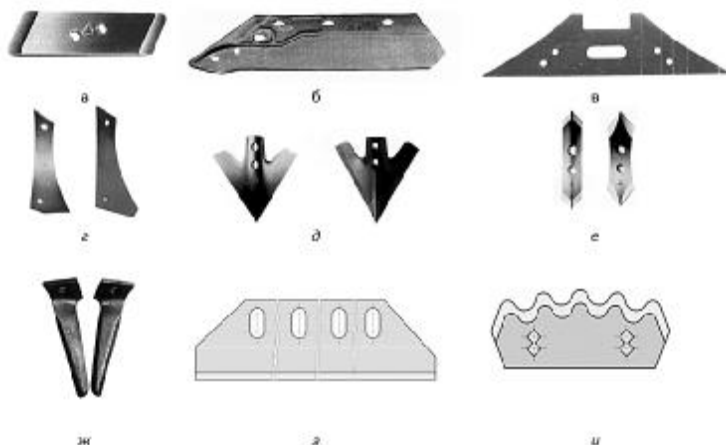


Рис. 2. Типовые представители сменных деталей рабочих органов почвообрабатывающих и кормоуборочных машин:

а – долото; *б* – лемех; *в* – полевая доска; *г* – груди отвалов; *д* – стрелчатые лапы; *е* – оборотные лапы; *ж* – зубья роторных борон; *з* – нож измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна; *и* – нож измельчителей рулонов

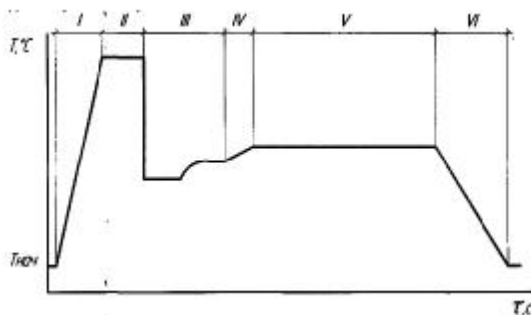


Рис. 3. Технологическая схема

упрочнения стальных заготовок с применением ТИЗОЖ:

I – стадия нагрева до температуры аустенитизации; *II* – стадия выдержки при температуре аустенитизации; *III* – стадия охлаждения до температуры самоотпуска; *IV* – стадия нагрева до температуры низкого отпуска; *V* – стадия выдержки при температуре низкого отпуска; *VI* – стадия охлаждения на воздухе

Внешние поверхности трения ДРОМ, имея дисперсную структуру мартенсита, обладают комплексом высоких механических и триботехнических свойств: твердость около 60 HRC; прочность не менее 2000 МПа; ударная вязкость свыше 1 МДж/м²; коэффициент относительной абразивной износостойкости не менее 3,0...3,5.

Микротвердость в поперечном сечении макрошлифов закаленных образцов из стали 60ПП (рис. 4) убывает в направлении сердцевины образца. Анализ численных значений микротвердости свидетельствует о наличии в поверхностных слоях структуры мартенсита, далее – троостомартенситной (бейнитной), а в сердцевине – трооститной структуры.

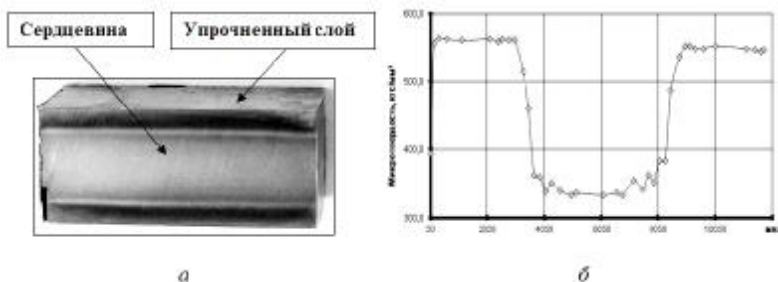


Рис. 4. Схема исследования (а) и график (б) изменения микротвердости в поперечном сечении плоского образца

Характер распределения микротвердости по толщине опытных образцов дисков лушильников после импульсной закалки и низкого отпуска, изготовленных из стали 30ХГСА, представлен на рис. 5.

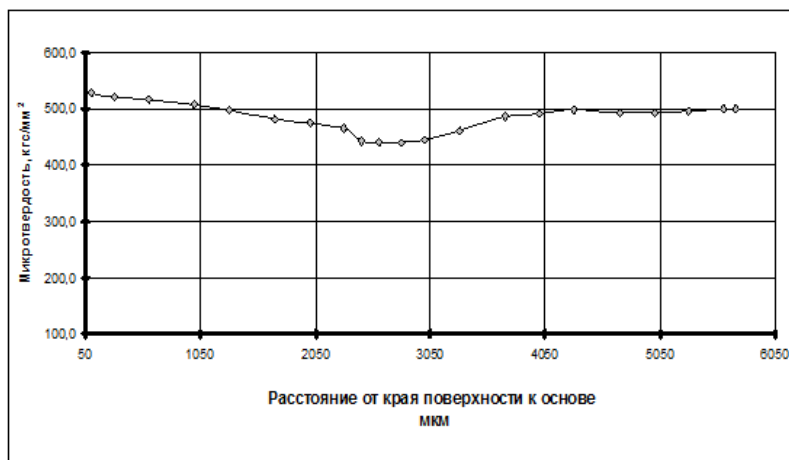


Рис. 5. Распределение твердости по толщине опытных образцов дисков лушильников, изготовленных из стали 30ХГСА

По техническому уровню ДРОМ, изготовленные в соответствии с разработанными технологиями, являются конкурентоспособными изделиями в сравнении с лучшими зарубежными аналогами.

Методические указания

Упрочнение деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин импульсным закалочным охлаждением жидкостью выполняется на экспериментальной закалочной установке с различной интенсивностью охлаждения. Принципиальная схема установки для реализации ТИЗОЖ представлена на рис. 6. Детали нагреваются до значения температуры закалки с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$, время аустенитизации составляет 10 мин. Охлаждение осуществляется потоком воды при различных значениях давления и расхода. Значения температуры воды должны находиться в пределах $5...35^\circ\text{C}$, время охлаждения – в интервале $0,5...5,0$ с в зависимости от толщины изделия.

Техническое обеспечение технологии ИЗОЖ включает функционирование взаимосвязанных технических средств, с помощью которых реализуются:

- импульсная подача охлаждающей жидкости к закалочному устройству;
- управление продолжительностью технологического цикла охлаждения;
- управление в автоматическом режиме обратным снабжением охлаждающей жидкостью.

Оценка оптимальных технологических параметров термического цикла осуществляется по показателям качества изделия. На первое место среди этих показателей ставится твердость металла изделия, приобретаемая в процессе термической обработки.

Нагрев стальных заготовок осуществляется в печи сопротивления ПКМ 3.6.2/11ИЗ. Режим нагрева регулируется в широком интервале его параметров. Температура нагрева контролируется микропроцессорным контроллером «ТЕРМОДАТ-14». Точность измерения температуры нагрева образцов составляет $\pm 2^\circ\text{C}$.

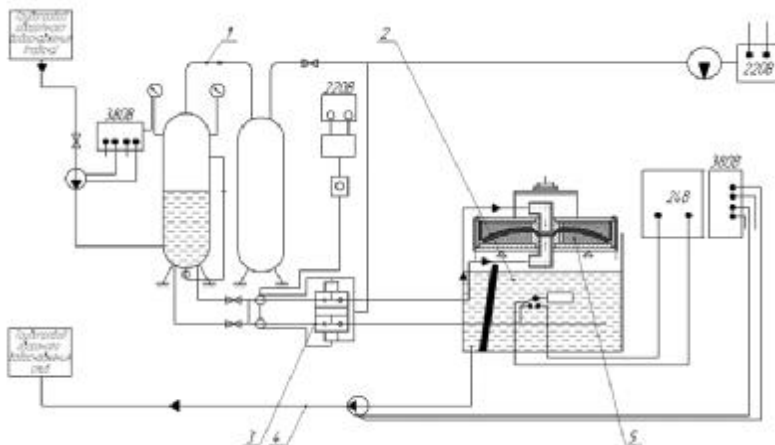


Рис. 6. Принципиальная схема технологического модуля для импульсного закалочного охлаждения жидкостью:

- 1 – блок управления расходом охлаждающей жидкости;
2 – блок управления отводом охлаждающей жидкости; 3 – система управления клапаном; 4 – система обратного водоснабжения; 5 – закалочное устройство

Охлаждение заготовок производится потоком воды в специальном закалочном устройстве 5 (рис. 6). Охлаждающая среда (вода) подается к закалочному устройству от гидропневмоаккумулятора через краны с пневмоприводами. Пневмоприводы приводятся в действие от блока управления с электромагнитными клапанами. Продолжительность цикла охлаждения заготовки задается с помощью электронного реле времени с точностью $\pm 0,1$ с. Давление охлаждающей среды в гидропневмоаккумуляторах создается бустерным насосом, управление которым осуществляется станцией и реле давления. Контроль давления осуществляется манометром с точностью $\pm 0,01$ МПа. Технологический модуль, укомплектованный исполнительными и измерительными техническими средствами, позволяет изучать влияние параметров режима нагрева комплекса свойств изделий.

Пример исследования динамики изменения твердости образцов из стали 60ПП после импульсной закалки при исходной температуре нагрева 800°C в зависимости от давления воды в гидропневмоаккумуляторе приведен на рис. 7.

