

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛОВ В АДДИТИВНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛОВ В
АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство
изделий на основе трехмерных технологий» очной и заочной
форм обучения*

Часть 1



Могилев 2023

УДК 669.01
ББК 30.3
Т38

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «3» апреля 2023 г.,
протокол № 11

Составитель канд. техн. наук, доц. А. И. Хабибуллин

Рецензент канд. техн. наук, доц. И. В. Лесковец

Методические рекомендации к лабораторным работам предназначены для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛОВ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛОВ
В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Часть 1

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03. 2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2023

Содержание

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ.....	4
Введение.....	5
1 Лабораторная работа № 1. Влияние структуры сплавов в условиях равновесия на эксплуатационные свойства	6
2 Лабораторная работа № 2. Влияние структуры сплавов в неравновесных условиях на эксплуатационные свойства	10
3 Лабораторная работа № 3. Металлографический анализ видов обработки металла.....	16
4 Лабораторная работа № 4. Повышение эксплуатационных свойств изделий пластическим деформированием.....	19
5 Лабораторная работа № 5. Поверхностная закалка токами высокой частоты.....	22
6 Лабораторная работа № 6. Химико-термическая обработка стали....	28
7 Лабораторная работа № 7. Нанесение защитных и износостойких покрытий электрохимическими методами	37
Список литературы.....	43

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ

1 К работе с учебным оборудованием допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторной работы.

2 Разрешается выполнять только ту работу, которая соответствует учебному плану.

3 Запрещается выполнять лабораторные работы на оборудовании и установках с неисправностями, которые могут привести к пожарам или поражению электрическим током.

4 Запрещается самостоятельно устранять неисправности оборудования.

5 В лаборатории необходимо соблюдать правила внутреннего распорядка.

6 **Перед началом работы** необходимо провести внешний осмотр оборудования, используемого в лабораторной работе. Убедиться в наличии заземления, огнетушителя, отсутствии оголенной электропроводки.

7 Проверить наличие необходимых для выполнения работы образцов и расходуемых материалов.

8 Обеспечить свободный доступ к используемому оборудованию.

9 **При выполнении лабораторной работы** запрещается включать оборудование и приборы без разрешения преподавателя, вращать без необходимости настроечные винты и рукоятки.

10 Лабораторные работы должны проводиться в соответствии с методическими указаниями и правилами технической эксплуатации соответствующего учебного оборудования.

11 **По окончании работы** необходимо отключить от электросети оборудование и приборы.

12 Убрать рабочее место.

13 В случае неполадок оборудования и приборов сообщить об этом преподавателю.

Введение

Задачей подготовки современного инженера является не только накопление необходимых знаний о строении и свойствах сплавов, но и в формировании инженерного мышления, позволяющего решать любые производственные задачи. За время освоения дисциплины «Технология повышения эксплуатационных свойств металлов в аддитивном производстве» студент изучает основные способы повышения механических и эксплуатационных свойств типовых изделий, их микроструктур, а также возможности модифицирования сплавов.

В результате изучения учебной дисциплины обучающийся:

- знакомится с технологиями повышения эксплуатационных свойств металлов в аддитивном производстве;
- научится выбирать рациональные методы обработки металлов в аддитивном производстве, использовать справочную литературу по выбору материалов, обеспечивающих необходимые показатели свойств;
- овладеет практическими навыками по повышению эксплуатационных свойств материалов и методами выбора материалов исходя из их свойств и условий эксплуатации.

Целью изучения дисциплины является усвоение студентами знаний, умений и навыков по повышению эксплуатационных свойств металлов в аддитивном производстве.

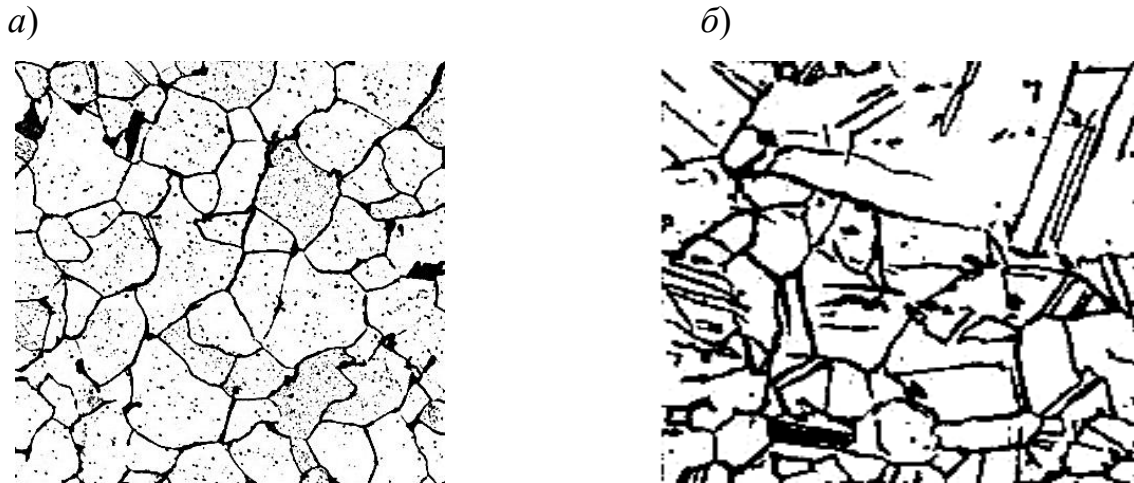
1 Лабораторная работа № 1. Влияние структуры сплавов в условиях равновесия на эксплуатационные свойства

Цель работы: изучение диаграмм состояния различных сплавов; анализ превращений, происходящих в сплавах при охлаждениях и нагревах; определение фазового и структурного состояния сплавов в зависимости от их состава и температуры; установление зависимости между структурой и свойствами сплавов.

Оборудование и инструмент: микроскринер МС ЛабоМет-1, образцы шлифов сплавов различных металлов.

Под *равновесным* понимается такое состояние, при котором все фазовые превращения в сплаве полностью закончились в соответствии с диаграммой состояния. Это имеет место только при очень малых скоростях охлаждения (нагрева). Равновесное состояние соответствует минимальному значению свободной энергии и не подвергается самопроизвольному изменению во времени. Поэтому оно называется стабильным.

Чистые металлы и однофазные сплавы (твердые растворы) в литом состоянии имеют характерную дендритную структуру, а после пластической деформации и отжига, приводящего металл в равновесное состояние, структура состоит из сравнительно одинаковых по форме зерен (равноосных полиэдров). На рисунке 1.1 показана микроструктура меди.



a – (x40), *б* – (x100)

Рисунок 1.1 – Структура меди

Применяя глубокое травление, в этих структурах можно выявить так называемые фигуры травления – геометрически правильные углубления или выступы, ограниченные определенными кристаллографическими плоскостями. Измеряя углы между гранями, можно установить ориентировку каждого кристаллита и, следовательно, ориентировку всей совокупности кристаллитов, т. е. текстуру.

Наконец, на однофазных сплавах можно выявить дислокации, представляющие собой особый вид линейных дефектов кристалла. Они выявляются по специальным фигурам травления – группировкам пятен травления. Эти пятна связаны с более сильной травимостью металла в области выхода дислокаций на поверхность (см. рисунок 1.1, б), а также со скоплением примесей под дислокациями.

Для выявления пятен травления применяют различные реактивы, зависящие от природы металла и требующие особенно тщательной подготовки поверхности микрошлифа, исключая механическое воздействие. По расположению пятен травления можно определить особенности тонкого строения кристалла, размеры субзерен и степень их разориентации. По числу пятен травления можно в ряде случаев вычислить плотность дислокаций. В результате пластической деформации или нагрева пятна, выявляемые на поверхности шлифа, после повторной полировки должны изменить свое положение. Многофазные, в том числе двухфазные, сплавы имеют более сложную структуру, состоящую из различного сочетания фаз, например в виде эвтектики, эвтектоида и др. На рисунке 1.2 показана структура, типичная для эвтектики (рисунок 1.3), в данном случае системы Cu–Cu₃P.



Рисунок 1.2 – Микроструктура эвтектики системы Cu–Cu₃P (x500)

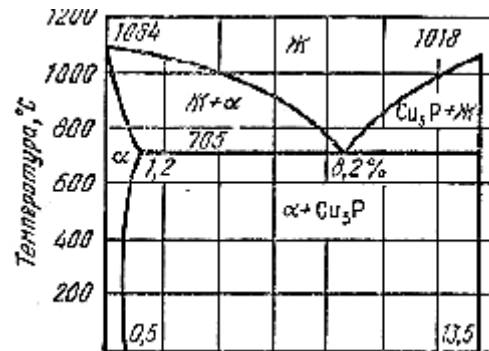


Рисунок 1.3 – Диаграмма состояния сплавов Cu–Cu₃P

Для сравнения на рисунке 1.4 приведена структура эвтектоида железоуглеродистых сплавов. Обе структуры имеют тонкое строение, однако эвтектоид является более дисперсным, т. к. образуется при распаде твердого раствора, когда процессы диффузии протекают более замедленно.

В многофазных сплавах, не соответствующих по химическому составу точно эвтектической концентрации, наряду с эвтектикой выделяется также избыточная фаза, например, в сплавах, концентрация которых находится между точками *c* и *d* диаграммы (рисунок 1.5).

При этом в сплавах с концентрацией между точками *a* и *b* избыточная фаза выделяется из жидкости, а в сплавах, отвечающих по составу заштрихованным областям диаграммы, избыточная фаза выделяется только из твердого раствора при уменьшении растворимости.



Рисунок 1.4 – Структура отожженной стали 80 (x500)

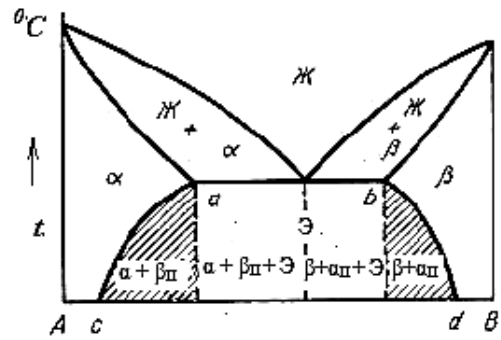


Рисунок 1.5 – Диаграмма состояния с ограниченной растворимостью

Избыточная фаза, кристаллизующаяся из жидкости, имеет обычно форму крупных зерен или дендритов. Это связано с особенностями роста избыточной фазы в процессе застывания сплава в интервале температур между ликвидусом и солидусом (рисунок 1.6).

Эта структура характерна для легкоплавких подшипниковых сплавов (баббитов). По условиям работы подшипниковый сплав должен иметь гетерогенную структуру и состоять из мягкой основы и твердых включений. Мягкая основа обеспечивает хорошую прирабатываемость подшипника к валу, твердые включения служат опорными точками для трущихся частей вала. В качестве баббитов применяются сплавы системы Pb–Sb (диаграмма состояния которой приведена на рисунке 1.5), Sn–Sb, Pb–Sn–Sb, сплавы на основе цинка с добавками Cu, Al и баббиты на основе алюминия с добавками Cu, Sb, Ni. Широкое применение в промышленности получили заэвтектические сплавы системы свинец–сурьма (БС), содержащие 16 %...20 % Sb. Мягкой основой в этом сплаве является эвтектика ($\alpha + \beta$), твердость которой составляет 7...8 НВ. Твердыми включениями являются зерна β -твердого раствора свинца в сурьме, их твердость составляет 30 НВ. Микроструктура баббита БС, содержащего 20 % Sb, приведена на рисунке 1.6. Избыточные фазы, выделяющиеся из твердого раствора, имеют разнообразную форму (рисунок 1.7), например, игольчатую, зернистую или в виде сетки по границам зерен. Формы выделений и свойства избыточной фазы в значительной степени влияют на свойства всего сплава. Если, например, избыточная фаза является твердой и хрупкой, то выделение ее в виде сетки (см. рисунок 1.7, б) значительно ухудшает пластичность и вязкость всего сплава. Равномерное распределение избыточной фазы в виде мелких включений зернистой формы в основной фазе повышает прочность сплава, не вызывая резкого снижения пластичности.

На рисунке 1.8 показана двухфазная структура, полученная в результате перитектической реакции. Округлые участки представляют собой фазу α , образованную в начале кристаллизации, а область вокруг этих участков – фазу β , полученную в результате перитектической реакции.

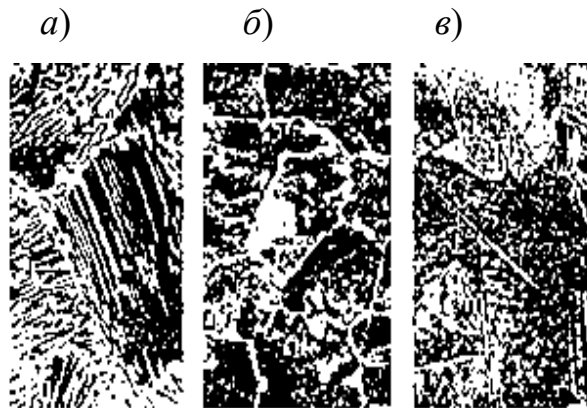
Определение структуры перитектики представляет больше затруднений, чем определение других многофазных структур, поскольку в условиях охлаждения сплавов, применяемых на практике, перитектическая реакция, как про-

ходящая на поверхности раздела фаз, обычно не протекает до конца. Тройные и более сложные сплавы также имеют подобные морфологии структурных составляющих – однофазных твердых растворов и избыточных фаз.



светлые зерна – твердый раствор на основе сурьмы, тёмные – эвтектика

Рисунок 1.6 – Заэвтектический сплав



a – в зернистой форме, *б* – в виде сетки по границам зерен, *в* – в виде игл

Рисунок 1.7 – Сталь У10, выделение вторичного цементита (x500)

Несколько иную форму имеют сплавы, содержащие эвтектику. Например, при кристаллизации тройного сплава, не соответствующего точно эвтектическому составу, сначала выделяется избыточная фаза, затем двойная эвтектика и в последнюю очередь при окончании застывания – тройная эвтектика. Двойная эвтектика в сплаве из трех компонентов кристаллизуется в интервале повышенных температур, в то время как тройная эвтектика кристаллизуется при постоянной и более низкой температуре. Поэтому выделения двойной эвтектики более крупные и легче различаются при микроанализе, чем выделения тройной эвтектики. На рисунке 1.9 показана структура тройного сплава системы Pb–Bi–Sn.

