

ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА «ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям
по выборочной учебной дисциплине
цикла профессиональной и практической подготовки
ГОС ВПО по направлению подготовки магистра
22.04.01 «Материаловедение и технологии металлов»
профилей МТО, ПМ

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
КОМПЛЕКСНОГО УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Разработал
проф., д. т. н. В.И. Алимов
“ ____ ” _____ 20 г.

Рассмотрено на заседании
кафедры ФМ
“ ____ ” _____ 20 г. Протокол № ____

Заведующий кафедрой, доц., к. т. н.
_____ М.Т. Егоров

Утверждено на заседании
учебно-методической комиссии
по направлению 22.04.01
“ ____ ” _____ 20 г. Протокол № ____
Председатель комиссии, доц., к. т. н.
_____ М.Т. Егоров

Донецк – 2019 г.

УДК 621.785:669.1/89

Методические указания к практическим занятиям по курсу “Специальные технологии комплексного упрочнения материалов” (для магистров направления 22.04.01 профилей “Прикладное материаловедение” и “Металловедение и термическая обработка металлов”) / Сост.: Алимов В.И. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - 46 с.

В методических указаниях приведены общие закономерности превращений в материалах при наложении во время тепловой обработки вибраций, магнитных полей, ультразвуковых колебаний, ударных волн, радиационного облучения, технологические особенности комплексного упрочнения материалов, а также аппаратное обеспечение таких технологий. Предназначены для магистров направления 22.04.01 профилей “Прикладное материаловедение” и “Металловедение и термическая обработка металлов” Могут быть использованы студентами других металлургических и машиностроительных специальностей, а также исследователями. Методические указания составлены совместно с к.т.н. Георгиаду М.В.

Составитель:

В.И. Алимов, проф., д.т.н.

Ответственный за выпуск

Н.Т. Егоров, доц., к.т.н.

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

1. Комплексная термовременная обработка жидкого металла с наложением колебаний и параметры её режима.....
 2. Рост зерна аустенита при нагреве с комплексным воздействием.....
 3. Диффузионное превращение переохлаждённого аустенита при комплексном воздействии.....
 4. Влияние закалки с магнитным воздействием на структуру и твёрдость предварительно деформированной стали.....
 5. Влияние отпуска с магнитным воздействием на структуру и твёрдость закалённой предварительно деформированной стали.....
 6. Влияние комплексного упрочнения с радиационным воздействием на структуру и твёрдость стали.....
 7. Влияние комплексного ударного воздействия на структуру и твёрдость стали
 8. Статистическая обработка результатов исследований методом непараметрических критериев.....
- Рекомендуемые источники информации.....

1. КОМПЛЕКСНАЯ ТЕРМОВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА С НАЛОЖЕНИЕМ КОЛЕБАНИЙ И ПАРАМЕТРЫ ЕЁ РЕЖИМА

1.1 Теоретическая часть

Термическая обработка – процесс и технология теплового воздействия на металлы и сплавы с целью создания заданных свойств. Чаще всего понимают как упрочняющую термическую обработку, но она многоплановая.

Комплексное упрочнение – процесс и технология комбинированного воздействия на материалы, включающее тепловое и иное воздействие для получения предельно допустимых изменений структуры и свойств.

Технология комплексного упрочнения принято, как и технологии термической обработки, представлять в двух вариантах – графически и словесно.

Графический режим – это график с соответствующими пояснениями, используется в исследованиях, при проектировании поисковых технологий – это наглядная схема проектируемого участка комплексного упрочнения.

Описательный (словесный) способ используется в технических картах, является конкретным руководством к действию исполнителю.

На рисунке 1.1 приведен графический режим термической обработки высоколегированной стали по которому можно определить параметры комплексного упрочнения.

В понятие параметры режима термической обработки входят:

- скорость подогрева (V_{H_1});
- температура подогрева ($T_{под}$);