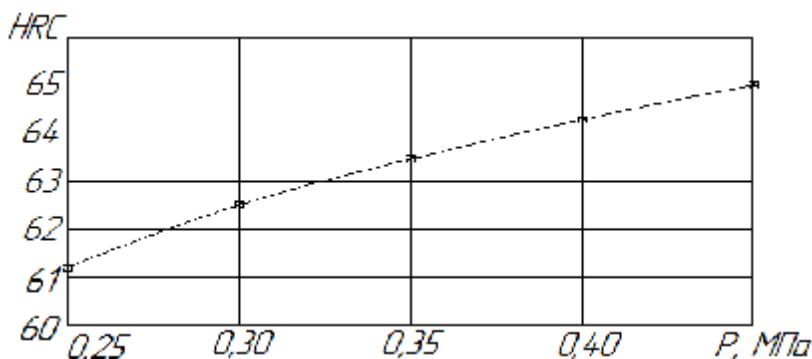


Рис. 7. Изменение твердости образцов из стали 60ПП в зависимости от давления в гидропневмоаккумуляторе при закалке с температуры нагрева 800°C

Операции импульсного закалочного охлаждения жидкостью (нагрев, закалка, низкий отпуск), связанные с термической обработкой, следует осуществлять в соответствии с технологическими параметрами и их режимами в пределах установленных отклонений в следующей последовательности:

1) в печи сопротивления ПКМ 3.6.2/11ИЗ, предпочтительнее – с защитной средой, нагреть заготовку до значений закалочной температуры;

2) в закалочном устройстве технологического модуля для термической обработки охладить заготовку (давление – 0,4 МПа, значения температуры закалочной жидкости – 18...35 °С);

3) в печи электрической сопротивления СНО-4-8-2.5/6ИЗ произвести отпуск деталей при температуре 160...180 °С в течение 1...1,5 ч с последующим охлаждением на воздухе;

4) измерить твердость поверхности детали на приборе Роквелла ТК-2 в соответствии со схемой измерений чертежа и техническими условиями на деталь. Допускается использование прибора «Импульс-2М».

Недостаточная твердость закаленной детали может быть из-за недогрева (низкая температура в печи, недостаточная выдержка при правильной температуре в печи) или недостаточно интенсивного охлаждения. В первом случае мартенсит не обладает достаточной твердостью (не содержит достаточно углерода); во втором – не переохлаждается до мартенситного превращения, и структура полностью или частично состоит из продуктов перлитного распада аустенита (тробит, сорбит).

Повышение температуры печи или увеличение выдержки в первом случае устраняет пониженную твердость закаленных деталей. Во втором случае следует применять более интенсивное охлаждение.

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить устройство и принцип работы технологического оборудования для импульсной закалки.
3. Обосновать технологические параметры импульсного закалочного охлаждения жидкостью.
4. Провести закалку образцов с температурами нагрева и скорости охлаждения в обоснованных интервалах.
5. Измерить твердость закаленных образцов на приборе Роквелла. По данным измерения твердости установить оптимальные температуру нагрева под закалку и скорость охлаждения. Результаты представить в виде таблицы.

Протокол исследования термической обработки стали

Номер образца	Температура нагрева, °C	Охлаждающая жидкость	Давление охлаждающей жидкости, МПа	Твердость после закалки, HRC

6. Разработать маршрутно-операционный технологический процесс импульсного закалочного охлаждения жидкостью.

7. Проанализировать полученные результаты.

8. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Общие сведения о технологии импульсного закалочного охлаждения жидкостью.

3. Параметры технологического процесса упрочнения импульсного закалочного охлаждения жидкостью с определением их численных значений.

4. Протокол исследования термической обработки стали и обоснование оптимальных технологических параметров.

5. Маршрутно-операционный технологический процесс импульсного закалочного охлаждения жидкостью.

6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие упрочняющие технологии применяются западноевропейскими фирмами при изготовлении деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин?

2. Перечислите характерные признаки деталей, изготовленных по технологии «Conit».

3. Перечислите характерные признаки деталей, изготовленных по технологии «Rabedur».

4. Перечислите характерные признаки деталей, изготовленных по технологии «Plasmabid».

5. Перечислите характерные признаки деталей, изготовленных по технологии «Rabid».

6. Перечислите характерные признаки деталей, изготовленных по технологии «Triplex» (Dreilagmaterial).

7. Изложите сущность технологии импульсного закалочного охлаждения жидкостью.

8. Каковы значения механических и триботехнических характеристик деталей, упрочненных импульсным закалочным охлаждением жидкостью?

12. УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН ДИФфуЗИОННЫМ НАМОРАЖИВАНИЕМ ИЗНОСОСТОЙКИМИ СПЛАВАМИ

Цель работы – изучение особенностей технологии диффузионного намораживания износостойкими сплавами, приобретение практических навыков в обосновании оптимальных технологических параметров режима упрочнения.

Студент должен знать: основные технологические параметры и особенности реализации процесса диффузионного намораживания износостойкими сплавами.

Студент должен уметь: обосновать оптимальные технологические параметры режима упрочнения деталей и разработать технологический процесс диффузионного намораживания износостойкими сплавами.

Общие сведения [1, 10, 11]

Повышение ресурса почворежущих элементов является одной из важных проблем современного сельскохозяйственного машиностроения и ремонтного производства. При их изготовлении используют, как правило, традиционные методы упрочняющей технологии (закалку и отпуск). Однако, как показывает практика, закалка деталей из конструкционных сталей не всегда решает задачу повышения их износостойкости. Значительно более эффективным является наплавка почворежущих профилей деталей твердыми сплавами высокой износостойкости. В современном машиностроении широко используются детали и элементы биметаллических конструкций (стальная основа – износостойкое покрытие). Особенно эффективно применение подобных конструкций в почворежущих элементах, применяемых в сельском хозяйстве, которые относятся к быстроизнашивающимся деталям.

Одним из наиболее эффективных способов упрочнения и восстановления быстроизнашивающихся деталей является способ наращивания присадочного сплава диффузионным намораживанием из расплава. Способ предполагает рациональное использование свойств основного и наплавленного металлов в зависимости от условий работы и характера изнашивания. Технология позволяет

наплавлять износостойкий материал на детали сложной формы и переменного сечения. При наплавке намораживанием достигается высокая производительность и эффективность работ. Наибольшее распространение этот способ получил при упрочнении и восстановлении почворезущих элементов.

При получении почворезущих элементов с биметаллической рабочей частью диффузионным намораживанием реализуются две взаимосвязанные задачи: во-первых, обеспечивается прочное соединение наплавленного металла с основным, во-вторых, формируется металлопокрытие с заданным химическим составом, необходимой толщины и с высокими физико-механическими свойствами.

Сущность процесса намораживания заключается в последовательном затвердевании сплава на очищенной от оксидной пленки поверхности заготовки, погруженной в расплав. Из-за разности исходных температур расплава (T_3) и заготовки (T_1) (причем $T_1 \ll T_3$), контактируемый локальный объем расплава с поверхностью заготовки охлаждается до значения температуры фазового перехода. Это позволяет при определенных температурно-временных условиях получить на поверхности заготовки, находящейся в расплаве, слой затвердевшего присадочного сплава соответствующей толщины. Принципиальная схема диффузионного намораживания погружением в расплав представлена на рис. 1.

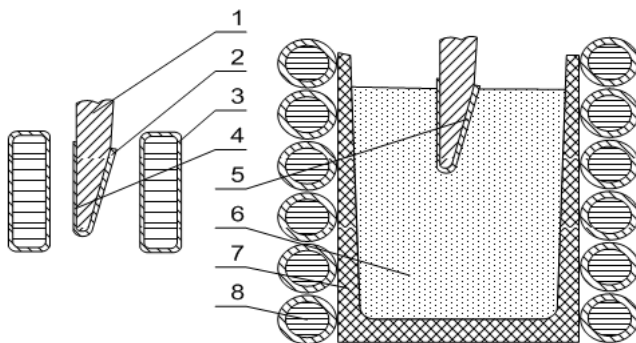


Рис. 1. Принципиальная схема намораживания погружением в расплав присадочного материала:

- 1 – заготовка; 2 – флюс; 3 – индуктор закалочного генератора; 4 – теплоизоляционное покрытие; 5 – износостойкое покрытие (намораживаемый слой); 6 – расплав; 7 – тигель; 8 – индуктор плавильной установки

Экспериментально установлено, что качество наплавленных диффузионным намораживанием изделий зависит от значений технологических параметров технологии. Они определяют прочность сцепления между затвердевшим слоем и основой, толщину затвердевшего слоя, структуру, характер дефектов и пр.

Осуществление процесса механизированного диффузионного намораживания погружением в расплав присадочного материала определяется целым рядом физико-химических и технологических условий. Главными из них являются активация и флюсование заготовки, наличие перегрева расплава присадочного материала и его сродство с металлом заготовки, соответствующий состав и свойства флюса, оптимальная скорость погружения и время выдержки заготовки в расплаве металла. Кроме этого необходимо учитывать кинетику тепловых, механических, физико-химических явлений, вклад и характер воздействия которых на процесс весьма существенно меняются во времени.

Соединение наплавленного металла с основой в процессе диффузионного намораживания осуществляется путем установления внутренних (межатомных) связей между соединяемыми поверхностями. Сложный комплекс явлений, происходящих в процессе образования биметаллического соединения при диффузионном намораживании, условно можно разделить на следующие этапы:

- удаление оксидных пленок и активация наплавливаемой поверхности заготовки;
- непрерывно-последовательное вытеснение флюса и смачивание активированной поверхности заготовки при ее погружении в расплав присадочного материала;
- затвердевание присадочного материала на поверхности заготовки и диффузия в пограничном слое.

Формирование металлопокрытия на поверхности изделия при диффузионном намораживании из расплава происходит в результате протекания сложных процессов взаимодействия и теплообмена между расплавами флюса и присадочного материала и поверхностью заготовки. В общем случае намораживание перегретого расплава можно представить как результат последовательно протекающих процессов смачивания поверхности твердого металла расплавом, растворения и взаимной диффузии на границе раздела твердого металла и расплава и кристаллизации расплава. Причем

смачивание и затвердевание сплава, а также сохранение затвердевшего слоя реализуются при определенном сочетании исходных температур перегрева расплава и активации, скорости погружения и продолжительности выдержки заготовки в расплаве и происходят до тех пор, пока заготовка за счет скрытой теплоты кристаллизации не нагреется до значения температуры плавления присадочного материала. После чего произойдет оплавление затвердевшего слоя. Влияние температуры активации заготовки на процесс намораживания представлено на рис. 2. На графике приведены кривые намораживания для температур образца 600, 700, 800, 900 °С.