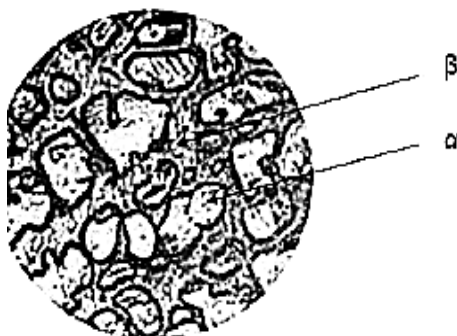


Рисунок 1.8 – Структура перитектики в сплаве Sn–Sb (x500)



Рисунок 1.9 – Структура сплава Pb–Bi–Sn

Такой сплав содержит кристаллы (светлые участки) избыточной фазы; на рисунке также видны участки с более дифференцированной структурой (двой-

ная эвтектика), расположенной в основной, менее различимой металлической массе, представляющей выделения тройной эвтектики.

Задание

- 1 Изучить и зарисовать микроструктуры предложенных сплавов.
- 2 Используя диаграммы состояния, описать процессы, протекающие при охлаждении изучаемых сплавов.
- 3 Дать определение фазам и структурным составляющим в предложенных сплавах.
- 4 Указать, какие из предложенных сплавов используются для литья или для обработки давлением.

Контрольные вопросы

- 1 Как меняются механические и эксплуатационные свойства сплавов в зависимости от вида структуры?
- 2 Как форма выделений избыточной фазы влияет на свойства сплава?
- 3 Изложить особенности структуры и свойств баббитов.

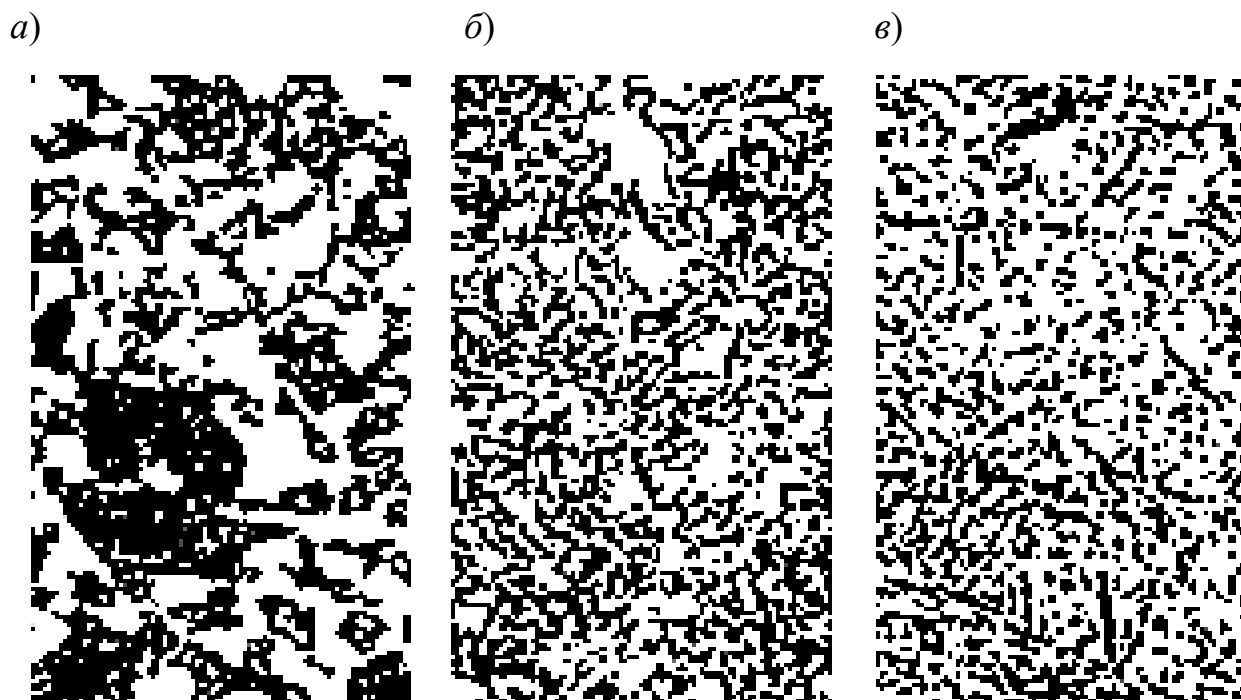
2 Лабораторная работа № 2. Влияние структуры сплавов в неравновесных условиях на эксплуатационные свойства

Цель работы: изучение структур сплавов в неравновесных условиях; анализ превращений, происходящих в сплавах при охлаждениях; определение фазового и структурного состояния сплавов; установление зависимости между структурой и свойствами сплавов.

Оборудование и инструмент: микроскринер МС ЛабоМет-1, образцы шлифов сплавов различных металлов.

Микроанализ позволяет выявлять структуры сплавов в неравновесном состоянии, в котором многие сплавы применяются в технике. На рисунке 2.1 представлена микроструктура стали с 0,4 % С в равновесном (после отжига) и неравновесном состояниях: после нагрева до 750 °С и быстрого охлаждения (неполная закалка) и после нагрева до 840 °С и быстрого охлаждения (полная закалка). Быстрое охлаждение позволило получить неравновесную структуру, и, кроме того, характеризовать превращения, происходящие в стали при нагреве. Микроанализ отчетливо показывает, что в результате нагрева до 750 °С, т. е. выше критической точки A_{c1} , но ниже точки A_{c3} , в стали произошло частичное превращение; вместо темной (т. е. более сильно травящейся при микроисследовании) составляющей – перлита и частично светлой – феррита образовалась новая структура – мартенсит, но часть светлой (т. е. слабо травящейся) и

крупнозернистой составляющей феррита осталась без изменения. Это объясняется неполным растворением феррита в аустените при недостаточном нагреве.



a – после отжига (x200); *б* – после нагрева 750 °С и быстрого охлаждения (неполная закалка) (x1000); *в* – после нагрева до 840 °С и быстрого охлаждения (полная закалка)

Рисунок 2.1 – Микроструктуры углеродистой стали 40 (x1000)

В то же время при более высоком нагреве до 840 °С (т. е. выше критической точки A_{c3}) произошло полное превращение: образовалась новая структура – мартенсит. При превращении гранецентрированной кубической решетки аустенита в объемно-центрированную кубическую решетку мартенсита атомы смещаются на расстояния меньше межатомных, т. е. нет необходимости в самодиффузии атомов железа. Кристаллы имеют форму пластин, сужающихся к концу, под микроскопом такая структура выглядит как игольчатая. Образуюсь мгновенно пластины растут либо до границы зерна аустенита, либо до дефекта. Следующие пластины расположены к первым под углами 60° или 120°, их размеры ограничены участками между первыми пластинами (рисунок 2.2).

Размер игл мартенсита определяется величиной исходного зерна аустенита. Чем больше зерно аустенита, тем крупнее размер игл образовавшегося мартенсита (см. рисунок 2.2, *a*). При нормальной закалке образуется мелкоигольчатый мартенсит. При большом содержании углерода и легирующих элементов после закалки остается некоторое количество аустенита остаточного (см. рисунок 2.2, *б*), которое устраняется при последующем отпуске.

Образование в закаленной стали структуры мартенсита, обнаруживаемое микроанализом, резко изменяет свойства, в частности, повышает прочность, твердость и значительно уменьшает пластичность и вязкость. Поверхности раздела кристаллитов мартенсита представляют собой труднопреодолимые препят-

ствия для скольжения дислокаций при деформации кристалла. Перемещению дислокаций тормозят находящиеся в решетке мартенсита атомы углерода, создающие статические искажения решетки. Все это определяет высокую твердость структуры закаленной стали.

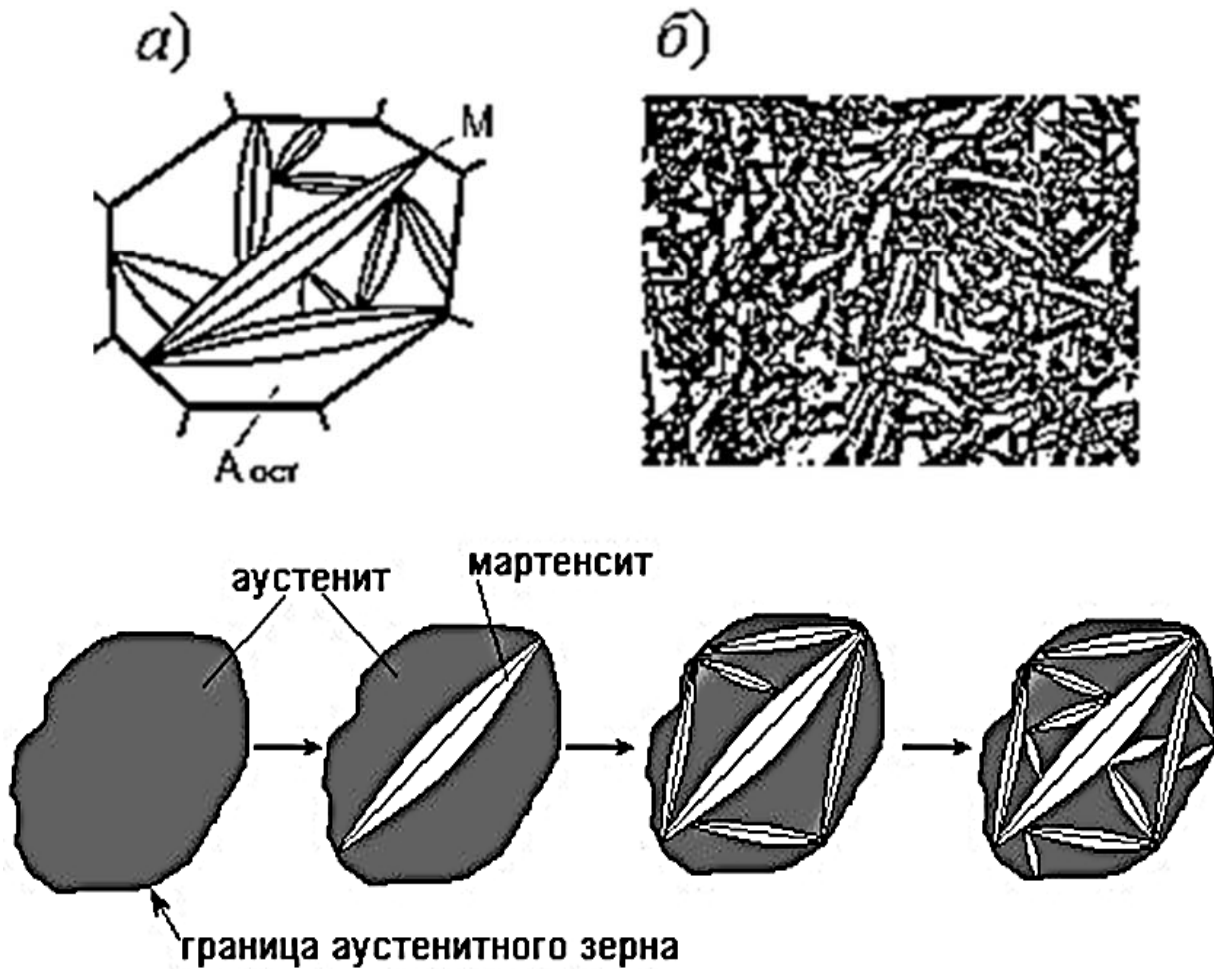


Рисунок 2.2 – Схема образования мартенсита из аустенита

С увеличением содержания углерода в мартенсите наряду с повышением твердости возрастает и хрупкость.

При низком отпуске (при 150 °С...250 °С) закаленной стали ее микроструктура изменяется, т. к. происходит частичный распад мартенсита, обусловленный выделением части углерода из решетки мартенсита. Образующаяся структура, представляющая собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе (но степень пересыщения меньше, чем непосредственно после закалки) и когерентно связанные с ним дисперсные выделения ϵ -карбидов, называется **отпущенным мартенситом**. Уменьшение количества растворенного углерода снижает тетрагональность решетки мартенсита и внутренние напряжения, что приводит к повышению вязкости материала. Низкотемпературный отпуск предназначен для инструментальных сталей, а также для деталей машин, прошедших цементацию, нитроцементацию. Для сталей У7, 6ХС, 7ХС структура «мартенсит

отпущенный» обеспечивает достаточную вязкость и твердость (50 HRC).

После нагрева закаленной стали выше 300 °С микроанализ обнаруживает еще большие изменения, связанные с распадом пересыщенного твердого раствора (мартенсита). Таким образом, при среднем отпуске, из пересыщенного твердого раствора углерода в α -железе выходит весь избыточный углерод и он превращается в феррит. А покинувший решетку мартенсита углерод образует тонкие пластинки цементита, которые не имеют когерентной связи с решеткой мартенсита. Это приводит к снижению внутренних напряжений и вызывает значительное уменьшение твердости и прочности (≈ 40 HRC). В итоге образуется дисперсная (тонкая) ферритоцементитная смесь, называемая **трооститом отпуска**. Характерной особенностью этой структуры является **высокий предел упругости**, что обуславливает использование ее при изготовлении упругих элементов: пружин, рессор.