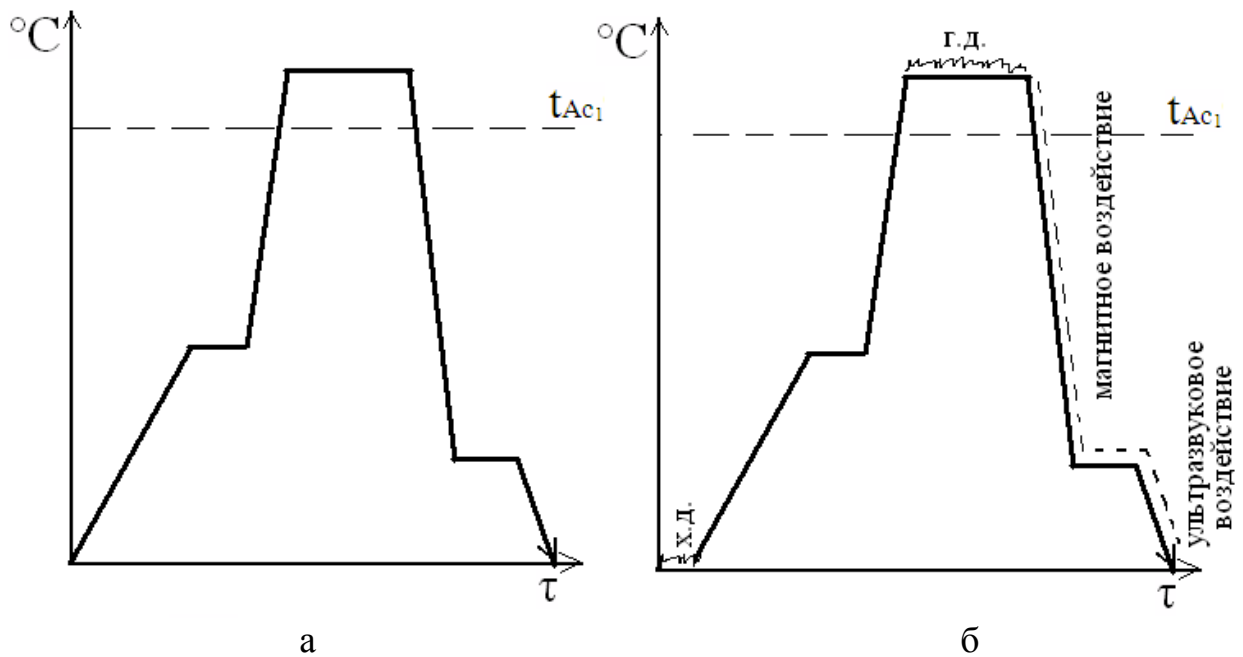


Рис. 1.1 – Графический режим термической обработки (а) и комплексного упрочнения (б) инструмента из высоколегированной стали

- длительность выдержки при подогреве ($\tau_{под}$);
- скорость окончательного подогрева ($V_{Н2}$);
- температура нагрева с допустимыми пределами ($T_{н} \pm \Delta T$);
- скорость охлаждения до температур изотермической выдержки ($V_{охл}$);
- температура изотермической выдержки ($T_{из}$);
- длительность изотермической выдержки ($\tau_{из}$);
- скорость охлаждения на заключительном этапе выдержки ($V_{охл1}$).

В понятие параметры режима комплексного упрочнения входят: скорость подогрева ($V_{Н1}$); температура подогрева ($T_{под}$); длительность выдержки при подогреве ($\tau_{под}$); скорость окончательного подогрева ($V_{Н2}$); температура нагрева с допустимыми пределами ($T_{н} \pm \Delta T$); скорость охлаждения до температур изотермической выдержки ($V_{охл}$); температура изотермической выдержки ($T_{из}$); длительность изотермической выдержки ($\tau_{из}$); скорость охлаждения на заключительном этапе выдержки ($V_{охл1}$). Отличие от режима термической обработки заключается в различных количественных значениях.

Для комплексного упрочнения характерны специфические параметры:

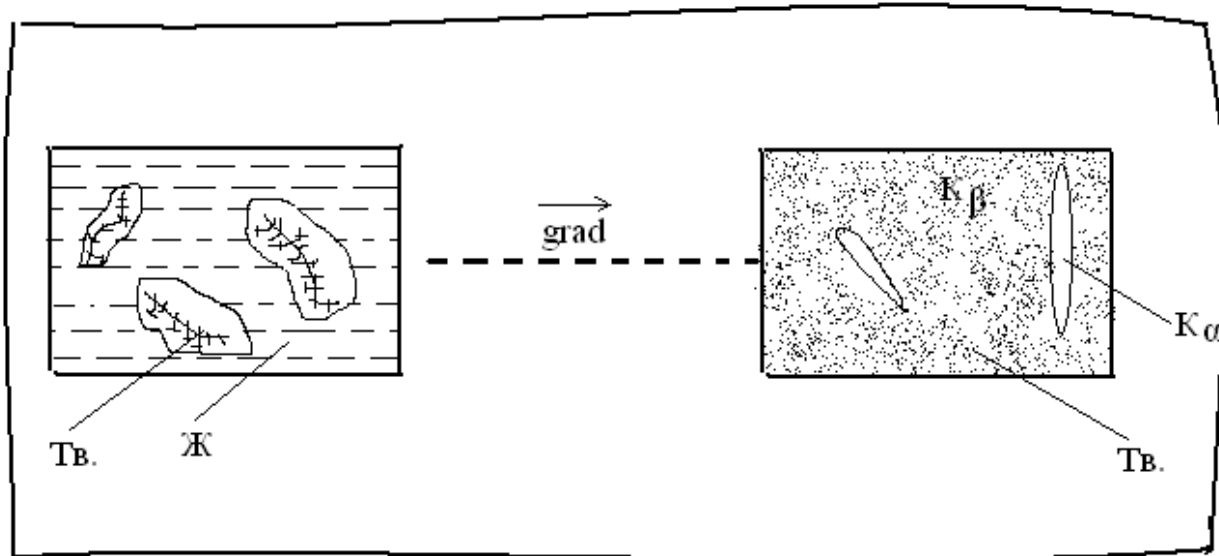
- холодная деформация ($T, \tau, \tau_{пауз}, \epsilon_r, \epsilon_{\Sigma}, \dot{\epsilon}$);
- горячая деформация ($T, \tau, \tau_{пауз}, \epsilon_r, \epsilon_{\Sigma}$);
- магнитное воздействие: напряженность ($H, A/m$), индукция (B), магнитная проницаемость (μ);
- ультразвуковая обработка ($T, \tau, \tau_{сигналов}, частота (f)$).

Наложение колебаний может быть проведено в поле (механическом, электрическом, ультразвуковом, магнитном). Принципиальная схема фрагмента системы с учетом полевых ресурсов представлена на рисунке 1.2.

$Ж \leftrightarrow Тв.$

$К_{\beta} \leftrightarrow К_{\alpha}$

Рис. 1.2 – Принципиальная схема фрагмента системы после



применения технологии комплексного упрочнения

Особенностью применения полей является значительный выигрыш в энергии Гиббса, за счет ΔT , D , ΣX_i . Колебание и наложение поля провоцирует зарождение кристаллов и облегчает протекание твердофазных превращений; меняет диффузионную подвижность атомов; обеспечивает увеличение количества дефектов, определяющих и играющих роль в твердофазных превращениях.