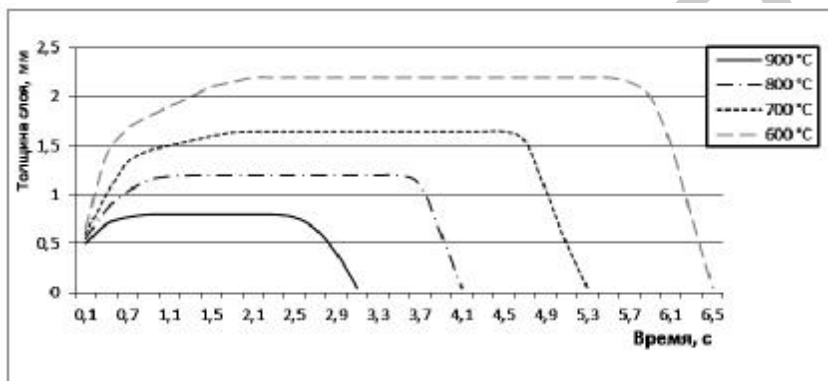


Рис. 2. Влияние температуры активации заготовки на продолжительность процесса намораживания и толщину слоя намораживаемого сплава

Одним из основных требований, предъявляемых к технологии намораживания на заготовку, является обеспечение монолитного сплавления присадочного сплава с наращиваемой поверхностью. Для получения монолитного сплавления при намораживании на заготовку производится предварительная подготовка наращиваемой поверхности. Подготовка осуществляется повышением температуры заготовки (термическая активация) и очисткой наращиваемой поверхности от оксидных пленок и технологических загрязнений (физико-химическая активация).

Очистка поверхности от окислов и технологических загрязнений, защита от окисления и обезуглероживание наплавляемой поверхности достигается флюсованием. При этом флюс должен быть достаточно вязким, чтобы удерживаться на вертикальных и наклонных

поверхностях сплошным слоем, обеспечивающим защиту нагретой заготовки, и подвижным, чтобы легко вытеснялся расплавленным присадочным сплавом с наплавляемой поверхности, не препятствуя их взаимодействию.

В технологическом исполнении эксперимент по диффузионному намораживанию сплава заключается в следующем. В тигле плавильной установки расплавляют какой-либо сплав. Температура расплава T_3 превышает температуру его затвердевания $T_{кр}$. Величина перегрева $\Delta T = T_3 - T_{кр}$ во избежание интенсивного перемешивания (принудительной конвекции) должна быть незначительной. Для исследуемого сплава и условий его плавки перегрев составлял 30...50 °С. При таком перегреве сплавы, как правило, имеют низкую вязкость и высокую текучесть. Это соответствует жидкотвердому состоянию сплава. В расплаве находятся твердые зародыши в виде суспензии. Расплав в тигле выдерживается при заданном значении температуры на протяжении всего процесса экспериментирования. Температура расплава по всему объему ванны постоянна ($T_3 = \text{const}$).

После приготовления расплава осуществляется подготовка образца к наплавке. Образец нагревают до определенной температуры T_1 . температура нагрева образца перед наплавкой значительно ниже температуры расплава, то есть $T_3 \gg T_1$. поверхность образца при температуре T_1 подвергается активации (нагрев и флюсование). После активации образца его погружают в расплав. Температура образца перед погружением в расплав по всему сечению одинакова ($T_1 = \text{const}$). Образец погружается в расплав плавно и выдерживается в нем некоторое время (τ).

За время пребывания образца в расплаве на поверхности пластины затвердевает слой сплава толщиной ξ .

По мере увеличения продолжительности контактирования заготовки с расплавом толщина затвердевшего слоя возрастает. Однако время, в течение которого наблюдается рост и сохранение слоя затвердевшего сплава, ограничено. Максимальное его значение называется критическим временем. Если продолжительность пребывания заготовки в расплаве превышает это критическое время, то происходит лавинообразное расплавление затвердевшего слоя. Установлено, что различным исходным температурам флюсования соответствуют различные значения критического времени (см. рис. 2).

Обработка опытных данных по толщине намораживания была проведена в виде зависимости:

$$\xi = k\sqrt{\tau},$$

где k – коэффициент пропорциональности, полученный экспериментально.

При диффузионном намораживании возможно применение как флюсов, так и присадочных сплавов с различной температурой их плавления. Однако, несмотря на различие температур предварительного нагрева заготовки и плавления присадочного сплава, достигаются одинаковые показатели прочности сцепления (100 %) по отношению к оптимальному (предельно возможному) их уровню. Положительный эффект в данном случае состоит в реализации максимально возможной прочности сцепления, оцениваемой пределом прочности на растяжение намораживаемого сплава.

Известно, что флюсы на основе буры для наплавки обладают высокой смачиваемостью и растекаемостью по поверхности заготовки. В этом заключаются их основные функциональные свойства. Боратные флюсы широко апробированы на практике. Одним из наиболее характерных свойств расплавленных флюсов (жидкостей) является текучесть. При перемещении одного слоя жидкости относительно другого оказывается сопротивление, мерой которого является величина коэффициента вязкости (внутреннего трения). Именно с такими перемещениями приходится сталкиваться при флюсовании (активации) наплавляемой поверхности. При изготовлении биметаллических изделий намораживанием их необходимо подвергнуть флюсованию, основное назначение которого заключается в очистке поверхности от оксидов и других загрязнений, а также в недопущении образования новых оксидных пленок до осуществления их наплавки (во время нагрева и переноса заготовки с позиции активации на позицию наплавки). Препятствием проникновению кислорода к наплавляемой поверхности является наличие на ней слоя жидкого флюса. Вязкость жидкого флюса определяет в данном случае толщину удерживаемого на поверхности заготовки слоя флюса, необходимого для защиты наплавляемой поверхности от окисления кислородом воздуха.

Установлено, что минимальными значениями вязкости, при которых флюс сплошным защитным слоем устойчиво удерживается

на наплавляемой поверхности, является вязкость около $1,3 \text{ Па} \cdot \text{с}$. При меньших значениях вязкости на наплавляемой поверхности не сохраняется сплошной слой флюса, и из-за его стекания образовавшиеся незащищенные участки интенсивно окисляются. Это является причиной отсутствия сплавления между замороженным сплавом и основой (наличие сплошных пленок или локально распространенных на наплавляемой поверхности не допускается).

Нецелесообразно осуществлять подготовку наплавляемой поверхности и последующее намораживание при вязкости флюса более чем $2,4 \text{ Па} \cdot \text{с}$, так как вязкий флюс не отделяется при погружении заготовки в расплав, ухудшается его растекание по поверхности заготовки, увеличивается расход флюса. Не отделившийся флюс, аналогично оксидной пленке, препятствует сплавлению замороженного слоя с основой.

Установлено, что при одном и том же флюсе и одинаковой температуре заготовки, скоростью относительного перемещения присадочного сплава и наплавляемой поверхности можно достичь как полного отделения флюса, так и отсутствия или частичного его отделения, а вместе с тем, и различного уровня сцепления в биметалле, полученном диффузионным намораживанием. Для обеспечения высокого качества сцепления в биметалле, полученном диффузионным намораживанием, скорость относительного перемещения присадочного сплава и наплавляемой поверхности не должна превышать $0,2 \text{ м/с}$, а вязкость флюса должна находиться в интервале $1,3 \dots 1,5 \text{ Па} \cdot \text{с}$. При использовании флюса, состоящего из 40 мас. ч. буры и 60 мас. ч. борного ангидрида, оптимальные значения температуры флюсования находятся в интервале $850 \dots 900 \text{ }^\circ\text{C}$.

Установлены средние максимальные значения прочности сцепления ряда наплавочных износостойких высокохромистых чугунов со стальной основой. Они составляют: для сплава из 80 мас. ч. смеси КБХ и 20 мас. ч. сормайта-1 – 184 МПа ; для сормайта-1 – 353 МПа ; для сплава из 80 мас. ч. смеси КБХ и 20 мас. ч. ПГ-ХН80СРЗ – 224 МПа ; для сплава ПГ-ФБХ-6-2 – 173 МПа ; для сплава ПР-С27 – 244 МПа . Такие биметаллические изделия удовлетворяют требованиям, предъявляемым к наплавленному сплаву, предназначенному для работы в условиях ударно-абразивного изнашивания.

Методические указания

Технология диффузионного намораживания включает выполнение ряда последовательных операций:

- плавку износостойкого присадочного сплава и поддержание в заданном интервале температуры расплава в тигле;
- нагрев токами высокой частоты до технологической температуры активации наращиваемой поверхности заготовки;
- очистку наплавляемой поверхности от оксидов погружением и выдержкой в расплаве флюса;
- наплавку заготовки погружением и кратковременной выдержкой в расплаве присадочного сплава;
- охлаждение полученного биметаллического изделия.

Технологический регламент процесса диффузионного намораживания погружением в расплав износостойкого материала С-27 будет иметь следующий вид.

- Плавильная. Предназначается для плавки износостойкого сплава С-27 (У40Х28Н2С2ВМ). Для плавки сплава применяется индукционная печь ПИ-50/10 со среднечастотным генератором СЧГ-30/10. Плавка прутков ведется в тигле ТГ-20 или ТГ-30. После завершения плавки прутков С-27 массой 20 или 30 кг устанавливается технологическая температура (около 1400 °С) для ведения диффузионного намораживания. Она должна быть на 30...50 °С выше температуры затвердевания сплава.

- Плавильная. Предназначается для плавки флюса состава 40 мас. ч. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и 60 мас. ч. B_2O_3 . Для плавки флюса применяется электрическая печь ПЛ 5/12,5. Флюс содержится в тигле из жаростойкого чугуна. После завершения плавки устанавливается технологическая температура в пределах 900...950 °С для ведения последующей активации.