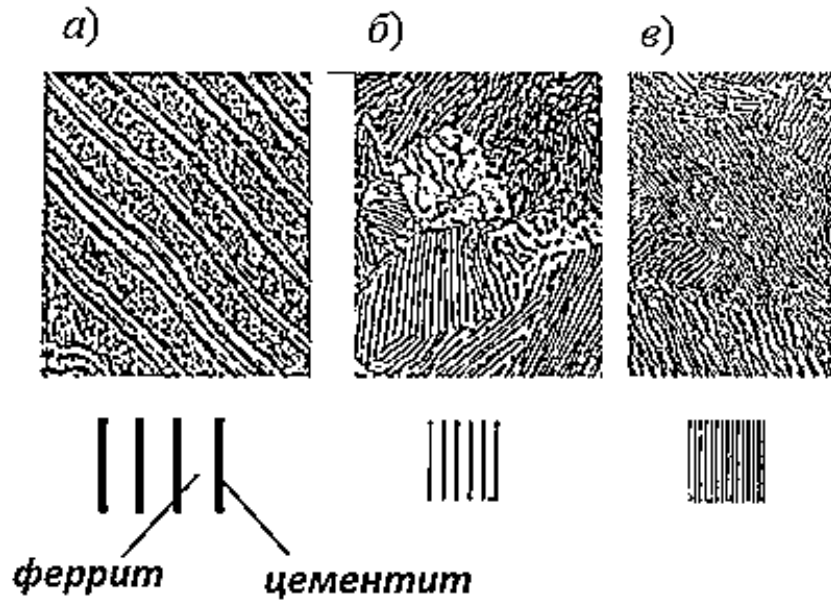
При высоком отпуске увеличение температуры отпуска свыше 500 °С не вызывает фазовых превращений, но вследствие развития диффузионных процессов реализуется стремление системы к снижению свободной энергии из-за уменьшения поверхностной энергии в процессе объединения групп мелких зерен в более крупные. Поэтому при этих температурах основными процессами являются коагуляция и сфероидизация карбидов. Образующаяся структура представляет собой более грубую (крупную), чем после среднего отпуска ферритокарбидную смесь **зернистого типа**, называемую **сорбитом отпуска**. Укрупнение зерен приводит к снижению прочностных свойств (до 25 HRC), но округление формы зерен обуславливает снижение концентрации напряжений, возникающих в процессе нагрузок, повышение ударной вязкости, что в совокупности приводит к **повышению надежности** изделий от внезапного хрупкого разрушения. Сорбит отпуска используют для изготовления **ответственных деталей машин**, работающих в тяжелых условиях нагружения (знакопеременных нагрузках и сложных напряженных состояниях), например: валов, осей, полуосей, шатунов, коленчатых валов и пр. Сорбит отпуска обеспечивает наилучшее сочетание свойств (прочности, вязкости и пластичности). Поэтому такая термообработка носит название **улучшения**.

Перлит, сорбит и троостит являются механической смесью феррита и цементита, но размер зерен каждый раз уменьшается в 5 раз при переходе от перлита к сорбиту, и от сорбита к трооститу (рисунок 2.3).

Общая закономерность изменения механических свойств при повышении температур отпуска заключается в снижении прочностных характеристик (σ_s , HB) и возрастании характеристик пластичности (δ , ψ) и особенно ударной вязкости (KCU).

В производственной практике зачастую улучшение заменяют более дешевой термической обработкой, называемой **нормализацией**. Она является разновидностью отжига второго рода. Особенностью нормализации является то, что охлаждение проводится на воздухе. После нормализации среднеуглеродистые стали имеют тот же фазовый состав, что и после отжига, однако дисперсность фаз в этом случае выше в 5 раз, вместо перлита образуется структура, близкая к сорбиту (рисунок 2.4). Это приводит к повышению твердости и прочности материала

в 2–3 раза, но не повышает вязкость и пластичность, в отличие от *сорбита отпуска*, у которого цементит имеет округлую форму, а не пластинчатую (рисунок 2.5).



a – перлит (10 HRC); *б* – сорбит (25 HRC); *в* – троостит (40 HRC)

Рисунок 2.3 – Различие ферритоцементитных структур

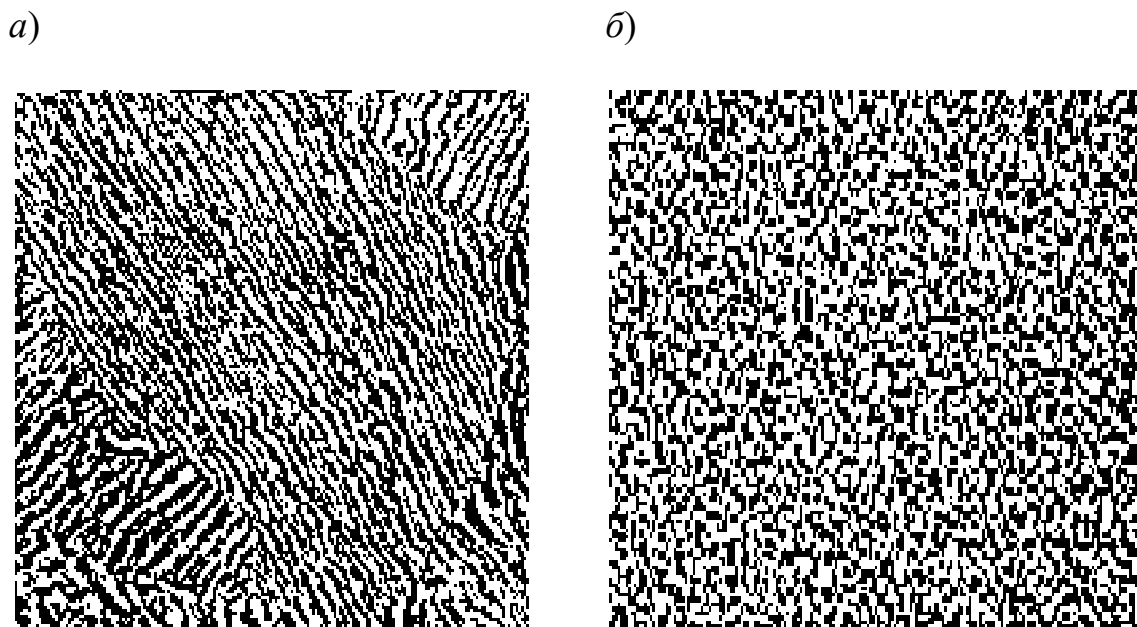
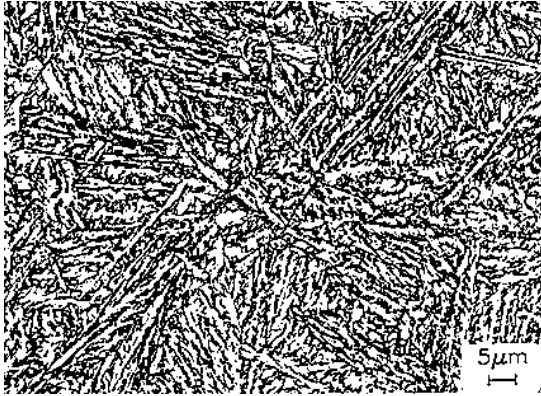
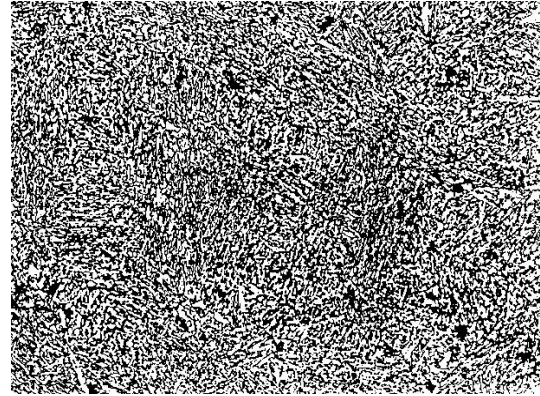


Рисунок 2.4 – Отличие сорбита, получаемого нормализацией (*a*), от сорбита отпуска (*б*), образующегося в результате улучшения

a)



б)



$a - (x10000), b - (x800)$

Рисунок 2.5 – Структура мартенсита

Таким образом, микроанализ позволяет судить о тех значительных и важных для практики изменениях механических и физических свойств стали, которые вызывают эти превращения.

Однако микроанализ, обнаруживая в закаленной стали характерное внешне игольчатое строение мартенсита (см. рисунок 2.5), отличающее его от других структурных составляющих стали, не позволяет определить природу этой фазы.

Микроанализ не позволяет также характеризовать структуру неравновесного сплава в тех случаях, когда избыточные фазы еще не отделились от основной фазы или когда выделения избыточной фазы являются чрезвычайно мелкими (субмикроскопическими), т. е. не могут быть обнаружены при данной разрешающей способности микроскопа.

В частности, это относится к процессам, происходящим при старении или низком отпуске закаленного сплава. Данные о структуре таких сплавов дает электронная микроскопия и рентгеновский анализ.

Задание

- 1 Изучить и зарисовать микроструктуры предложенных сплавов.
- 2 Указать свойства и области применения указанных структур.
- 3 Дать определение фазам и структурным составляющим в предложенных сплавах.

Контрольные вопросы

- 1 Как меняются механические и эксплуатационные свойства сплавов в зависимости от вида структуры?
- 2 Как форма и размеры фазы влияют на свойства сплава?
- 3 Чем отличается сорбит отпуска от сорбита, полученного при распаде аустенита?

3 Лабораторная работа № 3. Металлографический анализ видов обработки металла

Цель работы: изучение структур сплавов после различных видов обработки; анализ превращений, происходящих в сплавах после различных видов обработки; установление зависимости между структурой и свойствами сплавов.

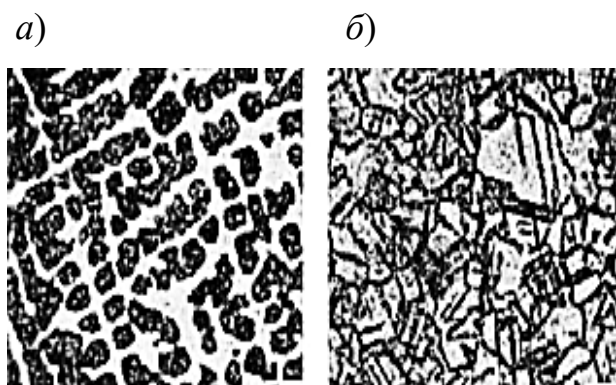
Оборудование и инструмент: микроскринер МС ЛабоМет-1, образцы шлифов сплавов после различных видов обработки.

Способ обработки сплава резко влияет на его структуру и свойства. С помощью микроанализа можно определять, каким образом изготовлен изучаемый сплав (или деталь), какой предварительной обработке он подвергается. В частности, микроанализ позволяет определить, находится ли сплав в литом состоянии или он подвергался обработке давлением, и какое влияние оказала пластическая деформация на его структуру.

На рисунке 3.1 показаны микроструктуры однофазной латуни в состоянии после литья и после обработки давлением и отжига. Отчетливо видно дендритное строение твердого раствора в литом состоянии и полиэдрическое после дальнейшей обработки. Свойства латуни при этом также изменяются; пластичность латуни, показанной на рисунке 3.1, б, выше, чем приведенной на рисунке 3.1, а.

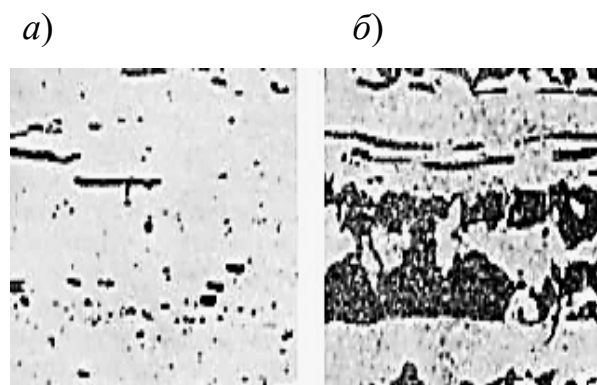
Во многих случаях микроанализ проводят параллельно с макроанализом. Макроанализ характеризует строение металла на больших участках, а микроанализ – лишь на отдельных участках, выявляя при этом детали структуры.

На рисунке 3.2, а показано распределение неметаллических включений в катаной углеродистой стали; отчетливо видно, что они вытянуты вдоль направления прокатки.



а – после литья, б – после обработки давлением и отжига

Рисунок 3.1 – Микроструктура однофазной латуни (x100)



а – (x100); б – (x250)

Рисунок 3.2 – Микроструктура углеродистой стали

На рисунке 3.2, б представлена микроструктура этой же стали, но после травления шлифа; микроанализ обнаруживает, что вытянутыми оказываются не только неметаллические включения, но и участки перлита и феррита, т. к. на процесс вторичной кристаллизации в твердом состоянии при охлаждении стали зародышевое действие оказывали вытянутые неметаллические включения. Микроанализ не обнаруживает этого вида полосатости, называемой вторичной.

Ударная вязкость образцов стали поперек волокна (т. е. вертикально к микрофотографии) является более высокой, чем ударная вязкость при испытании вдоль волокна. Если некоторые виды неметаллических включений и, в частности, сернистого марганца имеют не вытянутую форму, а округленную и даже полиогранную форму, то это может быть признаком отсутствия предварительной деформации металла, т. е. в этом случае металл находится в литом состоянии. Далее микроанализ позволяет отчетливо определить, подвергался ли сплав холодной деформации и находится ли он в наклепанном (упрочненном) состоянии или он был подвергнут последующему отжигу (рекристаллизации) для снятия наклепа. На рисунке 3.3 показана структура низкоуглеродистой стали после холодной деформации, а на рисунке 3.4 – после рекристаллизации. Можно отчетливо видеть изменение формы и размера зерна, вызванное рекристаллизацией.