1.2. Контрольные вопросы

1. Как Вы понимаете термин «комплексное упрочнение»?
2. Что входит в понятие режима термической обработки?
3. Что входит в понятие режима комплексной обработки?
4. Объясните, почему при наложении колебаний или других полей меняется кинетика кристаллизации?

2. РОСТ ЗЕРНА АУСТЕНИТА ПРИ НАГРЕВЕ С КОМПЛЕКСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

2.1 Теоретическая часть

Критическими точками называют температуры, при которых в металле или сплаве происходят фазовые превращения – плавление, кристаллизация, выделение и растворение избыточной фазы, эвтектоидный распад твердого раствора и др. Поскольку термическая обработка базируется на внутренних превращениях, происходящих в сплавах в твердом состоянии, знание критических точек обязательно для правильного назначения её режима.

При повышенных скоростях нагрева и охлаждения, применяемых на практике, происходит смещение критических точек в сторону более высоких при нагреве или более низких при охлаждении температур относительно температуры фазового равновесия. Это связано с тем, что превращение перлит ↔ аустенит, выделение и растворение избыточных феррита и цементита в до- и заэвтектоидных сталях являются диффузионными процессами, требуют времени для своего развития, вследствие чего запаздывают из-за быстрого подъема или снижения температуры.

Критическая точка A_{c1} соответствует температуре превращения перлита в аустенит, а A_{r1} – температуре обратного превращения аустенита в перлит.

Критические точки A_{c3} и A_{r3} соответственно характеризуют температуры конца растворения феррита при нагреве и начала его выделения из аустенита при охлаждении. Положение критической точки A_1 мало зависит от скоростей нагрева и охлаждения.

Разность между положением критических точек при нагреве и охлаждении вызывается температурным (тепловым) гистерезисом. Чем выше скорость нагрева или охлаждения, тем сильнее смещаются вверх или вниз критические точки и возрастает температурный гистерезис. Для примера рассмотрим подробнее кинетику превращения в аустенит в эвтектоидной стали (рис. 2.1).

В случае очень медленного нагрева превращение должно происходить при постоянной температуре и минимальном перенагреве относительно точки « A_1 » – пунктирная горизонтальная площадка «ab» на кривой «А». Горизонтальной эта площадка может быть при условии, что все тепло, подводимое извне, будет полностью расходоваться на развитие эндотермического превращения перлита в аустенит.

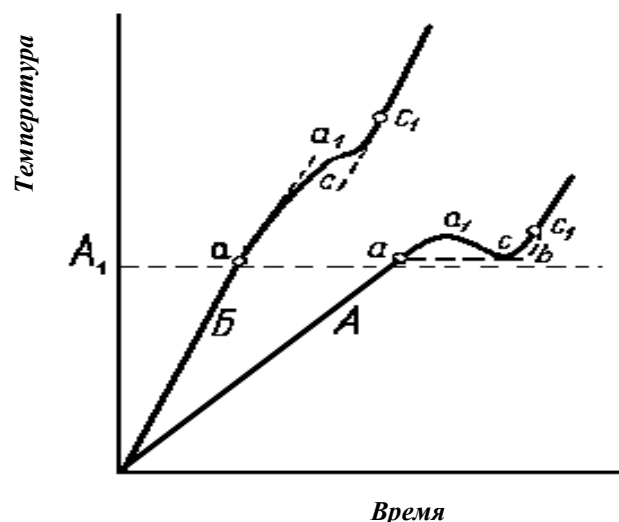


Рисунок 2.1. Схема кривых нагрева эвтектоидной стали: А – медленный нагрев; Б – скоростной нагрев

Однако реальная кривая нагрева имеет седлообразный вид (участок « aa_1cc_1 »). В начальной стадии, когда аустенита образуется немного, количество тепла, поступающего извне, превышает его расход на протекание превращения, поэтому превращение происходит при повышающейся температуре – участок « aa_1 ». По мере увеличения объема образующегося аустенита количество тепла, поглощаемого при превращении, превышает количество поступающего тепла, вследствие чего температура снижается – участок « a_1c ». Когда превращаются последние остатки перлита, процесс снова идет с повышением температуры – участок « cc_1 ».

При повышении скорости нагрева (кривая Б) наблюдаются те же три участка. Отличие состоит в том, что превращение протекает в более широком температурном интервале « ac_1 », а на участке a_1c наблюдается не падение температуры, а только прекращение ее подъема.

Температура образования максимального количества аустенита соответствует участку « a_1c ». Именно эту температуру принято считать критической точкой « Ac_1 ».

Следует отметить, что температура начала превращения перлита в аустенит – точка a – мало зависит от скорости нагрева и обнаруживается при $730-740^{\circ}\text{C}$. Это объясняется легкостью образования зерен аустенита в исходной дисперсной феррито-цементитной смеси.

Положение критических точек для различных марок сталей приводится в справочной литературе, причем данные разных авторов могут несколько отличаться в связи с колебаниями химсостава в пределах марки, а также различными условиями нагрева и охлаждения.

При нагреве стали выше температуры A_1 феррито-цементитная смесь

(перлит) становится термодинамически неустойчивой и превращается в аустенит. Образование аустенита происходит путем возникновения зародышей и их роста. Зародыши аустенита образуются на поверхности раздела цементит-феррит, стыках перлитных колоний, границах перлит – феррит. Вследствие этого в первый момент после окончания превращения зерно аустенита получается очень мелким. Это зерно называется начальным зерном аустенита.