- Термическая (рис. 3, а). Предназначается для нагрева наплавляемой части заготовки индукционным методом до 850...900 °С. Для этого применяется высокочастотная установка в составе: среднечастотный генератор СЧГ-50/10, закалочный блок БЗ-100/10 и станция водоохлаждения СВ-1,7В.

- Активация (рис. 3, б). В процессе выполнения активации нагретая часть заготовки погружается в расплав флюса и выдерживается в нем в течение 3...5 с. Для погружения, выдержки

и извлечения заготовки может использоваться мультипликатор собственного изготовления.

- Наплавочная (рис. 3, в). Нагретая и проактивированная часть заготовки погружается в тигель с расплавленным износостойким сплавом С-27. Погружение осуществляется со скоростью 0,1...0,2 м/с. Выдержка заготовки в расплаве составляет 1,0...1,5 с. Для погружения, выдержки и извлечения заготовки может использоваться манипулятор собственного изготовления.

- Термическая. Охлаждение на воздухе после извлечения из расплава металлов наплавленной детали.

- Контрольная. Предназначается для контроля твердости и толщины наплавленного слоя – 3...5 заготовок из 1000 шт. Твердость проверяется на приборе Роквелла ТК-2. Толщина слоя измеряется штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм.

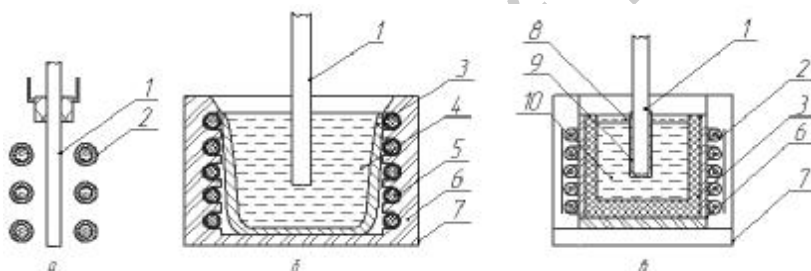


Рис. 3. Схемы операций диффузионного намораживания:

а – нагрев заготовки; *б* – активация заготовки во флюсе; *в* – диффузионное намораживание погружением в расплав; 1 – заготовка; 2 – индуктор; 3б – тигель из жаростойкого чугуна, 3в – тигель графитсодержащий ТГ-20 (ТГ-30); 4 – расплав флюса (60 мас. ч. V_2O_5 + 40 мас. ч. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$); 5 – электроннагреватель карбидокремниевый КЭН А 8/180/150; 6 – футеровка из огнеупорного кирпича; 7 – каркас (кожух) нагревательной печи; 8 – защитный слой флюса АН-348А; 9 – износостойкий слой; 10 – расплав износостойкого сплава

На стальную основу почворезущего профиля с применением диффузионного намораживания погружением в расплав могут наноситься слои других износостойких сплавов: С1, ФБХ-6-2, КБХ, УС-25 и их композиции.

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить устройство и принцип работы технологического оборудования для диффузионного намо­раживания износостойкими сплавами.
3. Обосновать технологические параметры процесса диффузионного намо­раживания.
4. Разработать маршрутно-операционный технологический процесс диффузионного намо­раживания износостойкими сплавами.
5. Проанализировать полученные результаты.
6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения и принципиальная схема технологии диффузионного намо­раживания износостойкими сплавами.
3. Параметры технологического процесса диффузионного намо­раживания износостойкими сплавами с определением их численных значений.
4. Маршрутно-операционный технологический процесс диффузионного намо­раживания износостойкими сплавами.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Изложите сущность технологии диффузионного намо­раживания износостойкими сплавами.
2. Назовите параметры технологического процесса диффузионного намо­раживания.
3. Как осуществляется подготовка поверхности детали к нанесению износостойкого покрытия?
4. Каково влияние температуры заготовки на толщину слоя на­плавленного диффузионным намо­раживанием износостойкого сплава?
5. Каково влияние температуры расплава на толщину слоя на­плавленного диффузионным намо­раживанием износостойкого сплава?

6. Каково влияние продолжительности погружения заготовки в расплав на толщину слоя наплавленного диффузионным наложением износостойкого сплава?

7. Как зависит прочность сцепления наплавленного износостойкого сплава с основным металлом заготовки от качества очистки наплавленной поверхности и скорости погружения ее в расплав?

13. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Цель работы – изучение методики ускоренных испытаний на абразивное изнашивание и приобретение практических навыков их проведения.

Студент должен знать: методики определения показателей, определяющих устойчивость деталей сельскохозяйственных машин к интенсивному абразивному, ударно-абразивному изнашиванию и пластической деформации.

Студент должен уметь: проводить ускоренные испытания экспериментальных образцов деталей на абразивное изнашивание, обрабатывать и анализировать их результаты.

Общие сведения [10]

Детали рабочих органов машин работают при статических, циклических и ударных нагрузках. Они контактируют с различными рабочими средами (различной влажности почвами и растительной массой, гравелистыми частицами, включая камни, и другими средами). Многолетние наблюдения за работоспособностью деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники свидетельствуют, что выход из строя происходит из-за деформаций, поломок и изнашивания. При абразивном изнашивании ведущими являются процессы многократного деформирования поверхности скользящими по ней частицами и микрорезание. Степень развития этих процессов зависит от давления и соотношения твердости материала и абразивных частиц. Так как твердость последних велика, то наибольшей износостойкостью обладают материалы, структура которых состоит из твердой карбидной фазы и удерживающей их высокопрочной матрицы.

Ресурс деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин непосредственно связан с условиями эксплуатации (нагрузками, скоростью перемещения, давлением на поверхность трения и т. д.). Для деталей, работающих в условиях абразивного, ударно-абразивного изнашивания, пластической деформации основными оценочными показателями являются: твердость, прочность, ударная

вязкость, относительная износостойкость. Установлено, что твердость таких деталей должна составлять не менее 50 *HRC*, прочность – выше 1200 МПа, ударная вязкость – более 60 Дж/см², коэффициент относительной износостойкости – не менее 1,7 в сравнении с образцом-эталоном.

При конструировании конкурентоспособных деталей разработчику приходится поэтапно решать многочисленные инженерные задачи: обоснование размеров и формы изделия, выбор материала и технологии его упрочнения, методы испытания. В условиях нарастания объемов работ по испытанию машин и их составных частей требуется обоснованный переход к методам ускоренных испытаний, основу которых составляют установленные закономерности оценки их ресурса.

К числу нормативных показателей, определяющих устойчивость деталей сельскохозяйственных машин, подвергающихся интенсивному абразивному, ударно-абразивному изнашиванию и пластической деформации, относятся: твердость, ударная вязкость, износостойкость, устойчивость к пластической деформации, прочность, микроструктура.

Для определения численных значений нормативных показателей выполняются контрольные вырезки металла исследуемой детали.

К контрольной вырезке металла предъявляются следующие требования:

- вырезку образцов производят механическим способом;
- при изготовлении образцов принимают меры (охлаждение, соответствующие режимы обработки), исключающие возможность изменения свойств металла при нагреве или наклепе, возникающих в результате механической обработки;
- заусенцы на гранях плоских образцов должны быть удалены механическим способом без повреждения поверхности образца. Кромки в рабочей части образцов допускается подвергать шлифовке и зачистке на шлифовальном круге или шлифовальной шкуркой;
- шероховатость поверхности образцов после механической обработки *Rz* должна быть не более 40 мкм по ГОСТ 2789–73.

Места вырезки заготовок для образцов, их количество, направление продольной оси образцов по отношению к заготовке, величины припусков при вырезке и механической обработке – по ГОСТ 7564–97

и другой нормативно-технической документации на правила отбора проб, заготовок и образцов или на металлопродукцию.

Количество изготавливаемых образцов из контрольных вырезок определяется специалистами, выполняющими исследование, но во всех случаях для металлографического исследования и определения твердости должно быть не менее одного образца (шлифа), для испытания на ударную вязкость и абразивное изнашивание – не менее трех образцов, для остальных видов – не менее двух образцов.

Из металла контрольной вырезки изготавливаются образцы для следующих исследований (испытаний):

- образцы-шлифы для проведения металлографических исследований металла и замера твердости;
- образцы для испытания металла на растяжение;
- образцы для испытания металла на ударную вязкость;
- образцы для испытания металла на трехточечный изгиб;
- образцы для испытаний на износостойкость.

Допускается проводить определение твердости и микроструктуры безобразцовыми методами.

Твердость. Замер твердости производится переносными или стационарными твердомерами отечественного и импортного производства, пригодными для проведения замеров на слабо искривленных поверхностях.

Выбор нагрузки и индентора должен производиться с учетом толщины контролируемых элементов, шероховатость поверхности должна соответствовать требованиям действующей нормативно-технической документации и инструкций на применяемые приборы.

Образцы для измерения твердости вырезаются из контрольных вырезок и изготавливаются в соответствии с ГОСТ 9013–59, ГОСТ 2999–75 (и другими) применительно к выбранному методу измерения твердости.

Измерения твердости и обработка результатов измерения выполняются по ГОСТ 2999–79 и ГОСТ 9013–59.

Ударная вязкость. Ударная вязкость определяется на маятниковых копрах. Скорость движения маятника в момент удара должна быть:

- $(5 \pm 0,5)$ м/с – для копров с номинальной потенциальной энергией маятника 50,0 (5,0); 150 (15); 300 (30) Дж (кгс · м);

- $(4 \pm 0,25)$ м/с – для копров с номинальной потенциальной энергией маятника 25 (2,5); 15 (1,5); 4,5 (0,75) Дж (кгс · м);
- $(3 \pm 0,25)$ м/с – для копров с номинальной потенциальной энергией маятника 5,0 (0,5) Дж (кгс · м).

Допускается применять копры с другой номинальной потенциальной энергией маятника. При этом номинальное значение потенциальной энергии маятника должно быть таким, чтобы значение работы удара составляло не менее 10 % от номинального значения потенциальной энергии маятника.