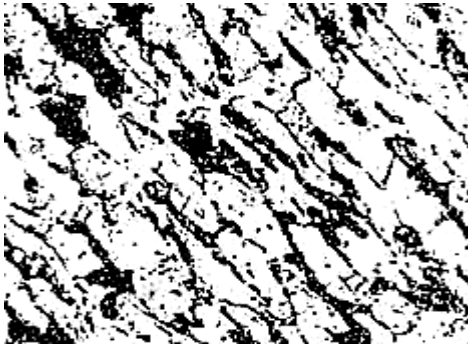


Рисунок 3.3 – Микроструктура стали 15 после холодной деформации (x200)

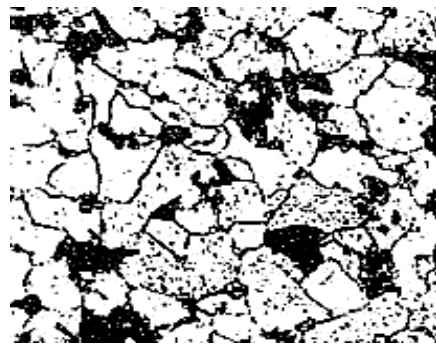
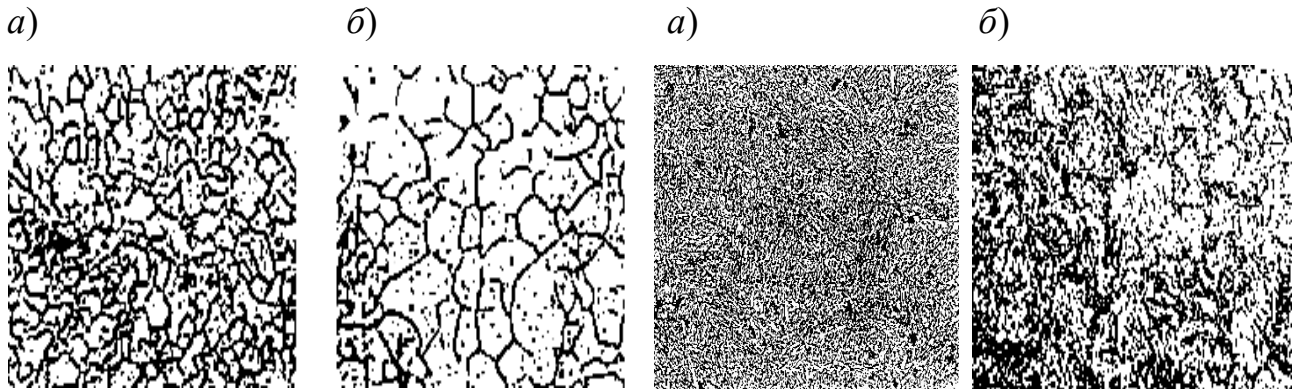


Рисунок 3.4 – Микроструктура стали 15 после рекристаллизации (x200)

Микроанализом можно установить состояние, в котором находится сплав, и во многих случаях определить, какой термической обработке он подвергался. Для этого сравнивают наблюдаемую структуру с той, которой должен обладать сплав согласно диаграмме состояния, или подвергают сплав дополнительной термической обработке, переводящей его в состояние равновесия (т. е. отжигу), и сравнивают получившуюся структуру с исходной структурой.

На рисунке 3.5 показана микроструктура быстрорежущей стали, закаленной с разных температур; при значительном повышении температуры в сплаве происходит рост зерна, усиливающий хрупкость стали. Сравнение микрофотографий показывает, что сталь, нагретая до более высокой температуры (см. рисунок 3.5, б), из-за крупного зерна обладает меньшей пластичностью и прочностью. Рост зерна стали, происходящий при высоком нагреве, вызывает также

увеличение размеров кристаллов мартенсита, образующегося в процессе охлаждения. При сопоставлении микроструктур, приведенных на рисунке 3.6, можно обнаружить, что сталь, показанная на рисунке 3.6, б, нагревалась до более высоких температур, и имеет крупные кристаллы мартенсита, а следовательно, и большую хрупкость. Микроанализ позволяет также судить о том, была ли достаточной скорость охлаждения при закалке сплава. На рисунке 3.6, а показана микроструктура углеродистой стали после закалки с охлаждением в воде, а на рисунке 3.7 – микроструктура той же стали после более медленного охлаждения в масле (структура: небольшие участки мартенсита и троостит).



a – 1250 °C; *б* – 1290 °C

a – оптимальная температура нагрева;
б – перегрев при закалке

Рисунок 3.5 – Микроструктура стали P18 после закалки с различных температур (x300)

Рисунок 3.6 – Микроструктура стали 40 (x600)

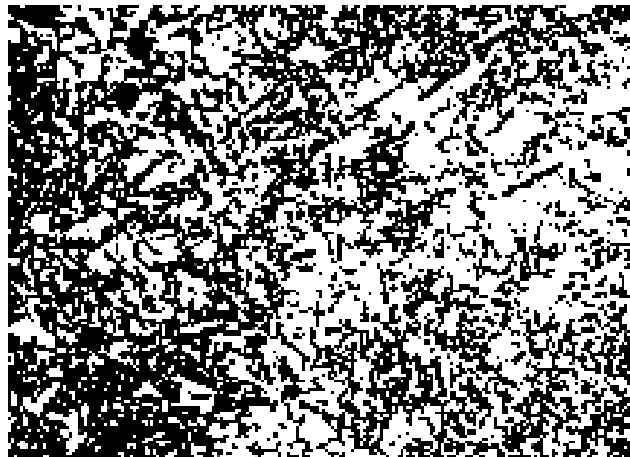


Рисунок 3.7 – Микроструктура стали 40 после закалки в масле (x600)

Задание

- 1 Изучить и зарисовать микроструктуры предложенных сплавов.
- 2 Указать свойства и области применения указанных структур.
- 3 Дать определение фазам и структурным составляющим в предложенных сплавах.

Контрольные вопросы

- 1 Как меняются механические и эксплуатационные свойства сплавов в зависимости от вида обработки?
- 2 Как форма и размеры фаз влияют на свойства сплава?
- 3 Отличие структур и свойств после полной и неполной закалки, литья и после рекристаллизации.

4 Лабораторная работа № 4. Повышение эксплуатационных свойств изделий пластическим деформированием

Цель работы: ознакомление с методами механического упрочнения поверхности.

Оборудование и инструмент: прибор для измерения твердости по методу Роквелла (ТР 5014), станок токарный настольный WM180V; заготовки для обработки; набор необходимого инструмента.

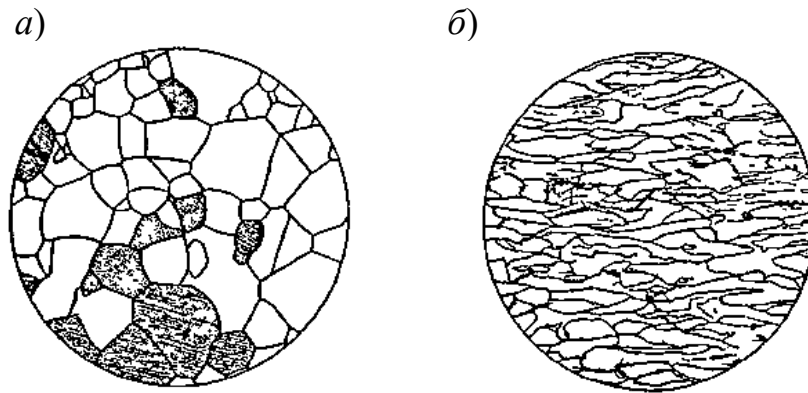
Многие детали машин работают в условиях трения и подвергаются действию ударной и изгибающей нагрузки, поэтому они должны иметь твердую, износостойкую поверхность, прочную и одновременно вязкую и пластичную сердцевину. Это достигается поверхностным упрочнением.

Назначение поверхностного упрочнения – повышение прочности, твердости, износостойкости поверхностных слоев деталей при сохранении вязкой, пластичной сердцевины для восприятия ударной нагрузки. У деталей машин, работающих при динамических и циклических нагрузках, трещины усталости возникают в поверхностных слоях под влиянием растягивающих напряжений. Если на поверхности создать остаточные напряжения сжатия, то растягивающие напряжения от нагрузок в эксплуатации будут меньше и увеличится предел выносливости (усталости). Создание в поверхностных слоях деталей напряжений сжатия – второе назначение поверхностного упрочнения. Техническими условиями на изготовление детали задаются твердость и глубина упрочненного слоя, а также прочность и вязкость сердцевины.

Основные методы поверхностного упрочнения можно разделить на три группы: механические – пластическое деформирование поверхностных слоев, создание наклепа (нагартовки); термические – поверхностная закалка; химико-термическая обработка (цементация, азотирование, хромирование и др.).

Упрочнение металла под действием холодной пластической деформации называется наклепом или нагартовкой. При этом изменяется строение металла: искажается кристаллическая решетка и деформируются зерна, т. е. из равноосных они превращаются в неравноосные (в виде лепешки, блина) (рисунок 4.1). Это сопровождается увеличением твердости и прочности в 1,5–3 раза. Возникающие в наклепанном слое напряжения сжатия повышают сопротивление

усталости. Упрочнение поверхности пластическим деформированием повышает надежность работы деталей, снижает чувствительность к концентраторам напряжений, повышает сопротивление изнашиванию и коррозионную стойкость, устраняет следы предыдущей обработки.



a – до деформации; *б* – после деформации

Рисунок 4.1 – Влияние пластической деформации на микроструктуру металла

Большинство операций упрочнения могут выполняться на универсальных металлорежущих станках (токарных, строгальных, сверлильных) с использованием простых по конструкции приспособлений. Эти операции упрочнения наиболее эффективны для металлов с твердостью до 280 НВ.

Накатка роликами и шариками – операция, при которой стальной закаленный ролик (шарик), обкатывая упрочняемую поверхность при заданной нагрузке (нажатии), деформирует, т. е. сминает поверхностный слой металла на определенную глубину (рисунок 4.2). Происходит упрочнение – наклеп. Глубина упрочненного слоя – 0,5...2,0 мм. При усилиях на ролик, превышающих предел текучести обрабатываемого материала, происходит наклеп на нужную глубину. Обработка улучшает микрогеометрию. Создание остаточных напряжений сжатия повышает предел усталости и долговечность изделия.

Этим методом в основном упрочняются детали типа тел вращения (валы, оси, гильзы) или имеющие значительные по размерам плоские поверхности. Кроме них, используются вибронакатывание, калибровка отверстий (рисунок 4.3), алмазное выглаживание и др.

Дробеструйная обработка – операция, при которой частицы твердого металла (дробь), вылетая из дробемета с большой скоростью (100...150 м/с), ударяют по упрочняемой поверхности, и происходит ее наклеп. Прочность, твердость и предел усталости повышаются. Толщина упрочненного слоя составляет 0,2...0,4 мм. Дробеструйному наклепу подвергают пружины, рессоры, зубчатые колеса, валы торсионные, звенья цепей, гусениц, гильзы, поршни и т. п. Например, рессорные листы после термообработки перед сборкой в пакет подвергают дробеструйному наклепу, что значительно увеличивает срок службы рессоры (в 3–5 раз). Дробеструйная обработка является конечной технологической операцией для деталей после механической и термической обработки.

Оборудованием являются дробеметы. Наиболее распространены механические дробеметы, имеющие большую производительность. Дробь – частицы шарообразной формы из твердой стали или белого чугуна. Диаметр дроби – 0,2...4 мм. Дробеструйная обработка нормализованной стали марки 20 увеличивает твердость на 40 %, а стали марки 45 – на 20 %; остаточное напряжение сжатия в поверхности – до 80 МПа. Дробеструйную обработку применяют как эффективный метод повышения выносливости изделий из ковanej и литой стали, для упрочнения высокопрочных чугунов. Эти методы упрочнения наиболее распространены в машиностроении.

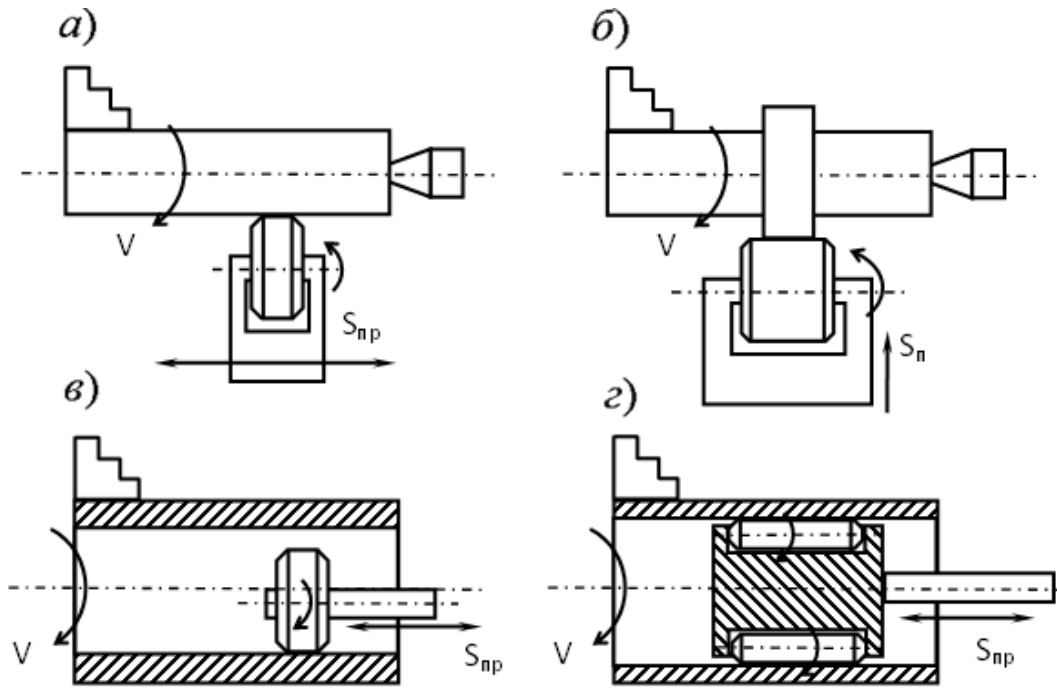
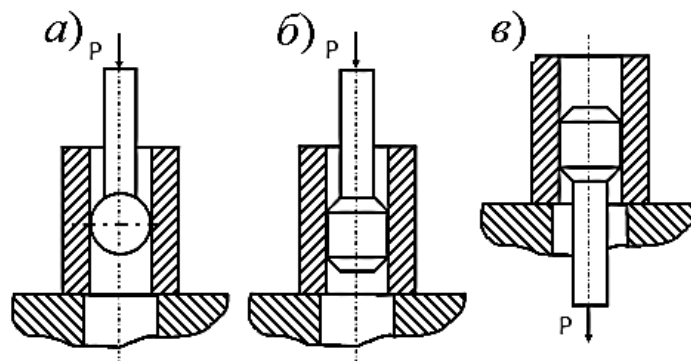


Рисунок 4.2 – Схемы обкатывания (а, б) и раскатывания (в, г) поверхностей



а – шариком; б, в – дорном

Рисунок 4.3 – Схемы калибровки отверстий

Задание

1 Подготовить образцы в соответствии с заданными размерами, измерить твердость поверхности до обработки.