С повышением температуры и увеличением длительности выдержки происходит рост зерна аустенита. Интенсивность роста зерна различна у наследственно мелкозернистых и наследственно крупнозернистых сталей; в первом случае зерно начинает укрупняться при незначительном перегреве относительно критической точки, во втором сохраняется мелким до температур 950-1000 °С и выше, после чего начинает быстро расти.

Для оценки склонности зерна аустенита к росту производят нагрев стальных образцов до такой температуры, при которой в наследственно крупнозернистой стали зерно получается больших размеров, а в наследственно мелкозернистой еще сохраняется мелким (930 + 10°С согласно ГОСТ 5639-82). Зерно полученное в этих стандартных условиях, называется наследственным (природным) зерном аустенита. Следовательно, наследственное зерно характеризует склонность аустенитного зерна данной стали к росту.

Легирующие элементы в большинстве случаев задерживают рост зерна аустенита. Наиболее сильно препятствуют росту зерна титан, цирконий, ванадий. Марганец чаще всего усиливает склонность аустенитного зерна к росту.

Склонность зерна аустенита к росту учитывают при разработке режима термической обработки, а такжековки, сварки и других видов обработки, связанных с нагревом металла.

Действительным зерном аустенита называют зерно, которое получено в данных конкретных условиях нагрева. Размер действительного зерна определяется конечной температурой нагрева изделия или образца, длительностью выдержки и наследственной зернистостью стали.

Действительным (фактическим) зерном стали называется зерно, полученное после охлаждения до комнатной температуры. Его размер связан с размером действительного зерна аустенита: чем мельче зерно аустенита, тем меньшего размера образуются из него зерна феррита и колонии перлита (рис. 2.2).

Действительное зерно стали оказывает большое влияние на её свойства: сталь с мелкозернистой структурой имеет более высокие

механические свойства, особенно пластичность и ударную

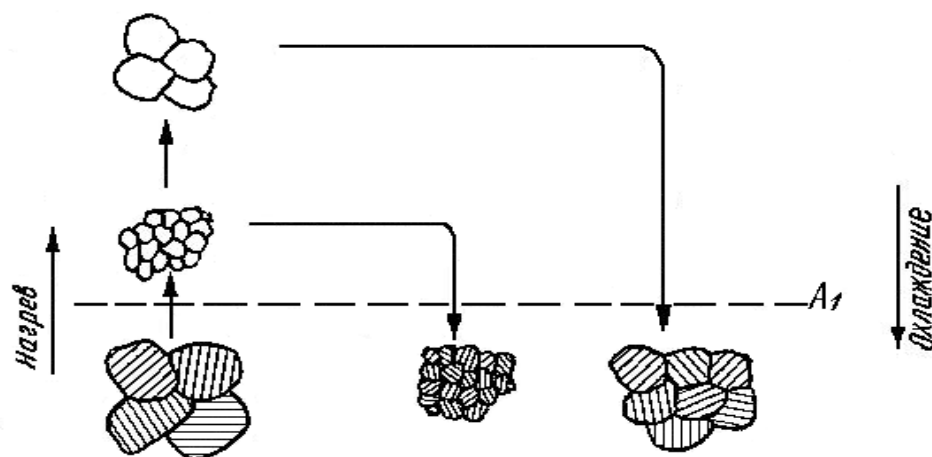


Рисунок 2.2 – Схема изменения размера колоний перлита в зависимости от температуры нагрева в аустенитной области

вязкость, по сравнению с крупнозернистой. Поэтому в большинстве случаев при термической обработке стремятся получить мелкое действительное зерно аустенита. Для этого наследственно крупнозернистые стали необходимо нагревать в узком интервале температур, а наследственно мелкозернистые допускают нагрев в широком температурном интервале, что более удобно в производственных условиях.

Стали, легированные титаном, цирконием и другими элементами, сильно тормозящими рост зерна аустенита, можно подвергать высокотемпературному нагреву (1000 - 1250°С).

Поскольку на практике не всегда возможно использовать монолитный образец для определения критических точек, то проводятся измерения на сборках из проволочных образцов. Для этого изготавливается сборка диам. 18 мм, содержащая отрезки проволоки, неразъемно соединенные между собой в радиальном направлении, промежутки между которыми заполнены сыпучим металлическим порошком, не претерпевающим фазово-структурные превращения в исследуемом интервале температур. Схемы подготовкиборок для измерения критических точек их наглядное изображение показаны на рисунке 2.3 (Методика запатентована – Патент Украины № 90502).