Образцы для определения ударной вязкости подготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 9454–78 и имеющих концентратор вида «U». Рекомендуется одну из торцевых поверхностей образцов на ударную вязкость готовить под металлографический микрошлиф, что позволит более точно проследить за развитием деформации и разрушением образца. Форма и размеры образцов для испытания должны соответствовать указанным в табл. 1 и на рис. 1.

Допускается использовать образцы без надреза и с одной (двумя) необработанными, поверхностями, размеры которых по ширине отличаются от указанных в табл. 1.

Таблица 1

Размеры образцов для испытания на ударную вязкость

Концентратор		Тип образца	Длина L (пред. откл. $\pm 0,6$)	Ширина B	Высота H (пред. откл. $\pm 0,1$)	Высота рабочего сечения H_1
Вид	Радиус R					
U	$1 \pm 0,07$	1	65	$10,00 \pm 0,10$	10	$8,0 \pm 0,1$
		2		$7,50 \pm 0,10$		
		3		$5,00 \pm 0,05$		
		4		$2,00 \pm 0,05$	8	$6,0 \pm 0,1$
		5		$10,0 \pm 0,10$		
		6		$7,50 \pm 0,10$	10	$7,0 \pm 0,1$
		7		$5,00 \pm 0,05$		
		8		$10,00 \pm 0,10$		$5,0 \pm 0,1$
		9		$7,50 \pm 0,10$		
		10		$5,00 \pm 0,05$		

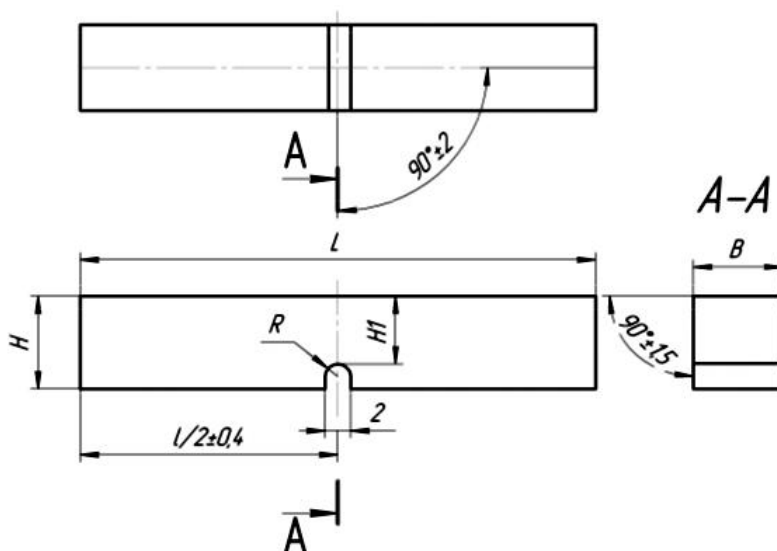


Рис. 1. Форма образца для испытаний на ударную вязкость

Испытания образцов металла на ударный изгиб и обработка результатов выполняются по ГОСТ 9454–78.

Износостойкость. Испытания на износостойкость проводятся при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы в соответствии с ГОСТ 23.208–79.

Схема испытательной установки приведена на рис. 2. Испытательная установка содержит привод 7, 8, обеспечивающий вращение резинового ролика 6 вокруг горизонтальной оси, образцедержатель 2, рычаг 3, прижимающий образец 1 к ролику, устройство 5, дозирующее подачу абразивных частиц в зону трения по направляющему лотку 4, устройство для контроля суммарного количества оборотов ролика в процессе испытаний.

Образцы для испытаний на износостойкость изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 23.208–79. Образцы исследуемых и эталонных материалов изготавливают в виде пластин шириной 30 мм, длиной 30...50 мм и толщиной h не менее 1 мм с допусками на размеры по 7-му классу точности по ГОСТ 24642–81, ГОСТ 24643–81 и шероховатостью рабочей поверхности не ниже 7-го класса по ГОСТ 2789–73.

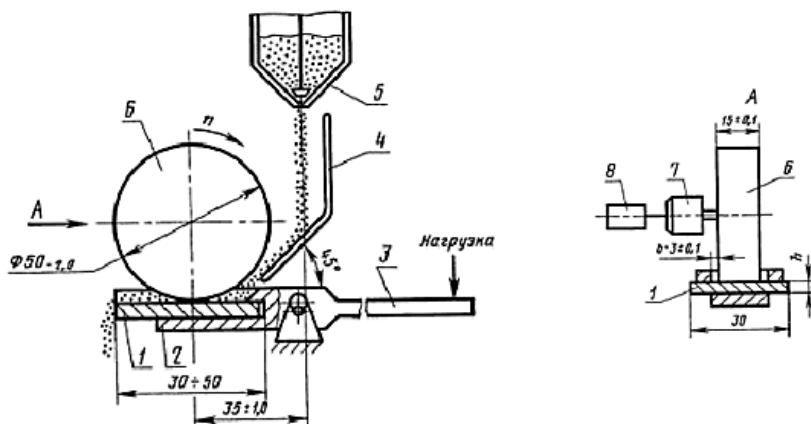


Рис. 2. Схема лабораторных испытаний образцов на изнашивание при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы

Допускается повторное использование испытанных образцов в участках, не подвергшихся изнашиванию, а также после удаления механической или иной обработкой следов изнашивания, оставшихся в результате предыдущих испытаний.

Перед испытаниями определяют твердость образцов по ГОСТ 2999–75. Отобранные образцы маркируют клеймением на нерабочих поверхностях.

Испытания образцов металла на устойчивость к абразивному износу и обработка результатов выполняются по ГОСТ 23.208–79.

Продолжительность испытания образца из исследуемого материала соответствует количеству оборотов ролика, приведенному в табл. 2. Испытания образца из эталонного материала проводят при 600 оборотах ролика. Отсчет оборотов проводят от момента начала подачи абразивного материала.

Таблица 2

Продолжительность испытания образцов в зависимости от их твердости

Твердость образца HV	Количество оборотов ролика
До 400	600
400...800	1800
Более 800	3600

Устойчивость к пластической деформации. Способность металла выдерживать заданную пластическую деформацию, характеризуемую углом изгиба или предельной пластичностью металла, характеризуемой углом изгиба до появления первой трещины, определяется прочностью образца при его изгибе вокруг оправки под действием статического усилия.

Испытание на изгиб проводят на универсальных испытательных машинах или прессах. Для проведения испытания применяют приспособления в виде двух опор с оправкой (рис. 3).

Образцы для испытания на трехточечный изгиб изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 14019–2003. Испытываются образцы натурной толщины.

Длину образца устанавливают в зависимости от толщины металла и толщины (диаметра закругления) оправки. Ориентировочную длину образца (L , мм) вычисляют по формуле

$$L = 2(a + D) + K, \quad (1)$$

где a – толщина или диаметр (диаметр вписанной окружности для многоугольного сечения образца, мм;

D – диаметр закругления (толщина) оправки, мм;

$K = 100...150$.

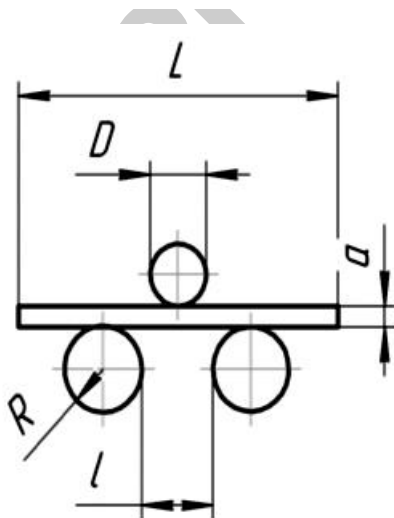


Рис. 3. Схема испытания образцов на изгиб

Диаметр закругления (толщина) оправки и радиус закругления опор (R , мм) устанавливают в соответствии с требованиями нормативно-технической документации на металлопродукцию. При отсутствии таких указаний диаметр закругления (толщину) оправки принимают равным двум толщинам (диаметрам) образца, а радиус закругления опор – не менее толщины (диаметра) образца.

Испытания образцов металла на трехточечный изгиб и обработка результатов испытаний выполняются в соответствии с ГОСТ 14019–2003.

Прочность при растяжении. Испытания на растяжение проводятся на разрывных и универсальных испытательных машинах, которые должны соответствовать требованиям ГОСТ 28840–90.

При изготовлении образцов на растяжение предпочтение следует отдавать пропорциональным плоским образцам натурной толщины. Для испытаний на растяжение изготавливаются пропорциональные плоские образцы тип 1 по ГОСТ 1497–84.

Форма и размеры образцов для испытания должны соответствовать указанному в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3

Размеры (мм) образцов для испытания на растяжение

Номер образца	a_0	b_0	$l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$	$l_0 = 11,3 \sqrt{F_0}$	l^*	B	h_1	L^{**}
1	12	30	105	210		40	60	
2	11	30	105	210		40	60	
3	10	30	100	200		40	60	
4	9	30	90	180		40	50	
5	8	30	85	170		40	50	
6	7	20	70	140		40	50	
7	6	20	65	130		40	50	
8	5	20	60	120		40	50	
9	4	20	50	100		40	50	
10	3	20	45	100		40	50	

$$*l = l_0 + (1,5 \dots 2,5) \sqrt{F_0}.$$

$$**L = l + 2(h_1 + h_2).$$

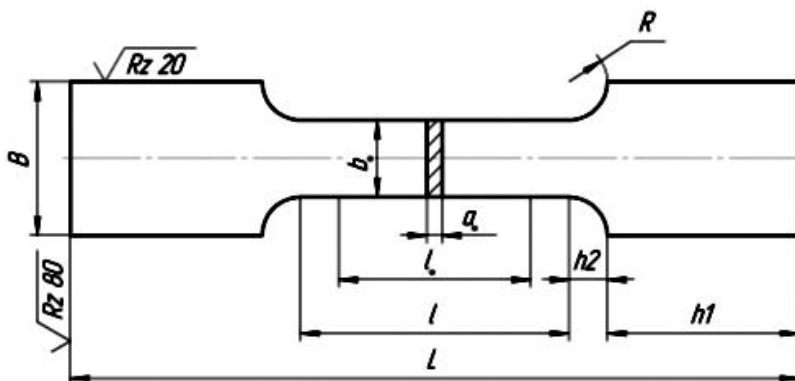


Рис. 4. Форма образцов для испытания на растяжение

Испытания образцов металла на растяжение и обработка результатов выполняются по ГОСТ 1497–84.