- 2 Закрепить заготовку в патроне токарного станка.
- 3 Провести обкатку поверхности и измерить ее твердость.
- 4 Приготовить микрошлиф обработанной заготовки, определить глубину деформированного слоя и зарисовать структуру поверхностного слоя.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислить основные методы поверхностного упрочнения.
- 2 Указать причины упрочнения поверхности механическими методами.
- 3 Указать области применения упрочнения поверхности пластическим деформированием.

5 Лабораторная работа № 5. Поверхностная закалка токами высокой частоты

Цель работы: изучение технологических возможностей и особенностей закалки токами высокой частоты (ТВЧ).

Оборудование и инструмент: твердомер Роквелла ТР 5014; индукционный нагреватель «StrongBEL HIF-2»; инфракрасный пирометр «Кельвин компакт»; образец стали 45; штангенциркуль ШЦ-I; клещи термические, штатив с держателями.

Все методы упрочнения металла сопровождаются увеличением числа дефектов кристаллического строения (дислокаций, вакансий, межузельных атомов). Так как пластическая деформация обычно происходит за счет сдвигового процесса (смещения слоев металла по плоскостям скольжения), то любые дефекты кристаллического строения затрудняют скольжение слоев металла, а следовательно, повышают сопротивление деформации и уменьшают пластичность. Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру и свойства, является термическая обработка.

Одним из способов поверхностного упрочнения стальных деталей является *поверхностная закалка*. В результате поверхностной закалки увеличивается твердость поверхностных слоев изделия с одновременным повышением сопротивления истиранию и предела выносливости. Общим для всех видов поверхностной закалки является нагрев поверхностного слоя детали до температуры закалки с последующим быстрым охлаждением. Толщина закаленного слоя при поверхностной закалке определяется глубиной нагрева. Наибольшее распространение имеет закалка с нагревом изделий токами высокой частоты. Метод основан на том, что если в переменное магнитное поле, создаваемое проводником-индуктором, поместить металлическую деталь, то в ней будут индуцироваться вихревые токи, вызывающие нагрев металла. Чем больше частота тока, тем тоньше получается закаленный слой. Обычно используются полупроводниковые

генераторы с частотой 50...15000 Гц. Глубина закаленного слоя – до 2 мм.

Практически важно знать «горячую глубину», т. е. глубину проникновения тока при температурах выше точки Кюри. Для конструкционных сталей подсчитывается по формуле

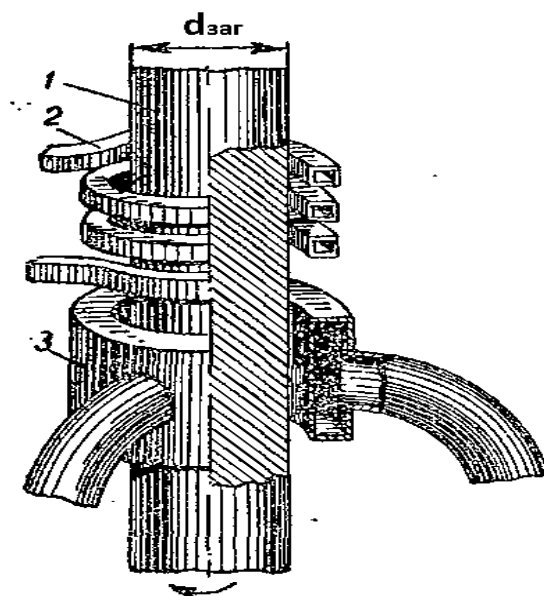
$$P_{гор} = \frac{600}{\sqrt{f}},$$

где $P_{гор}$ – горячая глубина, мм;

f – частота тока, Гц.

Величиной прокаливаемости считается расстояние от поверхности образца до зоны с полумартенситной структурой. Для заданной марки стали твердость полумартенситной структуры составляет 42 HRC.

Индукторы изготавливаются из медных трубок, внутри которых циркулирует вода, благодаря чему они не нагреваются. Форма индуктора соответствует внешней форме изделия, при этом необходимо постоянство зазора между индуктором и поверхностью изделия. Схема технологического процесса закалки ТВЧ представлена на рисунке 5.1. Зазор между изделием и индуктором обычно принимается равным 2...6 мм. Меньший зазор может приводить к перегреву наружного слоя или пробоем воздушного зазора, больший зазор – к снижению интенсивности нагрева. Отверстия, пазы и другие неровности необходимо заполнять латунными или размоченными в воде деревянными вставками (во избежание перегрева или оплавления острых кромок).



1 – заготовка; 2 – трубка индуктора; 3 – спрейер (разбрызгиватель)

Рисунок 5.1 – Схема технологического процесса закалки ТВЧ

Закалку изделий производят, в зависимости от марки стали, в воде, водных растворах, на воздухе или в масле. Высокая скорость нагрева смещает фазовые

превращения в область более высоких температур, поэтому температура закалки при нагреве токами высокой частоты должна быть выше, чем при обычном нагреве (рисунок 5.2).

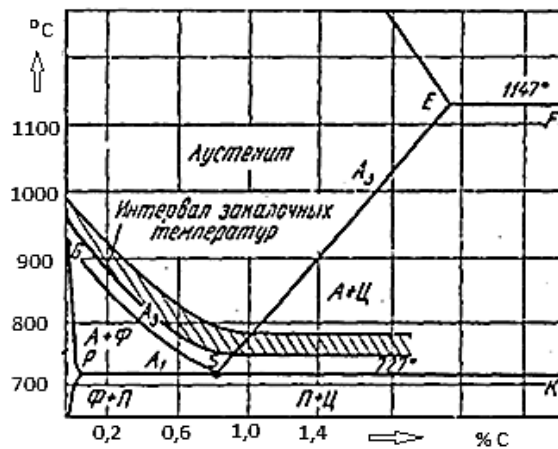


Рисунок 5.2 – Интервалы закалочных температур в зависимости от содержания углерода

Температура нагрева стальных заготовок в зависимости от скорости нагрева приводится в таблице 5.1. Качество закалки контролируется измерением твердости и анализом структуры на отсутствие следов перегрева и феррита.

Таблица 5.1 – Температуры закалки сталей при нагреве ТВЧ

Марка стали	Температура нагрева в зависимости от скорости нагрева, °С	
	30...60	100...200
35	910...950	930...970
40	890...940	910...960
45	880...920	900...940
50	880...920	900...940
50Г	860...900	880...920
65Г	840...880	860...900
35Х	940...980	960...1000
40Х	920...960	940...980
45Х	920...960	940...980
40ХНМ	920...960	940...980
40ХН	900...940	920...960
У8А	820...860	840...880
ХВГ	840...880	860...900

При правильных режимах нагрева после охлаждения получается структура мелкоигольчатого мартенсита. Твердость повышается на 2...4 HRC по сравнению с обычной закалкой, возрастает износостойкость и предел выносливости.

Перед закалкой ТВЧ изделие подвергают нормализации, а после закалки низкому отпуску при температуре 150 °С...200 °С (самоотпуск). Наиболее целесообразно использовать этот метод для изделий из сталей с содержанием углерода более 0,4 %. После закалки ТВЧ твердость поверхности на две-три единицы HRC выше, чем после обычной закалки, и более мелкое действительное зерно (10-й–12-й балл). Сопротивление усталостному разрушению повышается в 1,5–2 раза.

Преимущества метода:

- большая экономичность, нет необходимости нагревать все изделие;
- более высокие механические свойства;
- отсутствие обезуглероживания и окисления поверхности детали;
- снижение брака по короблению и образованию закалочных трещин;
- высокая производительность и возможность автоматизации;
- использование закалки ТВЧ позволяет заменить легированные стали на более дешевые углеродистые;
- позволяет проводить закалку отдельных участков детали.

Недостатки метода:

- неравномерный нагрев поверхности детали;
- ограничения по форме и размерам детали;
- высокая стоимость индукционных установок.

Целесообразно использовать в серийном и массовом производстве.

Работа включает в себя следующие этапы.

- 1 Выбор температуры нагрева.
- 2 Нагрев заготовки ТВЧ.
- 3 Контроль температуры нагрева инфракрасным пирометром.
- 4 Охлаждение заготовки.
- 5 Измерение твердости и определение глубины закаленного слоя.

Работа на оборудовании

Индукционный нагреватель Н1F-2 (рисунок 5.3) применяется для скоростного нагрева образцов с рабочей частотой 30...50 кГц. Индукционный нагреватель состоит из корпуса 1, двух винтов крепления сменных индукторов 2, кнопки включения 3, отверстий крепления сменных индукторов 4, лампы индикатора нагрева 5, лампы индикатора включения сети 6, сменных индукторов 7.

К работе с прибором Н1F-2 допускаются лица, прошедшие обучение, инструктаж и проверку знаний требований безопасности. Люди, использующие кардиостимуляторы или другие металлические или электронные хирургические имплантаты должны находиться на безопасном расстоянии, по меньшей мере 5 м, от устройства. При работе с Н1F-2, работник должен снять и убрать все металлические предметы, такие как ювелирные изделия, кольца, часы, ключи, пряжки ремней, пирсинг, а также одежду с металлическими украшениями, такие как металлические заклепки, пуговицы, мобильный телефон необходимо удалить от прибора на расстояние не менее 5 м. Запрещается включать прибор без установленного индуктора.

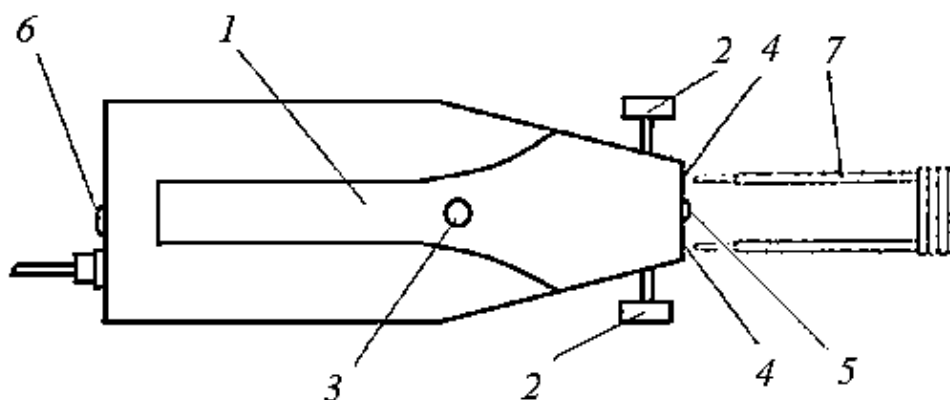


Рисунок 5.3 – Схема индукционного нагревателя НИФ-2

Работа на оборудовании.

1 Подключите кабель питания устройства к стандартной розетке ~ 220 В, 50 Гц. Загорится красная лампочка-индикатор на задней торцевой стороне прибора. *Перед включением*, убедитесь, что прибор находится в безопасном месте, и что кнопка включения нагрева не нажата.

2 Поднесите индуктор к изделию, которое надо нагреть, и нажмите кнопку пуска на приборе. В переднем торце прибора, где зажат индуктор, загорится белый индикатор. Нагрев происходит только при нажатой кнопке. Не превышать рекомендуемый рабочий цикл: 3 мин нагрев и 3 мин охлаждение.

3 После завершения цикла отпустите кнопку и отнесите индуктор от нагретого изделия. После окончания работы поместите прибор в безопасное место, пока индуктор полностью не остынет, и отключите его от электрической сети. Красный индикатор при этом должен погаснуть. После завершения работы оставьте устройство в подключенном состоянии еще на 10 мин – устройство будет охлаждаться собственной системой охлаждения, пока не остынет полностью, а затем отключите его от розетки. Если вы отключите устройство сразу, надо дать ему остыть в течение не менее 15 мин.

Последовательность измерения температуры:

- 1) включить пирометр «Кельвин компакт», нажав и удерживая кнопку включения;
- 2) проконтролировать появившееся при старте установленное значение излучательной способности, при необходимости откорректировать его;
- 3) нанести пятно лазерного целеуказателя на точку измерения;
- 4) запомнить значение измеренной температуры с индикатора.

В процессе измерения следует учитывать, что:

- измерения с неверным значением излучательной способности недостоверны;
- прибор измеряет осредненную температуру участка поверхности;
- для точного измерения нужно удерживать точку прицеливания минимум в течение времени измерения – 5 с для первого после включения прибора замера и 1 с для последующих замеров.

Ход работы

1 Вставьте необходимый индуктор в отверстия для зажима и затяните фиксирующие винты по бокам. Индуктор должен быть без повреждений изоляции обмотки.

2 Подключите кабель питания устройства к стандартной розетке ~ 220 В, 50 Гц. Загорится красная лампочка – индикатор на задней торцевой стороне прибора. *Перед включением* убедитесь, что прибор находится в безопасном месте, и что кнопка включения нагрева не нажата.

3 По таблице 5.1 назначьте температуру нагрева для заданной марки стали.

4 Поднесите индуктор к изделию, которое надо нагреть, и нажмите кнопку пуска на приборе. В переднем торце прибора, где зажат индуктор, загорится белый индикатор. Нагрев происходит только при нажатой кнопке. Не превышать рекомендуемый рабочий цикл: 3 мин нагрев и 3 мин охлаждение.

5 С помощью пирометра зафиксируйте температуру нагрева заготовки, а также продолжительность нагрева.

6 После завершения нагрева, отпустите кнопку включения индуктора и произведите закалку.

7 После охлаждения заготовки проведите замеры твердости на торце заготовки через каждый миллиметр (от цилиндрической поверхности заготовки к ее центру).

8 По результатам измерений сделайте вывод о глубине закалки.

9 По окончании работы уберите рабочее место.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Оборудование. Твердомер: марка, пределы измерения по шкале «С»; цена деления; условная запись твердости по шкале «С»; индукционный нагреватель: марка, тип установленного индуктора; назначение в данной работе; пирометр: марка, назначение в данной работе; пределы измерения температуры.