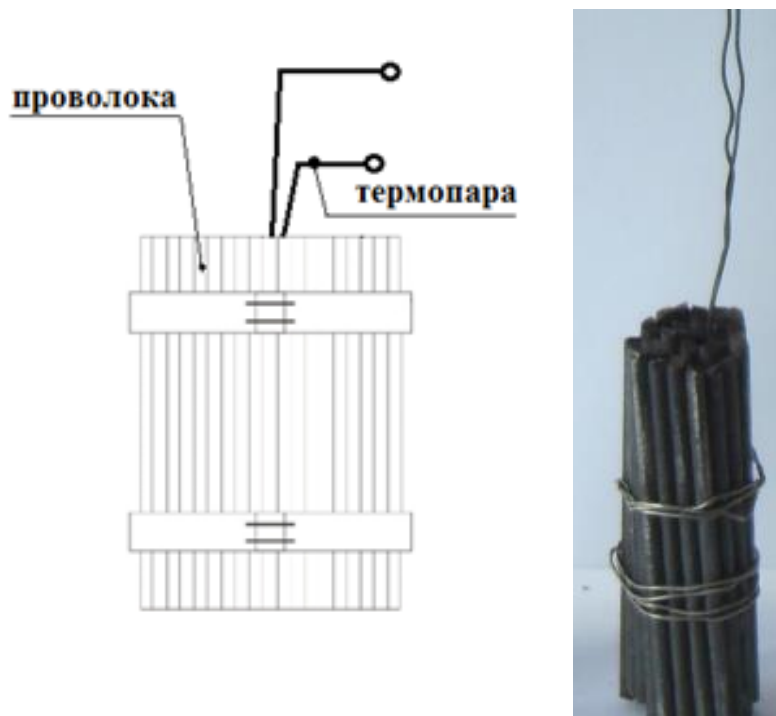


Рисунок 2.3. Схема монтажа образцов для определения критических точек (проволочная сборка) (Патент Украины № 90502)

Внутри квазимонолитных сборок вводится спай хромель-алюмелевой термопары. Выводы термопары соединены с отградуированными гальванометрами (рис. 2.4).

Часть образцов подвергают предварительному намагничиванию. Образцы с термопарой осторожно загружаются в электропечь, предварительно нагретую до 600 - 650°C. Затем электропечь включается, образец в ней прогревается. Когда температура образца достигнет 600°C, через каждые 30 секунд производят запись показаний гальванометра. Нагрев продолжают

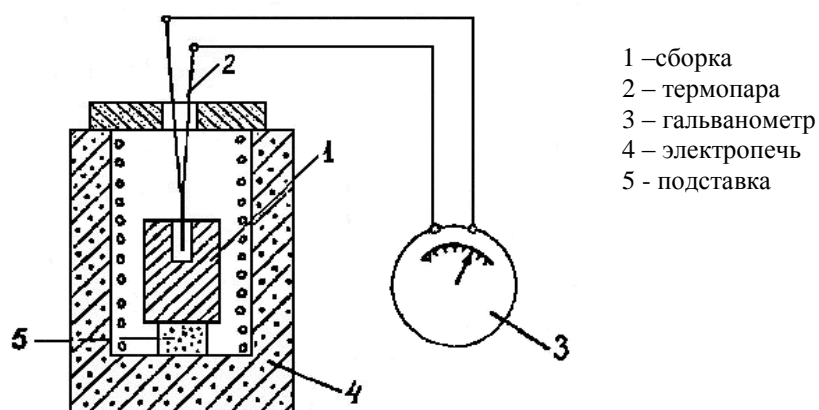


Рисунок 2.4. Схема установки для определения критических точек стали

после достижения образцом температуры 750 °С и вплоть до 950 °С. После этого образец охлаждается вместе с печью. Во время охлаждения также записываются показания гальванометра через определенные промежутки времени (30 - 60 с).

По полученным при выполнении работы данным строятся кривые нагрева и охлаждения в координатах «температура-время». На кривых обнаруживаются критические точки A_{c1} и A_{r1} в виде температурных остановок-площадок.

Работу по определению величины зерна аустенита выполняют на тех же проволочных образцах из стали близкой к эвтектоидной с различной исходной степенью предварительной холодной деформации. Размер зерна аустенита выявляется согласно ГОСТ 5639-82 методом сетки феррита. Определение размеров зерна производится путем сравнения со стандартной десятибалльной шкалой.

Метод сетки феррита основан на том, что при медленном охлаждении образцов в критическом интервале температур по границам зерен аустенита выделяется феррит, образующий сетку. Эта сетка и фиксирует размеры зерен аустенита, которые были в стали при заданной температуре нагрева.

Образец берут нешлифованным и после нагрева охлаждают со скоростью 50 – 100 °С/час. После термической обработки изготавливают микрошлифы обычным способом, подвергают травлению 2 – 4 %-ным раствором азотной кислоты в спирте и изучают под микроскопом при 100 – кратном увеличении.

Для изучения зависимости изменения величины зерна аустенита стали от степени исходной холодной пластической деформации берут разную степень деформации (0, 27, 75 %), определяют критические точки и продолжают нагрев до 950 °С, при охлаждении определяют критическую точку A_{r1} . Затем определяют размер зерна аустенита.

Для определения размеров зерна существует несколько способов. Наиболее простой и распространенный – визуальное сравнение видимых под микроскопом при увеличении в 100 раз зерен с эталонными изображениями шкал (ГОСТ 5639). Эталонные изображения составлены таким образом, что выполняется соотношение:

$$n = 8 \cdot 2^N,$$

где n - число зерен, помещающихся на площади 1 мм^2 ;
 N - номер зерна.

Эталонная шкала десятибалльная. Если размер зерна выходит за пределы номеров 1 - 10 шкалы, применяют другие увеличения и пользуются дополнительными шкалами. Если имеются зерна 2 или более номеров, указывают ориентировочно площадь, занимаемую зернами каждого из этих номеров.

Зерно аустенита номером 1 - 4 принято считать крупным, а номеров 5 - 10 – мелким.

Применяются также методы подсчета зерен, подсчета пересечения границ зерен, измерения длин хорд.

2.2. Контрольные вопросы

1. Как определить критические точки для проволочных, ленточных или пластинчатых образцов?
2. Каковы условия и механизм превращения перлита в аустенит?
3. Какие методы существуют для определения размеров аустенитного зерна?

3. ДИФфуЗИОННОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ ПЕРЕОХЛАЖДЁННОГО АУСТЕНИТА ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

3.1. Изотермический распад аустенита

При охлаждении стали ниже температуры A_1 аустенит становится термодинамически неустойчивым и распадается на феррито-цементитную смесь. Распад может происходить при непрерывном охлаждении (с печью, на воздухе и т.д.) или в изотермических условиях, то есть при постоянной температуре.

Чтобы произошел изотермический распад аустенита, необходимо нагреть сталь для получения однородной аустенитной структуры, а затем быстро перенести образец (или изделие) в соляную ванну, имеющую заданную температуру распада, и выдержать в ней определенное время. Во время этой изотермической выдержки и будет происходить распад аустенита. После его окончания охлаждение производится на воздухе.

Изучение процессов, происходящих в аустените при разных температурах переохлаждения относительно A_1 , привело к созданию диаграмм изотермического распада аустенита (С-образных кривых).

На рисунке 3.1 представлена диаграмма изотермического распада аустенита эвтектоидной стали. Выше линии A_1 находится температурная область устойчивого аустенита. Линия 1 показывает время начала распада аустенита: левее от нее располагается область переохлажденного метастабильного аустенита.

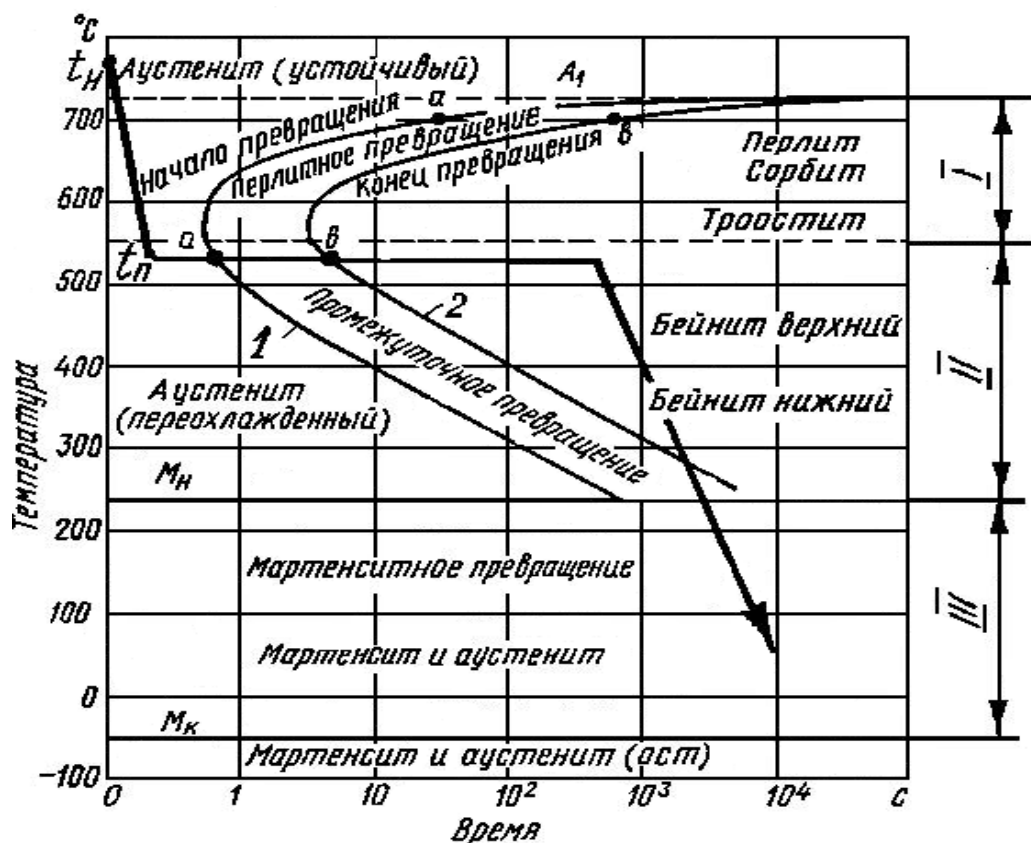


Рисунок 3.1 – Диаграмма изотермического распада аустенита эвтектоидной стали

Линия 2 соответствует окончанию распада аустенита: правее от нее – область существования феррито-цементитной смеси. Горизонтальные линии Мн и Мк – температуры начала и конца мартенситного превращения.

Если образец, нагретый до температуры t_n (рис. 3.1), перенести в ванну с температурой t_n , то переохлажденный аустенит сохраняется до момента а (инкубационный период), после чего начинается его распад. Заканчивается распад в момент б; при дальнейшей выдержке и охлаждении полученная феррито-цементитная смесь сохраняется без изменения.

Строение и свойства получаемых структур сильно зависит от температуры распада аустенита. По этим признакам диаграмма изотермического распада делится на 3 температурных области: 1 – перлитную ($A_1 - 550$ °С), 2 – промежуточную или бейнитную (550 - Мн) и 3 – мартенситную (Мн – Мк).

Превращение в перлитной области диффузионное: из аустенита с содержанием углерода 0,8 % образуется смесь феррита (углерода менее 0,02 %) и цементита (углерода 6,67 %). Строение смеси - пластинчатое (рис. 3.2).

Рисунок 3.2 – Перлит, х 400



С понижением температуры переохлаждения строение феррито-цементитной смеси становится более дисперсным (перлит – сорбит – тростит), прочность и твёрдость стали возрастают.

Микроструктура перлита показана на рисунке 3.2. Сорбит в оптическом микроскопе выглядит как темные зёрна различного оттенка, пластинчатое строение его заметно лишь в отдельных зёрнах. Строение

тросита в оптическом микроскопе не дифференцируется, он имеет вид сплошного чёрного поля. При наблюдении в электронном микроскопе чётко обнаруживается пластинчатое строение троостита.