Микроструктура. Просмотр микроструктуры выполняется на металлографических микроскопах при кратности увеличения не менее $\times 100$. Выбор кратности увеличения осуществляется специалистами, проводящими металлографические исследования.

При необходимости, для выполнения исследований могут применяться электронографические, рентгеноструктурные, фазовые и другие методы исследования металла.

Для оценки микроструктуры проводят металлографические исследования основного и наплавленного металлов детали. Исследования проводят на образцах (шлифах) металла.

Образцы подготавливаются как металлографические шлифы, которые должны быть во всю толщину исследуемого металла.

Образцы (шлифы) не должны иметь «заваленных» плоскостей по кромкам. Это необходимо для выявления возможных поверхностных нарушений микроструктуры металла.

При анализе микроструктуры рекомендуется выполнять:

- металлографическую оценку микроструктуры по ГОСТ 5640–68;
- определение величины зерна по ГОСТ 5639–82.

В качестве эталонов микроструктуры используются данные ГОСТ 8233–56.

Методические указания

Сущность метода состоит в том, что при одинаковых условиях производят трение образцов исследуемого и эталонного материалов об абразивные частицы, подаваемые в зону трения и прижимаемые к образцу вращающимся резиновым роликом, измеряют износ образцов испытываемого и эталонного материалов, а износостойкость испытываемого материала оценивают путем сравнения его износа с износом эталонного образца.

Приборы и материалы. Испытания, схема которых представлена на рис. 2, проводят на испытательной установке ИМ-01 конструкции ВИСХОМ, содержащей привод, обеспечивающий вращение вокруг горизонтальной оси резинового ролика, образцедержатель, рычаг, прижимающий образец к ролику, устройство, дозирующее подачу абразивных частиц в зону трения по направляющему лотку, устройство для контроля суммарного количества оборотов ролика в процессе испытаний. Общий вид испытательной установки представлен на рис. 5.

Диаметр ролика должен быть в диапазоне 48...50 мм, ширина ролика – $(15 \pm 0,1)$ мм, твердость материала ролика – 78...85 ед. по ГОСТ 263–75, относительное остаточное удлинение ролика при разрыве – 15...20 % по ГОСТ 270–75, угол наклона направляющего лотка – $45^\circ \pm 2^\circ$, торцевые зазоры между стенками образцедержателя и роликом – $(3 \pm 0,1)$ мм. Не параллельность оси ролика рабочей поверхности образца – не более 0,1 мм.

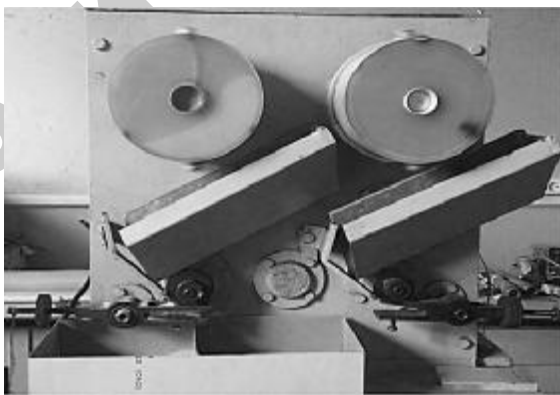


Рис. 5. Внешний вид испытательной машины ИМ-01

Абразивный материал – электрокорунд зернистостью 16-П по ГОСТ 3647–80 с относительным содержанием влаги не более 0,15 % используют при общей сравнительной оценке износостойкости. При оценке износостойкости в конкретных условиях изнашивания допускается использовать абразивный материал, соответствующий материалу, воздействию при эксплуатации, но с размером зерен не более 0,1 мм.

В этом случае характеристики абразивного материала приводят в протоколах испытаний. При применении стандартного абразивного материала указывают номер соответствующего стандарта. При применении нестандартного абразивного материала в протоколе испытаний указывают вид абразивного материала, месторождение, максимальный и минимальный размер зерен абразивного материала, их твердость, среднюю, удельную поверхность частиц и другие данные, необходимые для идентификации абразивного материала. Повторное использование абразивного материала не допускается.

Образцы исследуемых и эталонных материалов изготавливают в виде пластин шириной 30 мм, длиной 30...50 мм и толщиной не менее 1 мм с допусками на размеры по 7-му классу точности по ГОСТ 10356–63 и шероховатостью рабочей поверхности не менее 7-го класса по ГОСТ 2789–73. Эталонные образцы изготавливают из стали 45 по ГОСТ 1050–74 в отожженном состоянии с *HV* 190...200.

Допускается повторное использование испытанных образцов в участках, не подвергшихся изнашиванию, а также после удаления механической или иной обработкой следов изнашивания, образованных в результате предыдущих испытаний. Износ испытываемых и эталонных образцов определяют путем взвешивания до и после испытаний с погрешностью не более 0,1 мг. Потеря массы образца вследствие изнашивания при испытаниях должна составлять не менее 5 мг.

Подготовка к испытаниям. Перед испытаниями определяют твердость образцов по ГОСТ 2999–75 или ГОСТ 9013–59. Отобранные образцы маркируются клеймением на нерабочих поверхностях. Влажность абразивного материала проверяют по ГОСТ 5382–73 и при необходимости доводят ее до соответствия предъявляемым требованиям.

Проводят приработку ролика, тренируют его поверхность шлифовальной шкуркой типа 2 по ГОСТ 6456–82 зернистостью 8-П по ГОСТ 3647–71, закрепленной в образцедержателе на плоской стальной пластинке. Приработку проводят при нагрузке на ролик (22 ± 1) Н до полного прилегания к поверхности по всей длине образующей ролика. После приработки ролик промывают в ацетоне. На рабочей поверхности ролика после приработки не допускаются отличимые невооруженным глазом риски.

Проведение испытаний. Образец устанавливается в образцедержателе испытательной установки и прижимается рычагом 3 (см. рис. 2) к ролику с усилием $(44,1 \pm 0,25)$ Н. Ролик приводят во вращение в направлении, указанном на чертеже, с частотой $n = (60 \pm 2)$ мин⁻¹. Включают дозирующее устройство, обеспечивающее непрерывную подачу абразивного материала в зону трения. Непрерывность подачи абразивного материала в процессе испытаний контролируют по наличию абразивного материала по всей ширине ролика.

Отсчет оборотов производится от момента начала подачи абразивного материала. Испытания образца из исследуемого металла продолжают в течение времени, соответствующего количеству оборотов ролика, определяемому по табл. 2.

По окончании испытаний останавливают привод, снимают нагрузку, освобождают образец, промывают последовательно в промывочных жидкостях и взвешивают в соответствии с требованиями ГОСТ. Внешний вид участков поверхности образцов, подвергшихся изнашиванию, показан на рис. 6. При износе образца менее 5 мг устанавливают новый образец, и испытания проводят в течение времени, соответствующего удвоенному количеству оборотов ролика. При установке и съеме образца не допускается повреждение поверхностей. Результаты взвешивания образцов до и после испытаний заносят в протокол испытаний.

После каждых 12 испытаний проверяют наружный диаметр ролика и при диаметре менее 45 мм его заменяют. Для нового ролика производят приработку. Испытания образца из эталонного материала проводились при 600 оборотах ролика. Отсчет оборотов производится от момента начала подачи абразивного материала.

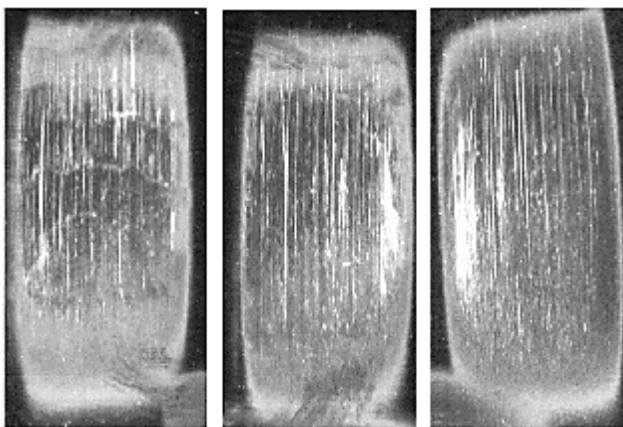


Рис. 6. Внешний вид лунок на поверхности образцов после испытаний на абразивное изнашивание при трении о нежестко закрепленный кварцевый абразив

Обработка результатов испытаний. По результатам взвешивания образцов до и после испытаний определялись: среднее арифметическое значение потери массы эталонных образцов $q_э$ и среднее арифметическое значение потери массы исследуемых образцов $q_{и}$ по формулам:

$$\bar{q}_э = \frac{\sum_{i=1}^3 q_{эi}}{3}; \quad (2)$$

$$\bar{q}_{и} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{иi}}{n}, \quad (3)$$

где $q_{эi}$ и $q_{иi}$ – значения потерь массы при испытаниях эталонных образцов и образцов исследуемого материала, г;

n – количество образцов исследуемого материала, шт.

Относительную износостойкость исследуемого материала ($K_{и}$) вычисляют по формуле

$$K = \frac{\bar{q}_3 \rho_{\text{и}} N_{\text{и}}}{\bar{q}_{\text{и}} \rho_3 N_3}, \quad (4)$$

где ρ_3 и $\rho_{\text{и}}$ – плотность эталонного и исследуемого материалов, г/см³;

N_3 и $N_{\text{и}}$ – количество оборотов ролика при испытаниях эталонного и исследуемого материалов.