3 Основные формулы и результаты экспериментов:

- расчет горячей глубины нагрева;
- время и температура нагрева заготовки;
- значение глубины поверхностной закалки;
- значение максимальной твердости поверхности.

4 График зависимости твердости от глубины поверхности.

5 Выводы: указать преимущества поверхностной закалки.

Контрольные вопросы

1 Перечислить преимущества поверхностной закалки.

2 Указать факторы, влияющие на глубину нагрева.

6 Лабораторная работа № 6. Химико-термическая обработка стали

Цель работы: ознакомление с основными положениями теории химико-термической обработки (ХТО); изучение технологических процессов важнейших видов химико-термической обработки и структуры слоев стали после ХТО.

Оборудование и инструмент: микроскоп металлографический ЛабоМет-1, видеокамера TOUPCAM™, ПЭВМ ITEX™ MAXIMA,

*Химико-термической обработкой называют технологические процессы, приводящие к диффузионному насыщению поверхностного слоя деталей различными элементами. ХТО применяют для повышения твердости, износостойкости, сопротивления усталости и контактной выносливости, а также для защиты от электрохимической и газовой коррозии. При ХТО деталь помещают в среду, богатую насыщающим элементом. При ХТО происходят три элементарных процесса: диссоциация, абсорбция и диффузия. **Диссоциация** протекает в газовой среде и состоит в распаде молекул и образовании активных атомов диффундирующего элемента. **Абсорбция** заключается в поглощении поверхностью металла насыщающего элемента. Под **диффузией** понимают проникновение элемента вглубь насыщаемого металла за счет теплового движения атомов. В результате ХТО образуется диффузионный слой.*

Наибольшая концентрация насыщаемого элемента наблюдается на поверхности изделия, по мере удаления от поверхности она снижается. Фазовые и структурные изменения, происходящие при ХТО в диффузионном слое, и его строение определяются изотермическим разрезом диаграммы состояния «обрабатываемый металл – насыщающий элемент» при температуре диффузионного насыщения.

Основные виды и режимы химико-термической обработки, а также свойства поверхностных слоев приведены в таблице 6.1.

Цементация стали – технологический процесс диффузионного насыщения углеродом поверхностного слоя. Цель цементации – получить детали машин с твердой и износоустойчивой поверхностью при сохранении вязкой, хорошо выдерживающей динамические нагрузки сердцевины. Цементированные изделия предназначены для работы при знакопеременных нагрузках и в условиях трения и износа. Цементации подвергают зубчатые колеса, валы, оси, распределительные валики, кулачки, червяки, изготовленные, как правило, из низкоуглеродистой стали. Цементация проводится путем нагрева и длительной выдержки деталей в науглероживающей среде при температуре аустенитного состояния стали (900 °С...950 °С). Цементацию наиболее часто осуществляют в газовой среде или в твердом карбюризаторе. При газовой цементации образование атомарного углерода происходит в результате диссоциации предельных углеводородов:



При цементации в твердом карбюризаторе атомарный углерод образуется в результате диссоциации оксида углерода:



Содержание углерода в поверхностной зоне определяется пределом его растворимости в аустените при температуре цементации (линия *SE* диаграммы «железо – цементит»). Обычно цементацию проводят таким образом, чтобы содержание углерода в поверхностной зоне не превышало 1,2 %. По мере удаления от поверхности в глубину изделия содержание углерода постепенно снижается, доходя до исходного состояния в цементируемой стали. После медленного охлаждения от температуры цементации поверхностная зона имеет структуру заэвтектоидной стали и состоит из перлита и карбидов (цементита). Это так называемая заэвтектоидная зона. Далее следует эвтектоидная зона, представляющая собой перлит. Под эвтектоидной находится доэвтектоидная зона со структурой перлита и феррита. Микроструктура поверхностной области стали после цементации приведена на рисунке 6.1. После цементации изделия подвергаются неполной закалке с последующим низким отпуском. В результате термической обработки высокоуглеродистая поверхностная зона приобретает структуру отпущенного мартенсита с включением цементита. Твердость ее достигает значения 62 HRC.

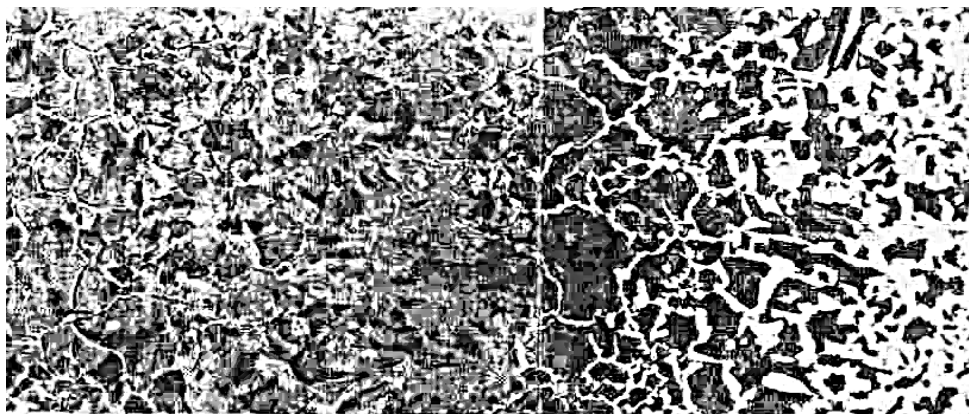


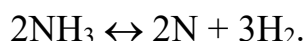
Рисунок 6.1 – Микроструктура поверхностной области стали, подвергнутой цементации

После термической обработки твердость сердцевины определяется химическим составом стали и находится в пределах 15...35 HRC. В зависимости от упрочнения сердцевины цементируемые стали делятся на три группы: *углеродистые стали с неупрочняемой сердцевиной*, *низколегированные стали со слабо упрочняемой сердцевиной*, *среднелегированные стали с упрочняемой сердцевиной*.

К *первой группе* относятся стали 10, 15, 20. В этом случае после закалки в воде сердцевина имеет ферритоперлитную структуру. При закалке в масле сердцевина низколегированных сталей *второй группы*, к которым относятся

15X, 20X, 15XP, 20XН, претерпевает бейнитное превращение и заметно упрочняется. В сердцевине среднелегированных цементируемых сталях 20ХГР, 20ХНР, 18ХГТ, 30ХГТ, 12ХНЗ, 12Х2Н4, 18Х2Н4В после охлаждения в масле и далее на воздухе образуется структура мартенсита, что приводит к весьма интенсивному упрочнению.

Азотированием называется процесс поверхностного насыщения стали азотом. Оно применяется в целях повышения твердости, износостойкости и предела усталости, а также коррозионной стойкости деталей машин. Процесс азотирования проводится при 480 °С...650 °С в течение 1...90 ч в среде газообразного аммиака, диссоциирующего по реакции



Образовавшийся атомарный азот адсорбируется поверхностью и диффундирует в металл. На основании диаграммы «железо – азот» (рисунок 6.2, а) можно представить изменения микроструктуры, происходящие при азотировании в поверхностной зоне (рисунок 6.2, б).

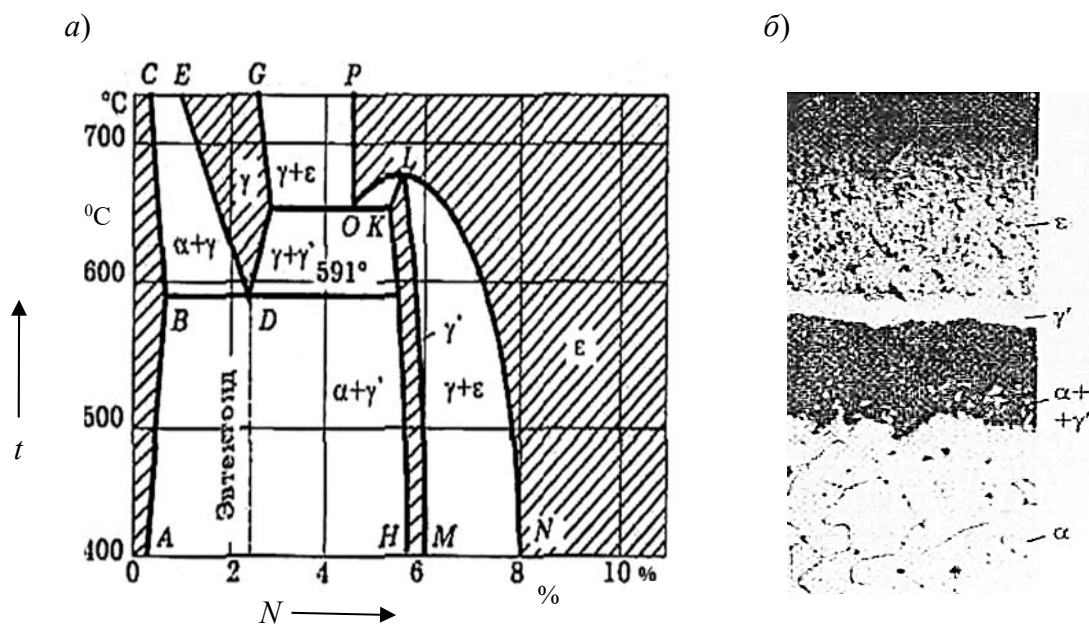


Рисунок 6.2 – Диаграмма системы Fe–N (а) и микроструктура поверхностной области стали, подвергнутой азотированию (б)

В этой системе возможно образование следующих фаз: α – азотистый феррит; γ – азотистый аустенит; γ' – нитрид Fe_4N ; ϵ – нитрид Fe_3N . Со многими легирующими элементами азот также образует химические соединения – нитриды (CrN , Cr_2N , MnN , TiN , MoN , AlN и др.).

При температуре азотирования железа ниже эвтектоидной (591 °С) азотированный слой состоит из трех последовательно расположенных друг за другом фаз: ϵ (Fe_3N), γ' (Fe_4N) и α ($\text{Fe}_\alpha(\text{N})$). В процессе медленного охлаждения с этих температур γ -фаза при 591 °С испытывает эвтектоидное превращение на α и γ' , а при быстром охлаждении претерпевает мартенситное превращение. В отличие

от железа наличие углерода в стали приводит к образованию на поверхности диффузионного слоя карбонитридных фаз типа $Fe_3(C, N)$.

При азотировании **легированных** сталей наряду с вышеперечисленными фазами – ϵ , γ' , γ , α , одновременно образуются **нитриды** легирующих элементов.

Для повышения твердости и износоустойчивости процесс азотирования подвергают специальные стали, получившие название **нитраллои**. Они содержат алюминий, хром, молибден, которые образуют стойкие против коагуляции и роста нитриды. Наиболее часто азотированию подвергают стали 35ХМЮА, 38ХМЮА, 38Х2МЮА, 35ХМА. Азотирование проводится при $500\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 520\text{ }^{\circ}\text{C}$. В процессе охлаждения нитраллоев от температуры азотирования до комнатной, вследствие уменьшения растворимости легирующих элементов, в α -зоне происходит образование очень дисперсных спецнитридов **CrN**, **MoN**, **AlN**. Эти дисперсные частицы препятствуют движению дислокаций и тем самым повышают твердость азотированного слоя до 1000 HV.

Твердость обычных конструкционных сталей после азотирования невысока. Для повышения **усталостной прочности** азотируют конструкционные хромоникелевые стали.

С целью повышения коррозионной стойкости азотированию могут подвергаться любые стали. Процесс проводится при $600\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение $0,5 \dots 1,0$ ч. Коррозионная стойкость повышается в результате образования на поверхности изделия сплошной зоны из ϵ -фазы (Fe_3N).

Азотирование является окончательной обработкой. Термическая обработка – улучшение, заключающаяся в закалке и высоком отпуске, предшествует азотированию. Азотированию подвергают такие детали, как гильзы гидроцилиндров и коленчатые валы дизелей, валы, шпиндели, ходовые винты и трубчатые изделия в станкостроении, зубчатые колеса.

Цианированием называется процесс одновременного насыщения поверхности деталей углеродом и азотом. Различают высокотемпературное и низкотемпературное цианирование.

Высокотемпературное цианирование проводят при $800\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цель его – повысить твердость, износостойкость и усталостную прочность деталей машин из малоуглеродистых и среднеуглеродистых простых и легированных сталей. После высокотемпературного цианирования следует закалка и низкий отпуск.

Низкотемпературное цианирование проводят при $540\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 580\text{ }^{\circ}\text{C}$ и применяют в основном для повышения стойкости окончательно термически обработанного инструмента из быстрорежущей стали.

Процесс цианирования осуществляется в жидких и газообразных средах. Жидкое цианирование осуществляется в ваннах в смеси расплавленных цианистых солей типа NaCN, KCN с нейтральными солями типа NaCl, BaCl₂, BaCO₃. Недостатками процесса жидкостного цианирования являются большая ядовитость цианистых солей и высокая их стоимость.

Газовое цианирование называют нитроцементацией. Этот процесс осуществляют в смеси науглероживающих и азотирующих газов. В качестве науглероживающего может быть любой газ, применяемый при газовой цементации.

Азотирующим газом является аммиак. Структура цианированного слоя определяется количеством углерода и азота, находящихся в нем. На состав и свойства цианированного слоя особое влияние оказывает температура цианирования. Повышение ее увеличивает содержание углерода в слое, снижение – увеличивает содержание азота.

После цианирования на поверхности возникает тонкий карбонитридный слой $Fe_3(C, N)$. Под ним лежит слой азотистого феррита. После закалки и низкого отпуска цианированный слой представляет собой мелкокристаллический мартенсит с включениями карбонитридных фаз.

В настоящее время высокотемпературное газовое цианирование (нитроцементация) широко внедряется вместо газовой цементации. Высокотемпературное цианирование проводят при более низких температурах, не вызывающих рост зерна, как, например, при газовой цементации. Кроме этого цианированные изделия по твердости и износостойкости превосходят цементированные. Это объясняется наличием в диффузионном слое не только углерода, но и азота.

Борирование – это диффузионное насыщение поверхностного слоя бором. Процесс проводится с целью повышения поверхностной твердости и износостойкости, а также коррозионной стойкости. Наиболее перспективны для промышленного использования борирования в порошкообразных смесях, в расплавах солей и газовое борирование.