Твёрдость стали со структурами, получающимися при разных температурах распада, показана в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Твёрдость эвтектоидной стали в зависимости от её структуры

Микроструктура стали	Твёрдость, НВ
Аустенит	180-200
Крупнопластинчатый перлит	180-200
Мелкопластинчатый перлит	220-240
Сорбит закалки	280-320
Тростит закалки	400-450
Верхний бейнит	450-500
Нижний бейнит	500-550
Мартенсит	600-650

В мартенситной области при температуре ниже M_n диффузия атомов углерода и самодиффузия атомов железа практически не имеют места, поэтому мартенситное превращение носит бездиффузионный характер.

Оно состоит в перестройке кристаллической решетки железа $\gamma \rightarrow \alpha$ путём группового сдвига атомов по определённым кристаллографическим плоскостям аустенита, в следствии чего кристаллы образующейся новой фазы имеют форму пластин, а на шлифе – игл (рис.3.3). Углерод остаётся в решетке Fe_α на тех же местах, где он располагался в Fe_γ . при этом количества углерода превышает его придельную растворимость в Fe_α , равную 0,02%.



Рисунок 3.3 – Мартенсит, x 400

Получаемая структура, называется мартенситом, представляет собой пересыщенный раствор твёрдый углерода в α -железе. Кристаллическая решетка мартенсита – тетрагональная. Мартенсит отличается наивысшей твёрдостью. В следствие сильных внутренних напряжений он очень хрупок.

При температурах промежуточной области скорость диффузии углерода значительна, в следствие чего продукты распада аустенита представляют собой феррито-цементитные смеси, как и в перлитной области. Самодиффузия атомов железа заторможена, превращение идёт по сдвиговому механизму, отчего продукты распада имеют игольчатое строение, как мартенсит. Структура, получающаяся в промежуточной области, называется бейнитом. Верхний бейнит имеет перистое строение, нижний – игольчатое. Твёрдость стали с бейнитной структурой высокая (табл. 3.1)

Таким образом, изменяя условия распада аустенита, можно получать сталь с различной структурой и соответственно свойствами, что и используется на практике термической обработки.

Диаграммы для до- и заэвтектоидных сталей отличаются от диаграммы для эвтектоидной стали наличием области, к которой происходит выделение феррита, если сталь доэвтектоидная (рис. 3.4), или цементита, если сталь заэвтектоидная.



Рисунок 3.4 – Диаграмма изотермического распада аустенита доэвтектоидной стали

3.2. Контрольные вопросы

1. Каковы термодинамические условия превращения аустенита в феррито-цементитную смесь?
2. Как практически выполняется изотермический распад аустенита?
3. Какие линии имеются на диаграмме изотермического распада аустенита эвтектоидной стали и что они обозначают?
4. В чем сущность и каковы характерные черты перлитного превращения?
5. Какие наблюдаются различия в строении и свойствах перлита, сорбита и троостита?
6. Каковы особенности превращения в промежуточной (бейнитной) области? Получаемые структуры и свойства стали.
7. Что называется мартенситом? Каковы условия его образования, строение и свойства?
8. Как изменяются свойства продуктов превращения аустенита с понижением температуры распада?
9. Какое значение имеют диаграммы изотермического распада аустенита?
10. Можно ли использовать диаграммы изотермического распада аустенита для анализа превращений, происходящих при непрерывном охлаждении?
11. В чем сущность структурно-твердостного метода построения диаграмм?
12. Руководствуясь какими соображениями назначается длительность изотермической выдержки при выполнении данной работы?
13. Как выглядят под микроскопом перлит, сорбит и троостит?
14. Как выглядит под микроскопом бейнит (верхний и нижний) и мартенсит? Как их можно отличить друг от друга?
15. Как производится измерение твердости по шкале А прибора Роквелла?

4. ВЛИЯНИЕ ЗАКАЛКИ С МАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ

4.1 Закалка и ее влияние на структуру и свойства стали

Закалкой называется операция термической обработки, при которой производится нагрев доэвтектоидных сталей до температур на 30-50 °С выше критической точки A_{c3} , заэвтектоидных сталей – на 30-50 °С выше A_{c1} , выдержка и охлаждение со скоростью выше критической. Цель закалки – придать стали высокую твердость и прочность.

Таким образом, температура закалки зависит от состава стали. Для углеродистых сталей ее можно определить по диаграмме железо-углерод (рис. 4.1).

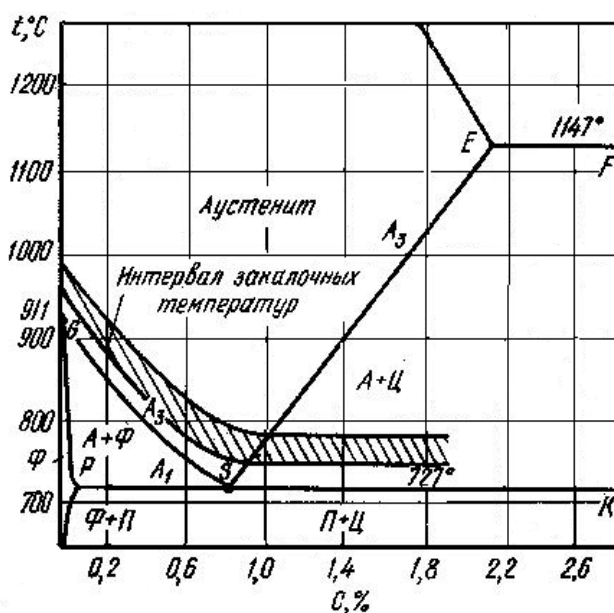


Рис. 4.1 – Интервал температур закалки углеродистых сталей

В качестве охлаждающих сред при закалке используются вода, водные растворы солей и щелочей, минеральное масло. В ряде случаев применяются расплавленные соли и щелочи. Для углеродистых и некоторых низколегированных сталей применяется вода, для легированных сталей, обладающих меньшей критической скоростью закалки, в качестве охлаждающей среды используется масло. Охлаждение в расплавленных солях и щелочах производится при ступенчатой и изотермической закалке.