Результаты представляются в виде табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний образцов на абразивное изнашивание

№ опыта	№ образца	Твердость HRC	Износ образца, мг			Среднее значение за три замера	Относительная износостой- кость
			№ замера				
			1	2	3		
Сталь 45, $n = 3600$, $N = 14,32$ Н, $t = 30$ мин							
1	Эталон	180–200 HB	6,7	6,1	6,5	6,4	1,0
60ПП, $n = 3600$, $N = 14,32$ Н, $t = 30$ мин							
2	1	50	3,5	3,9	3,7	3,7	1,73
3	2	55	3,4	2,9	3,2	3,1	2,06
4	3	60	2,4	2,1	2,4	2,4	2,66
5	4	65	1,6	1,5	1,4	1,5	4,27

Указанные вычисления производились с погрешностью не более 0,0001 г.

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить методику проведения ускоренных испытаний на абразивное изнашивание.
3. Выполнить измерение твердости исследуемых образцов и определить продолжительность испытаний.
4. Провести испытания образцов на абразивное изнашивание и обработать результаты.
5. Проанализировать полученные результаты.
6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о сущности ускоренных испытаний на износостойкость.
3. Схема лабораторных испытаний и их продолжительность в зависимости от твердости образцов.
4. Результаты и анализ ускоренных испытаний на абразивное изнашивание.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Каким видам изнашивания и разрушения подвергаются детали рабочих органов сельскохозяйственных машин в процессе эксплуатации?
2. Какие показатели относятся к числу нормативных, определяющих устойчивость деталей сельскохозяйственных машин к интенсивному абразивному, ударно-абразивному изнашиванию и пластической деформации?
3. Изложите сущность метода ускоренных испытаний на абразивное изнашивание, применяемое оборудование и материалы.
4. Как определяется продолжительность испытаний на износостойкость?
5. Приведите порядок подготовки образцов к испытаниям на абразивное изнашивание.
6. Приведите схему лабораторных испытаний образцов на изнашивание при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы.
7. Приведите зависимость, по которой рассчитывается относительная износостойкость исследуемого материала.

14. РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Цель работы – приобретение навыков выбора технологий упрочнения деталей сельскохозяйственной техники с учетом условий их эксплуатации и характера повреждений при эксплуатации.

Студент должен знать: разновидности упрочняющих технологий, принципы их рационального выбора и особенности их практической реализации применительно к различным типам деталей сельскохозяйственной техники.

Студент должен уметь: осуществлять рациональный выбор технологий упрочнения деталей сельскохозяйственной техники с учетом условий их эксплуатации и характера их повреждений при эксплуатации.

Основные сведения [8]

Существуют различные технологии упрочнения деталей машин агропромышленного производства, обеспечивающие улучшение эксплуатационных их свойств и повышение их долговечности. Выбор этих технологий требует научно-обоснованного подхода, поскольку каждая из них имеет вполне определенные области применения, наиболее предпочтительные в технологическом и экономическом отношении. Для осуществления рационального выбора технологий упрочнения деталей, необходимо учитывать, с одной стороны, условия эксплуатации деталей и характер их повреждений при эксплуатации, и, с другой, – эффекты упрочнения, обеспечиваемые различными упрочняющими технологиями, а также особенности реализации упрочняющих технологий в соответствии с присущими им механизмами упрочнения.

Основные эффекты упрочнения проявляются в повышении таких характеристик материала детали, как статическая, динамическая и усталостная прочность, контактная прочность и контактная жесткость, износостойкость (определение указанных характеристик дано в описании работы «Рациональный выбор методов обработки заготовок поверхностным пластическим деформированием»).

Основными механизмами упрочнения являются: объемное упрочняющее модифицирование (структурное и (или) химическое модифицирование всего объема материала детали); поверхностное упрочняющее модифицирование (структурное, химическое и (или) морфологическое модифицирование поверхностного слоя материала детали); формирование упрочняющих покрытий (нанесение на поверхность материала детали слоя дополнительного материала, отличающегося от материала детали по структуре и (или) химическому составу).

Объемное упрочняющее модифицирование целесообразно использовать для улучшения эксплуатационных свойств и повышения долговечности деталей, у которых рабочие напряжения распределены по сечению довольно равномерно. Для изготовления таких деталей применяют высокопрочные стали и сплавы, композиционные материалы. Однако большинство деталей работает в условиях, при которых эксплуатационная нагрузка воспринимается главным образом их поверхностным слоем. Соответственно, эксплуатационные свойства и долговечность таких деталей зависят от сопротивления поверхностного слоя разрушению. Для деталей, разрушение которых начинается с поверхности, целесообразно использовать поверхностное упрочняющее модифицирование и упрочняющие покрытия.

В общем случае тот или иной механизм упрочнения может быть характерен для разных упрочняющих технологий и, наоборот, та или иная упрочняющая технология может характеризоваться разными механизмами упрочнения. Так, поверхностное упрочняющее структурное и химическое модифицирование может быть обеспечено поверхностной термической обработкой и высокоэнергетической обработкой, поверхностное упрочняющее структурное и морфологическое модифицирование – поверхностным пластическим деформированием и магнитно-абразивной обработкой. Особое место занимает механизм упрочнения путем формирования упрочняющих покрытий.

Сведения по выбору технологий упрочнения деталей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Выбор технологий упрочнения деталей

1	I	Болты и шпильки резьбовых единений, собираемых с предварительной затяжкой и нагружаемых силами, вызывающими переменные напряжения
	II	Статические напряжения от предварительной затяжки и переменные напряжения от изменяющихся во время работы нагрузок
	III	Усталостные изломы, деформации
	IV	Накатывание резьбы болтов и шпилек
2	I	Гайки и крепежные отверстия под болты и шпильки в корпусных деталях
	II	Статические напряжения от предварительной затяжки и переменные напряжения от изменяющихся во время работы нагрузок
	III	Срез резьбы
	IV	Раскатывание резьбы болтов и шпилек
3	I	Колеса зубчатых передач
	II	Изгиб зубьев, деформирование контактного сжатия и сдвига рабочих поверхностей зубьев, трение и удары торцов зубьев зубчатых колес коробок передач при включении скорости
	III	Излом зуба (усталостный или из-за кратковременной перегрузки), осповидное выкрашивание, изнашивание или пластическое деформирование рабочих поверхностей зубьев, торцовое изнашивание зубьев зубчатых колес коробок передач, заедание зубьев
	IV	Обработка рабочей поверхности зубьев: закалка; цементация, азотирование или нитроцементация; накатывание или электрохимическая обработка
4	I	Червяк и червячное колесо червячной подачи
	II	Скольжение витков червяка по рабочим поверхностям зубьев червячного колеса, изгиб зубьев червячного колеса
	III	Заедание, изнашивание рабочих поверхностей, пластическое деформирование и излом зубьев червячного колеса

	IV	Закалка или цементация поверхности витков червяка; накатывание или электромеханическая обработка резьбы червяков и червячных колес
5	I	Звездочки цепных передач
	II	Удары и трение рабочих поверхностей звездочек об элементы цепи
	III	Изнашивание рабочей поверхности зубьев
	IV	Обработка рабочей поверхности зубьев: закалка или цементация; накатывание
6	I	Валы и оси
	II	Деформация изгиба и кручения, трение скольжения между цапфой и опорой
	III	Усталостные изломы, изнашивание и задиры цапф, заедание
	IV	Обработка поверхности валов и осей: закалка или азотирование; накатывание или вибронакатывание; наклеп переходных поверхностей валов и осей; шлифование цапф
7	I	Опоры скольжения (подшипники и подпятники)
	II	Трение скольжения между цапфой и опорой
	III	Изнашивание, заедание, усталостные разрушения поверхности трения
	IV	Обработка поверхности опор: виброраскатывание; создание фрикционного переноса; нанесение на поверхность специальных покрытий для улучшения приработки
8	I	Подшипники качения
	II	Качение шариков (или роликов) по наружному и внутреннему кольцам
	III	Излом кольца, разрушение тел качения, изнашивание тел качения и рабочих поверхностей колец, усталостное выкрашивание (оспovidное изнашивание) рабочих поверхностей элементов подшипника, заедание деталей подшипника
	IV	Раскатывание и алмазное выглаживание рабочей поверхности колец

9	I	Гильза цилиндра поршневого двигателя внутреннего сгорания
	II	Механические нагрузки от переменного давления газов, тепловое и коррозионное воздействие газов, трение о поршневые кольца и поршень, коррозионное воздействие охлаждающей жидкости
	III	Изнашивание внутренней поверхности (зеркала), появление рисок, задиров, трещины, коррозия наружной поверхности гильз и кавитационное разрушение
	IV	Закалка и виброраскатывание внутренней поверхности гильзы; покрытие внутренней поверхности гильзы тонким слоем пористого хрома или ее азотирование для улучшения приработки
10	I	Поршень двигателя внутреннего сгорания
	II	Механические нагрузки от переменного давления газов и инерционных сил возвратно-поступательного движения поршня, тепловое воздействие газов на днище, трение боковой поверхности о зеркало гильзы
	III	Изнашивание цилиндрической поверхности, изнашивание и пластическое деформирование кольцевых канавок, изнашивание отверстий в бобышках, прогар головки
	IV	Обработка поверхности поршня: покрытие боковой поверхности легкоплавкими металлами (свинцом или оловом); фосфатирование, сульфидирование, закалка поршней из алюминиевого сплава
11	I	Диски борон и лушильников
	II	Абразивное воздействие почвы, силовые воздействия препятствий
	III	Затупление лезвия в результате изнашивания
	IV	Обработка поверхности дисков: закалка; плакирование лезвия дисков износостойкими материалами
12	I	Лапы культиваторов
	II	Абразивное воздействие и давление почвы
	III	Затупление режущей кромки лезвия в результате изнашивания