Твердое борирование проводят в порошковых смесях на основе технического карбида бора (B_4C) или в металлотермических смесях, основу которых составляют оксид бора (B_2O_3) и алюминий. Борирование из обмазок целесообразно применять при необходимости упрочнения крупногабаритных изделий или для местного борирования отдельных участков деталей. Поставщиками бора при насыщении из обмазок являются карбид бора или оксид бора. На поверхность обрабатываемого изделия обмазки наносят кистью. Наиболее часто применяются обмазки, состоящие из двух слоев – активного и защитного. Защитный слой предохраняет активный от окисления в процессе борирования в кислородосодержащей атмосфере.

Борирование в расплавах солей и окислов делится на электролизное и безэлектролизное. Электролизное борирование проводят в расплаве буры ($Na_2B_4O_7$). Обрабатываемая деталь является катодом. Безэлектролизное борирование осуществляют в расплавах боросодержащих веществ (B , B_4C и др.) и нейтральных солей.

Газовое борирование проводят в среде, полученной разложением газообразных соединений бора. Наиболее часто применяется *диборан* (B_2H_6) и *треххлористый бор* (BCl_3), которые разбавляют газами, не содержащими бор (H_2 , Ar , N_2).

Борирование сталей проводят при температурах $800\text{ }^{\circ}C \dots 1050\text{ }^{\circ}C$ в течение $2 \dots 10$ ч. Борированный слой состоит из двух зон: зоны боридов и переходной зоны (рисунок 6.3, а). Зона боридов имеет характерное игольчатое строение и представляет собой химические соединения бора и железа. При жидкостном борировании зона имеет однофазное строение и состоит из фазы Fe_2B , во всех

остальных случаях состоит из двух фаз – FeВ и Fe₂В. Углерод резко снижает содержание боридов FeВ в слое, а легирующие элементы, за исключением алюминия и меди, – увеличивают. Легирующие элементы в сталях собственных боридов не образуют, а легируют бориды железа.

Под зоной боридов располагается переходная зона, отличающаяся по своей структуре от сердцевины. Она представляет собой твердый раствор бора, а также углерода и легирующих элементов в железе. Толщина переходной зоны определяется глубиной проникновения бора. Легирующие элементы уменьшают толщину переходной зоны.

Средне- и тяжело нагруженные детали после борирования подвергаются закалке и отпуску. Борирование используют для упрочнения различных деталей машин, технологической оснастки и инструмента, работающих в условиях интенсивного износа.

Диффузионная металлизация

Насыщение поверхности стали элементами-металлами (алюминием, хромом и т. п.) называется диффузионной металлизацией.

Хромирование – это процесс диффузионного насыщения поверхностных деталей хромом. Хромирование железа и сталей с содержанием углерода менее 0,2 % проводят с целью повышения коррозионной стойкости в различных агрессивных средах и жаростойкости. Стали с содержанием углерода более 0,3 % подвергают хромированию для повышения твердости и износостойкости, а также коррозионной стойкости и жаростойкости.

При хромировании стали с содержанием углерода менее 0,2 % образующийся диффузионный слой представляет собой твердый раствор хрома в α -железе. Содержание хрома на поверхности слоя достигает 70 %. Толщина слоя не превышает 0,2 мм. Хромированный слой низкоуглеродистой стали – твердый раствор хрома в альфа-железе – обладает низкой твердостью (200 НВ) и высокой пластичностью. Детали можно сгибать, осаживать, т. е. пластически деформировать. Хромируют стали с различным содержанием углерода. С увеличением его содержания диффузия хрома замедляется. При одинаковых режимах (температуре и выдержке) максимальная глубина слоя будет у низкоуглеродистой стали.

Диффузионный слой сталей, содержащих более 0,3 % углерода, состоит из трех зон: карбидной, промежуточной и обезуглероженной. С увеличением углерода до 0,8 % толщина карбидной и промежуточной зон возрастает. Карбидная зона представляет собой сплошной слой карбидов хрома (Cr₂₃C₆, Cr₇C₃) толщиной до 0,02 мм, поэтому его твердость высокая – до 72 HRC (1300 НВ) и превосходит твердость азотированной и цементованной закаленной стали. Слой обладает высокой износостойкостью, но и повышенной хрупкостью, что является его основным недостатком. Промежуточная зона имеет перлитное строение и состоит из феррита и карбидов хрома. Содержание углерода в обезуглероженной зоне ниже, чем в сердцевине. Микроструктура стали У8 по-

сле хромирования представлена на рисунке 6.3, б. Жаростойкость хромированной стали – до 800 °С.

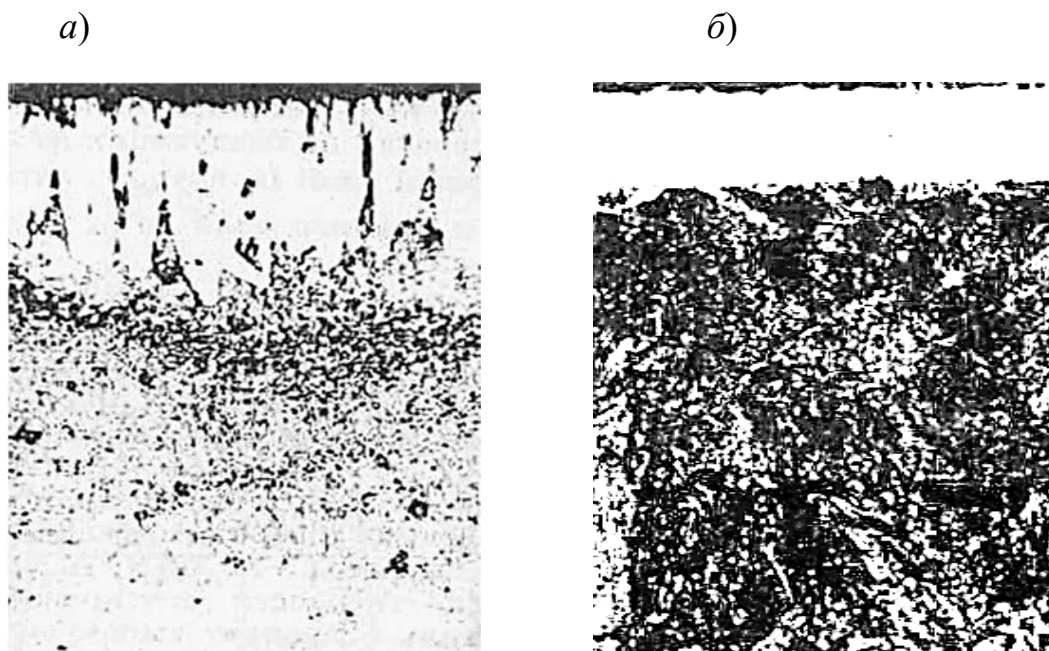


Рисунок 6.3 – Микроструктура поверхностной области стали, подвергнутой борированию (а) и хромированию (б)

Хромирование осуществляют в порошковых смесях, в газовой и жидкой средах. Порошковая смесь для хромирования состоит из поставщика хрома, в качестве которого используют порошки хрома, феррохрома, оксиды хрома и веществ, предотвращающих спекание хромосодержащих частиц и прилипание их к поверхности изделий. При хромировании в газовой среде так же, как и при насыщении в порошковых смесях источником активных атомов хрома служат галогениды хрома, находящиеся в газообразном состоянии.

Жидкой средой при хромировании являются расплавы солей хлоридов хрома (CrCl_2 и CrCl_3), а также соли-стабилизаторы, в качестве которых используют одно из следующих соединений BaCl_2 , CaCl_2 , MgCl_2 .

Диффузионное насыщение хромом проводится при температурах около 1000 °С в течение 4...10 ч.

При необходимости после хромирования тяжело нагруженные детали подвергают закалке с последующим отпуском. Хромирование применяется для повышения стойкости штампового инструмента, пресс-форм литья под давлением алюминиевых сплавов, различных деталей двигателей и газовых турбин, работающих при высоких температурах, фильтров нефтяных скважин, деталей насосов и турбобуров, крепежных деталей.

Алитирование – операция насыщения поверхности деталей алюминием для повышения их жаростойкости (окалиностойкости). При нагревании на поверхности детали образуется плотная пленка оксида алюминия, которая защищает основной металл от окисления. Жаростойкость алитированных деталей – достигает 900 °С, твердость поверхности повышается до 450 НВ, износостойкость

слоя низкая. Устранение хрупкости и выравнивание содержания алюминия в поверхностном и подповерхностном слоях достигаются диффузионным отжигом при температуре 1000 °С в течение 3...5 ч.

Алитированию чаще подвергают детали из низкоуглеродистых, реже – среднеуглеродистых, легированных сталей и чугунов (клапаны, лопатки турбин, трубы коллекторов, чехлы термопар и т. п.). Увеличение содержания углерода и легирующих элементов в стали понижает скорость диффузии алюминия, что увеличивает продолжительность процесса и снижает производительность. Эту операцию проводят в твердой, жидкой или газообразной среде. Глубина алитированного слоя – 0,15...0,45 мм.

Силицирование – операция насыщения поверхностного слоя стали кремнием. Проводится для деталей, работающих в агрессивных средах, при высокой температуре и в условиях трения для оборудования нефтяной, химической и бумажной промышленности (детали насосов, арматура, патрубки, винты).

Силицированные детали обладают высокой жаростойкостью (окалиностойкостью) – до 750 °С – и кислотоупорностью, т. к. образующаяся на поверхности оксидная пленка кремния предохраняет металл от дальнейшего окисления и является стойкой к кислотам любой концентрации (азотной, серной, соляной) при их температуре до 100 °С.

Несмотря на низкую твердость – 270 НВ (300 НV) – силицированный слой плохо обрабатывается режущими инструментами, отличается пористостью, но обладает высокой износостойкостью после пропитки маслом при 170 °С. Силицированные изделия можно деформировать и накатывать на них резьбу.

Наиболее широко применяется газовое силицирование порошковым методом. В рабочее пространство печи помещают детали, засыпают их порошковым ферросилицием или карбидом кремния, нагревают до 1000 °С и пропускают хлор. Образуется хлористый кремний. При контакте с поверхностью детали из него вытесняется атомарный кремний, диффундирующий в сталь. Процесс ведут в течение 2...5 ч. Силицированный слой толщиной 0,5...1,4 мм представляет собой твердый раствор, содержание кремния в котором до 14 %.

Кроме перечисленных операций химико-термической обработки, в машиностроении используются *диффузионное цинкование, титанирование, бороалитирование, боросилицирование* и другие операции многокомпонентного насыщения поверхности деталей несколькими металлами и металлоидами.

Задание

- 1 Изучить теорию и технологию химико-термической обработки.
- 2 Провести процессы цементации, хромирования, алитирования стальных заготовок.
- 3 Провести микроанализ шлифов, подвергнутых химико-термической обработке, определить и записать микроструктуру диффузионных слоев и сердцевины, указать их свойства.

Таблица 6.1 – Основные виды и режимы химико-термической обработки, свойства поверхностных слоев

Вид ХТО	Цементация	Нитроцементация	Азотирование	Хромирование	Борирование
Среда	СО	СО + NH ₃	NH ₃	Пасты, содержащие хром	Пасты, содержащие В ₄ С, В ₂ О ₃
Температура, °С	≈ 950	550/850	480...650	≈ 1000	1000
Продолжительность, ч	4...8	2...8	1 (углеродистые стали)	4...10	2...10
Фазы, образующиеся в поверхностном слое	П + Fe ₃ С	П+Fe ₃ (CN)	ε-фаза (Fe ₃ N)	Fe _α (Cr) (низкоуглеродистые)	FeВ, Fe ₂ В
Свойства поверхностных слоев	Высокая твердость и износостойкость (после закалки и низкого отпуска)	Высокие твердость и износостойкость (после закалки и низкого отпуска), коррозионная стойкость	Повышенные усталостная прочность и коррозионная стойкость	Высокая коррозионная стойкость	Наибольшая износостойкость, коррозионная стойкость
Примечания	Крупнозернистая структура (следствие перегрева)	Мелкозернистая структура	Азотирование – окончательный вид обработки (после улучшения и шлифования)	При необходимости – закалка и отпуск	При необходимости – закалка и отпуск

Контрольные вопросы

- 1 Дать определения основным видам ХТО, назначить режимы, указать образующиеся при этом структуры, их свойства и области применения.
- 2 Изложить сущность процессов, протекающих при различных видах ХТО.

7 Лабораторная работа № 7. Нанесение защитных и износостойких покрытий электрохимическими методами

Цель работы: ознакомление с методами нанесения защитных и износостойких покрытий электрохимическими методами.

Оборудование и инструмент: штатив с держателем, весы, мензурка, мерный стакан, электролитическая ванна, стальные заготовки, источник постоянного тока.

Обезжиривание материалов относится к одному из способов подготовки поверхностей деталей перед гальванической обработкой. Под обезжириванием понимают операцию очистки поверхности изделия от механически приставших загрязнений, не соединенных химически с металлом, т. е. речь идет не только об удалении жировых загрязнений, но и об удалении механически приставших твердых загрязнений. Обезжиривание в щелочных растворах (иногда с применением электрического тока), в органических растворителях и эмульсионное обезжиривание относится к черновой обработке, при которой с поверхности материала удаляются в большей или меньшей степени загрязнения, попавшие на нее при хранении, механической обработке, в результате эксплуатации и т. п. При обезжиривании могут встречаться загрязнения в виде органических и неорганических веществ.

К первым относятся разные минеральные масла (смазочные, консервирующие и др.), жиры, воски, парафин, стеарин и т. п. Ко вторым относятся неорганические остатки (полировальные пасты, пыль и другие твердые загрязнения). Вещества, входящие в загрязнения, могут переходить в раствор обезжиривания в виде растворимых соединений или удаляться с поверхности материала не растворением, а путем других физико-химических процессов.

Обезжиривание в органических растворителях является относительно быстрым способом, но стоит дороже – как за счет высокой стоимости самих растворителей, так и за счет расходов на обеспечение необходимых санитарных требований, поскольку испарения большинства растворителей являются вредными для человека, а также огнеопасными.

Обезжиривание в органических растворителях мелких деталей осуществляют погружением, а крупных – обтиранием. В качестве растворителей используются бензин, керосин, гексан и хлорированные углеводороды. Бензин растворяет большинство жиров, относительно устойчив, однако легко воспламеняется

и ядовит. Керосин более гигроскопичен, чем бензин, менее горюч, при длительном обезжиривании позволяет удалять окалину. Бензин и керосин применяют при штучном обезжиривании деталей путем погружения и воздействия щеткой. После обезжиривания требуется тщательная просушка (обычно в опилках). Эти растворители ухудшают адгезию последующих покрытий поверхностей.

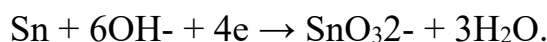
Гальваническая обработка металлов

Гальваническое *лужение* нашло широкое распространение в консервной промышленности для покрытия внутренних поверхностей консервных банок. Катодный характер олова обеспечивает достаточную защиту стального основания от действия органических кислот в отсутствие атмосферного воздуха. Олово образует нерастворимые оксиды (SnO , SnO_2), достаточно стойкие в атмосфере и в воде. Олово получают электролизом как из кислых растворов солей закиси олова, так и из щелочных электролитов. Из кислых растворов при одинаковой плотности тока олово осаждается в 2 раза быстрее, чем из щелочных.

Щелочные растворы приготавливают несколькими способами, например, из четыреххлористого олова:



или анодным растворением олова в растворе гидроокиси щелочных металлов:



Анодное и катодное пространства разделяются с помощью диафрагмы. Катодами служат стальные листы. Плотность тока составляет $1 \dots 2 \text{ А/м}^2$, температура электролита $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Для повышения качества покрытия в раствор добавляют небольшое количество окислителя, например перекиси водорода.

Наиболее приемлемым составом кислых растворов является: H_2SO_4 концентрированная – 100 г/л , SnSO_4 – 54 г/л , крезол или фенол (для снижения роста крупных кристаллов олова на поверхности лужения) – $20 \dots 30 \text{ г/л}$, желатин или клей (для улучшения осаждения олова из кислых растворов) – $2,5 \text{ г/л}$, плотность тока – $2,5 \text{ А/дм}^2$, температура состава – $\geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$. В процессе лужения необходимо постоянно следить за процентным содержанием состава раствора, проводить его соответствующую фильтрацию и обновление. Для снижения пористости покрытия после лужения тонким слоем возможно применение оплавления покрытия.

Хромирование является одним из наиболее распространенных и имеющих большое значение гальванических процессов. Электрохимически осажденные хромовые покрытия имеют исключительные химические и физические свойства, они устойчивы против атмосферной коррозии при нормальной и при повышенной температуре, очень тверды и стойки против механического износа,

имеют небольшой коэффициент трения и большую отражательную способность. Эти покрытия применяются для двух совершенно различных целей:

1) для придания декоративного вида никелированным, омедненным, оцинкованным и латунированными деталям;

2) для повышения износоустойчивости поверхностей деталей, подвергающихся износу (валы, вращающиеся детали, поршневые кольца или режущий инструмент).

Хромированием можно защитить от износа детали, не бывшие в эксплуатации, а также восстановить детали, износившиеся во время эксплуатации. Хромовым покрытием размеры износившейся детали увеличивают до требуемых, что дает возможность снова использовать ее по назначению. Доброкачественные хромовые покрытия осаждаются только из растворов хромовой кислоты, к которым добавляются соответствующие вещества, обычно неорганические кислоты. Наиболее приемлемыми для хромирования являются электролиты, содержащие хромовую и серную кислоты (распространенными составами являются: $\text{CrO}_3 - 150$ г/л, $\text{H}_2\text{SO}_4 - 2,5$ г/л; $\text{CrO}_3 - 350$ г/л, $\text{H}_2\text{SO}_4 - 3,5$ г/л). Достоинством первого раствора является меньшая потеря хромового ангидрида CrO_3 при выемке деталей из ванны, второго – большее постоянство состава электролита.

При приготовлении электролита для твердого хромирования содержание хлористого ангидрида уменьшают, а серной кислоты – увеличивают ($\text{CrO}_3 \rightarrow 80$ г/л, $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2,5$ г/л), а для декоративного покрытия – наоборот ($\text{CrO}_3 \rightarrow 450$ г/л, $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 0,8$ % от количества CrO_3). Поскольку хром находится в растворе, необходимо постоянно следить за состоянием концентрации электролита. Хромирование производится при плотности тока 25 А/дм² и температуре электролита 450 °С.

Кадмий образует с органическими соединениями как простые, легко растворимые в воде и устойчивые соли, так и комплексные соли, из которых для гальванических целей наиболее важное значение имеет цианистый комплекс. Кадмий можно осаждать из кислых электролитов, содержащих кадмий в виде элементарных ионов, и из щелочных электролитов, в которых кадмий находится в виде комплексного цианисто-кадмиевого аниона. В последнее время широкое применение получил щелочной цианистый электролит, т. к. он малочувствителен к изменению своего состава:

CdO, г/л	30;
NaCN, г/л.....	120;
NaOH, г/л	10;
NiSO ₄ кристаллический, г/л.....	2;
сульфированное касторовое масло, г/л	1;
плотность тока, А/дм ²	1...2,5;
напряжение на зажимах, В	1...3;
температура, °С.....	18...25.

При составлении электролита можно исходить из окислов, гидроокисей, сульфата или цианида кадмия или непосредственно из соответствующего комплексного кадмиевого цианида.

В настоящее время для меднения используют электролит, который содержит:

- медь в форме комплексной цианистой соли меди в количестве 20...70 г/л;
- свободный цианид в количестве 5...15 г/л;
- карбонат натрия (калия) в количестве 0...100 г/л;
- в некоторых случаях едкое кали или едкий натр, сегнетову соль, блескообразующие добавки и т. п.

Первые три вещества содержатся в любом медноцианистом электролите, а гидроксид калия или натрия и сегнетова соль применяются только в специальных ваннах. Блескообразующие добавки применяются относительно редко. Обычный медный электролит имеет, например, следующий состав и режим работы: цианистая медь CuCN – 45 г/л, цианистый натрий NaCN – 55 г/л, карбонат натрия Na_2CO_3 – 15 г/л, едкий натр NaOH – 3 г/л, плотность тока – 2 А/дм², температура электролита – 40 °С...45 °С. Электролит меднения с большим содержанием меди содержит: цианистую медь – 120 г/л, цианистый калий – 175 г/л, карбонат калия – 60 г/л, едкое кали – 35...48 г/л, блескообразующие добавки KCNS – 10 г/л; плотность тока – до 6 А/дм², температура электролита – 70 °С...85 °С.

Медный электролит с сегнетовой солью содержит: CuCN – 26 г/л, NaCN – 35 г/л, Na_2CO_3 – 30 г/л, сегнетовую соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 45 г/л; температура электролита – 55 °С...70 °С, плотность тока – до 6 А/дм². Главным недостатком всех трех указанных электролитов является малая устойчивость их состава. В обычных электролитах меднения и электролитах с сегнетовой солью цианиды – как в комплексном, так и в свободном состоянии – неустойчивы и непрерывно разлагаются. В электролитах меднения с большим содержанием меди неустойчива также и гидроксид натрия.

Наибольшее значение имеют медные покрытия в качестве промежуточного слоя при защитном и декоративном хромировании. В качестве промежуточного слоя (с толщиной 2...4 мкм) их применяют также при лужении стальных деталей.

Медные покрытия без дальнейшего защитного слоя (металлического или бесцветной органической краски) непригодны ни для декоративных целей, ни в качестве защиты против атмосферной коррозии, т. к. после полировки на воздухе они очень быстро окисляются и теряют свой блеск.

Очень распространено применение медных покрытий в качестве защиты некоторых поверхностей стальных деталей перед цементацией. Части поверхностей деталей, подлежащие цементации, изолируются соответствующей краской или смесью воска, а другие части, не подлежащие цементации, меднятся сначала в щелочном растворе, а затем в кислом электролите. Толщина медного слоя зависит от условий цементации и обычно равна 25...50 мкм.

Медные покрытия очень распространены в гальванопластике при электролитическом производстве типографских форм, при изготовлении матриц, при гальванопластическом производстве точных полых деталей и т.п. В этом случае применяют те же растворы и режимы работы, как и при покрытии для антикоррозионной защиты.

Латунирование применяют в следующих случаях:

- латунные покрытия толщиной около 2 мк улучшают адгезию резины со сталью;

- для декоративно-защитных целей;

- в качестве подслоя при декоративном хромировании стали.

Растворы для латунирования содержат следующие компоненты:

- медь в виде комплексной цианисто-калиевой соли меди в количестве от 10 до 30 г/л;

- цинк в виде комплексной цианистой соли цинка в количестве от 10 до 30 г/л; количество меди и цинка колеблется между 15 и 50 г/л, соотношение меди и цинка бывает от 1:3 до 3:1;

- свободный цианид;

- углекислый натрий (до 60 г/л) или углекислый калий (до 110 г/л).

Кроме этих основных компонентов, электролит латунирования содержит также:

- едкий натр или едкое кали в количестве до 10 г/л;

- аммиак и аммониевые кислоты в виде хлористого или сернокислого аммония;

- блескообразующие добавки.

Никелевые покрытия применяют как для защиты от коррозии, так и для декоративных целей, причем никелевые покрытия наносятся на все наиболее важные основные материалы, т. е. на сталь, чугун, медь, цинк, алюминий, сплавы этих металлов и т. д. Никелевые покрытия, осажденные в электролитах обычного типа для никелирования, получают матовыми или полублестящими, поэтому для декоративных целей, а также перед последующим хромированием эти покрытия необходимо полировать.

Для электролитического осаждения никелевых покрытий на практике применяют кислые растворы, чаще всего сульфатные. Иногда, особенно при осаждении очень твердых покрытий, применяют растворы из хлоридов или из сульфатов с большим содержанием хлоридов, прежде всего – с хлоридом аммония. Наиболее часто применяемым типом ванны является электролит, содержащий 50...60 г/л Ni (что соответствует 250 г/л сернокислого никеля $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Этот электролит работает при повышенной температуре 30 °С...50 °С, при pH от 4,0 до 5,5 и при плотности тока 2...3 А/дм². Для увеличения скорости осаждения покрытия повышают содержание Ni до 75...90 г/л и работают при температуре 50 °С...60 °С, с плотностью тока 4...10 А/дм².

Применение различных составов электролитов для никелирования.

Наиболее часто применяемым типом ванны является электролит, содержащий 50...60 г/л Ni (что соответствует 250 г/л сернокислого никеля $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Этот электролит работает при повышенной температуре 30 °С...50 °С, при pH от 4,0 до 5,5 и при плотности тока 2...3 А/дм². Для увеличения скорости осаждения покрытия повышают содержание Ni до 75...90 г/л и работают при температуре 50 °С...60 °С, с плотностью тока 4...10 А/дм².

Применение различных составов электролитов для никелирования:

1) $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 70...100 NaCl , 15...20 H_3BO_3 , 15...20 (рН 5,3, 20 °С...30 °С, $I_k = 0,5...2 \text{ А/дм}^2$. Раствор не перемешивается);

2) $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 150 NH_4Cl , 20 H_3BO_3 , 25 (рН 5,6...5,9, 50 °С...60 °С, $I_k = 2,5...5 \text{ А/дм}^2$. Электролит для осаждения твердых покрытий 380...500 HV).

К стали с большим содержанием углерода (свыше 0,35 %) или к закаленной стали никелевые и другие покрытия пристают хуже, поэтому такую сталь перед никелированием целесообразно протравливать в растворе 250...1000 г/л серной кислоты на аноде при плотности тока 10...50 А/дм^2 и при температуре не выше 30 °С.

Цинкование относится к наиболее распространенным процессам электрохимической обработки поверхностей стальных изделий. Это объясняется прежде всего тем, что цинковое покрытие (особенно после дополнительной обработки, например, хромированием, фосфатированием и т. п.) устойчиво против воздействия атмосферы и воды, а сам процесс цинкования относительно дешев и прост. Анодное защитное действие цинковых покрытий стали и черных металлов используется повсюду для тех деталей, которые подвергаются воздействиям атмосферы или воды. Однако анодный характер покрытий проявляется только при температуре воды примерно до 60 °С. При более высокой температуре потенциалы изменяются, и цинк становится по отношению к железу катодом. Поэтому для деталей, которые будут подвергаться воздействиям горячей воды (например, бойлеров), требуется, чтобы толщина цинкового покрытия была около 70 мкм и чтобы оно не имело пор. Беспористость цинковых покрытий не обязательна для тех деталей, которые подвергаются воздействию низкой или нормальной температуры или атмосферному воздействию.

Цинковые покрытия можно электролитически осаждать в основном из двух видов электролита:

1) из растворов, в которых цинк находится преимущественно в виде гидратированного цинкового катиона $\text{Zn}^{2+} + n\text{H}_2\text{O}$;

2) из растворов, в которых цинк находится преимущественно в виде комплексного аниона.

К первой группе можно отнести кислые электролиты, вторую группу образуют комплексные цианистые и цинкатные электролиты, а также пирофосфатные. Наиболее важное значение имеют цианистые и кислые электролиты. Простейшая рецептура цианистого электролита: ZnO – 45 г/л, NaCN – 100 г/л, NaOH – 38 г/л, блескообразующая добавка MoO_3 .

Задание

1 Изучить теорию и технологию химико-термической обработки.

2 Провести процессы: цементации, хромирования, алитирования стальных заготовок.

3 Провести микроанализ шлифов, подвергнутых химико-термической обработке, определить и записать микроструктуру диффузионных слоев и сердцевины, указать их свойства.

Контрольные вопросы

1 Перечислить основные виды гальванопокрытий и указать их назначение, особенности режимов осаждения.

2 Перечислить основные виды электролитов, применяемых для гальванопокрытий.

Список литературы

1 **Материаловедение. Технология композиционных материалов : учебник / А. Г. Кобелев [и др.]. – Москва: КНОРУС, 2020. – 270 с.**

2 **Лахтин, Ю. М.** **Материаловедение: учебник / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 6-е изд., стер. – Москва: Альянс, 2011. – 528 с.**