	IV	Обработка поверхности лезвия лап: закалка; наплавка на лезвие твердого сплава
13	I	Пальцы звеньев гусениц гусеничного трактора
	II	Трение без смазочного материала при высоких давлениях и ударных нагрузках при наличии абразивного материала и влаги
	III	Изнашивание в местах трения о проушины (или втулки звеньев гусениц)
	IV	Обработка поверхности пальцев: закалка; борирование
14	I	Втулки звеньев гусениц гусеничного трактора
	II	Трение без смазочного материала при высоких давлениях и ударных нагрузках при наличии абразивного материала и влаги
	III	Изнашивание в местах трения о палец
	IV	Обработка поверхности втулок: цементация с последующей закалкой; дорнование
15	I	Лемеха плугов
	II	Давление пласта почвы, воздействие абразивной среды
	III	Затупление режущей кромки, затупление носка, образование фаски с тыльной стороны лезвия в результате изнашивания
	IV	Обработка поверхности лезвия лемехов: закалка; наплавка на лезвие твердого сплава
16	I	Отвалы плугов
	II	Давление пласта почвы, воздействие абразивной среды
	III	Поломка крыла и его изнашивание в месте схода пласта почвы
	IV	Цементация с последующей закалкой поверхности отвалов
17	I	Зубчатые колеса коробки передач трактора
	II	Удары торцов зубьев при включении передачи, изгиб зубьев, контактное сжатие и сдвиг объемов металла, прилежащих к эвольвентным поверхностям
	III	Торцовое изнашивание зубьев, поломка зубьев, изнашивание эвольвентных поверхностей зубьев
	IV	Цементация или нитроцементация с последующей закалкой рабочей поверхности зубьев

18	I	Звенья гусениц гусеничных тракторов
	II	Контактные нагрузки, трение качения с проскальзыванием о беговую дорожку и боковые поверхности опорных катков, наличие абразивного материала и влаги в зоне трения
	III	Изнашивание проушин, изнашивание цевков в месте зацепления с ведущим колесом, изнашивание беговой дорожки, усталостные разрушения
	IV	Обработка рабочей поверхности звеньев гусениц: закалка беговых дорожек, наплавка почвозацепа вольфрамовым чугуном
19	I	Коленчатый вал
	II	Периодические нагрузки от давления газов и сил инерции движущихся масс, вызывающие переменные напряжения в элементах вала; трение шеек о заливку вкладышей подшипников
	III	Изнашивание коренных и шатунных шеек
	IV	Обработка поверхности вала: закалка, азотирование, полирование шеек; накатка роликами или дробеструйная обработка струей переходных поверхностей
20	I	Клапаны двигателя внутреннего сгорания
	II	Динамические нагрузки от переменного давления газов и сил упругости пружины; омывание головок выпускных клапанов горячими газами, движущимися с большими скоростями
	III	Изнашивание и пригорание фаски тарелки клапана, изнашивание стержня, деформирование
	IV	Обработка поверхности клапанов: закалка, наплавка фаски и головки выпускного клапана со стороны цилиндра твердым сплавом
21	I	Поршневые кольца двигателя внутреннего сгорания
	II	Нагрев от соприкосновения с горячими газами; трение о внутреннюю поверхность гильзы при возвратно-поступательном движении
	III	Изнашивание по наружной цилиндрической и торцовой поверхностям, снижение упругости, пригорание

	IV	Обработка поверхности колец: пористое хромирование одного или двух верхних компрессионных колец; электролитическое лужение или фосфатирование колец (для улучшения приработки и повышения коррозионной стойкости)
22	I	Вкладыши шатунных и коренных подшипников коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания
	II	Переменные по значению давления газов и давления от сил инерции поступательно движущихся и вращающихся масс
	III	Изнашивание, усталостное выкрашивание
	IV	Обработка поверхности вкладышей: виброраскатывание; покрытие поверхности оловом или припоем ПОС-18
23	I	Зубья ковшей экскаваторов
	II	Трение об абразивные частицы грунта, динамические нагрузки при ударах о грунт
	III	Затупление режущей кромки в результате изнашивания
	IV	Обработка поверхности режущей кромки зубьев: закалка; наплавка твердого сплава

Примечание. I – наименования деталей; II – условия эксплуатации деталей; III – характер повреждения деталей при эксплуатации; IV – виды применяемых упрочняющих технологий.

Методические указания

В работе требуется осуществить рациональный выбор технологий упрочнения деталей машин с учетом условий их эксплуатации и характера их повреждений при эксплуатации, а также указать эффекты упрочнения, обеспечиваемые выбранными технологиями, и механизмы достижения этих эффектов.

Выбор упрочняющих технологий проводится на основе учета данных табл. 1 в соответствии с предлагаемыми преподавателем вариантами индивидуальных заданий, в которых указываются виды упрочняемых деталей.

Сведения о выбранных упрочняющих технологиях следует представить в виде таблицы:

Детали	Упрочняющие технологии	Эффекты упрочнения	Механизмы упрочнения
1			
2			
3			
и т. д.			

***Пример представления сведений
о выбранных упрочняющих технологиях***

Виды деталей	Упрочняющие технологии	Эффекты упрочнения	Механизмы упрочнения
1. Втулки подшипников скольжения	Раскатывание одношариковым раскатным устройством	Повышение износостойкости	Поверхностное структурное и морфологическое модифицирование

Варианты индивидуальных заданий

№ задания	Наименование упрочняемых деталей
1	Болты резьбовых единений
	Червячное колесо червячной подачи
	Гильза цилиндра двигателя внутреннего сгорания
	Втулки звеньев гусениц гусеничного трактора
	Коленчатый вал
2	Гайки
	Звездочки цепных передач
	Поршень двигателя внутреннего сгорания
	Лемеха плугов
	Клапаны двигателя внутреннего сгорания
3	Крепежные отверстия под болты и шпильки
	Валы и оси
	Диски борон и лушпильников
	Отвалы плугов
	Поршневые кольца двигателя внутреннего сгорания
4	Колеса зубчатых передач
	Опоры скольжения (подшипники и подпятники)
	Лапы культиваторов
	Зубчатые колеса коробки передач трактора

№ задания	Наименование упрочняемых деталей
	Вкладыши шатунных и коренных подшипников коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания
5	Червяк червячной подачи
	Подшипники качения
	Пальцы звеньев гусениц гусеничного трактора
	Звенья гусениц гусеничных тракторов
	Зубья ковшей экскаваторов

Порядок выполнения работы

1. Проанализировать полученное задание.
2. Изучить основные положения работы.
3. Осуществить выбор упрочняющих технологий (в соответствии с предлагаемыми вариантами заданий), определить эффекты упрочнения, обеспечиваемые выбранными технологиями, и механизмы достижения этих эффектов и внести сведения о выбранных технологиях в таблицу.
4. Пояснить техническую сущность выбранных упрочняющих технологий.
5. Проанализировать полученные результаты.
6. Составить отчет.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Общие сведения о принципах выбора технологий упрочнения деталей машин.
3. Таблица, содержащая сведения о выбранных упрочняющих технологиях.
4. Краткое описание технической сущности выбранных упрочняющих технологий.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие разновидности упрочняющих технологий вы знаете?
2. Укажите принципы рационального выбора упрочняющих технологий.

3. Какие разновидности эффектов упрочнения, обеспечиваемых упрочняющими технологиями, вы знаете?

4. Какие разновидности упрочняющих технологий, обеспечивающих поверхностное структурное модифицирование, вы знаете?

5. Какие разновидности упрочняющих технологий, обеспечивающих поверхностное химическое модифицирование, вы знаете?

6. Какие разновидности упрочняющих технологий, обеспечивающих поверхностное морфологическое модифицирование, вы знаете?

7. Какие разновидности механизмов упрочнения, характерных для упрочняющих технологий, вы знаете?

8. Назовите условия рационального применения объемного и поверхностного упрочняющего модифицирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные литейные технологии : монография / Н. К. Толочко [и др.] ; под ред. Н. К. Толочко и А. С. Калиниченко. – Минск : БГАТУ, 2009. – 359 с.

2. Технология конструкционных материалов / О. С. Комаров [и др.] ; под общ. ред. О. С. Комарова. – Минск : Новое знание, 2007. – 567 с.

3. Дегтярев, М. Г. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / М. Г. Дегтярев. – М. : Колос, 2007. – 360 с.

4. Капцевич, В. М. Новые материалы и технологии : пособие / В. М. Капцевич, В. Р. Калиновский, В. К. Корнеева. – Минск : БГАТУ, 2010. – 284 с.

5. Капцевич, В. М. Новые материалы: технологии изготовления и области применения / В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, Д. И. Кривальцевич. – Минск : БГАТУ, 2010. – 232 с.

6. Шадуя, В. Л. Современные методы обработки материалов в машиностроении : учебное пособие / В. Л. Шадуя. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 314 с.

7. Акулович, Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2013. – 372 с.

8. Повышение износостойкости и восстановление деталей машин и аппаратов / С. Богодухов [и др.]. – Оренбург : ОГУ, 2012. – 298 с.

9. Наноматериалы и нанотехнологии / В. М. Анищик [и др.] ; под ред. В. Е. Борисенко и Н. К. Толочко. – Минск : Изд. центр БГУ, 2008. – 375 с.

10. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2010. – 320 с.

11. Бетень Г. Ф. Восстановление и упрочнение почвообрабатывающих элементов диффузионным напороживанием износостойкими сплавами / Г. Ф. Бетень. – Минск : БГАТУ, 2003. – 188 с.

Учебное издание

Анискович Геннадий Иосифович,
Капцевич Вячеслав Михайлович,
Толочко Николай Константинович

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Практикум

Ответственный за выпуск *В. М. Капцевич*

Редактор *Т. В. Каркоцкая*

Корректоры *Г. В. Анисимова, Т. В. Каркоцкая*

Компьютерная верстка *Т. В. Каркоцкой*

Подписано в печать 11.04.2017 г. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 11,39. Уч.-изд. л. 8,90. Тираж 50 экз. Заказ 71.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.