При нагреве сталей выше верхней критической точки происходит полная фазовая перекристаллизация; образующийся аустенит при

последующем охлаждении со скоростью выше критической превращается в мартенсит (рис. 4.2, а).

В случае нагрева доэвтектоидной стали ниже критической точки A_{c3} структура после закалки будет состоять из мартенсита и феррита (рис. 4.2, б). Такая закалка называется неполной. Феррит, обладая низкой твердостью, понижает твердость закаленной стали, поэтому неполная закалка для доэвтектоидных сталей обычно не применяется.

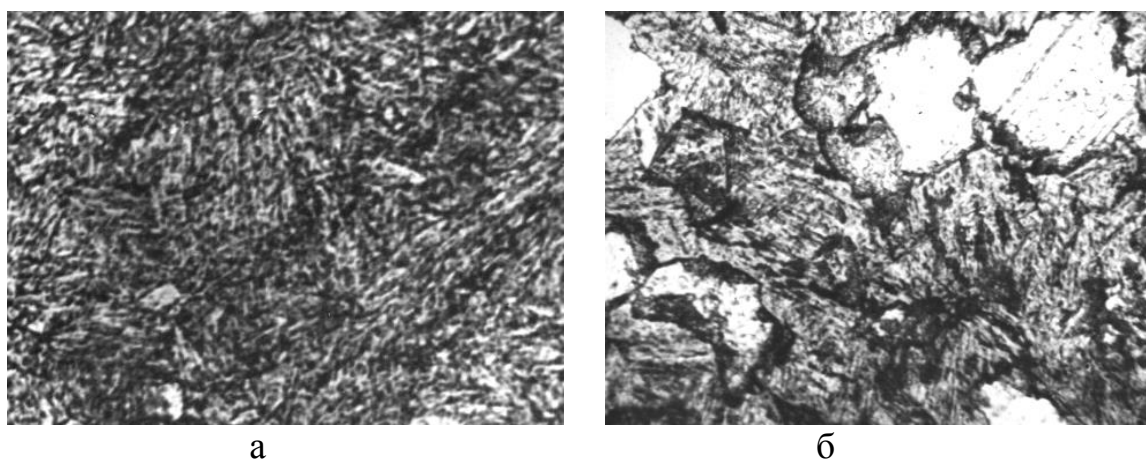


Рис. 4.2 – Микроструктура доэвтектоидной стали после закалки, $\times 400$: а – полная закалка, мартенсит; б – неполная закалка, мартенсит + феррит

Заэвтектоидные стали подвергают по существу неполной закалке. Наряду с мартенситом, в структуре закаленной заэвтектоидной стали присутствует вторичный цементит (рис. 4.3). Цементит имеет очень высокую твердость, поэтому способствует повышению твердости и износостойкости стали.

Размер мартенситных кристаллов зависит от величины зерна аустенита. При перегреве стали относительно нормальной температуры закалки зерна аустенита вырастают до значительных размеров, вследствие чего получается крупноигльчатый мартенсит (рис. 4.4). Сталь с такой структурой обладает повышенной хрупкостью.

Кроме мартенсита, в структуре закаленной стали имеется остаточный аустенит, количество которого увеличивается с повышением содержания углерода в стали. Увеличению количества остаточного аустенита способствуют также легирование стали и перегрев при закалке. На рис. 4.4 остаточный аустенит наблюдается в виде светлых полей между иглами мартенсита.

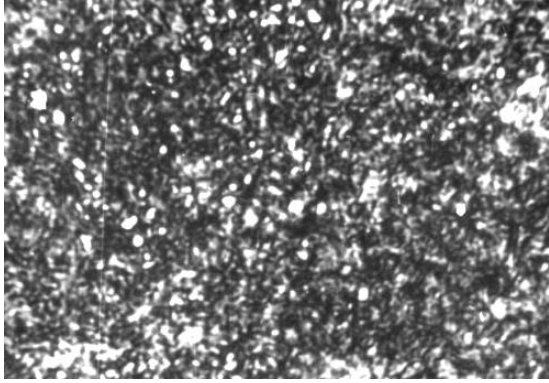


Рис. 4.3 – Микроструктура заэвтектоидной стали после закалки: мартенсит и вторичный цементит, х 400

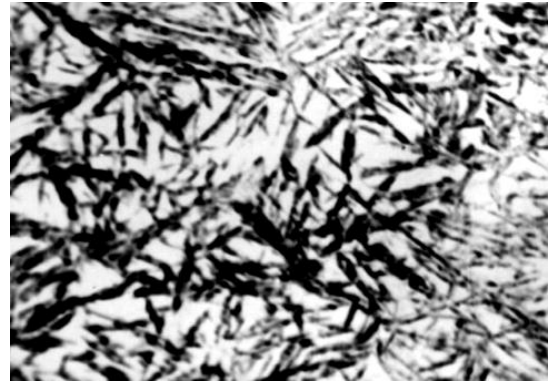


Рис. 4.4 - Микроструктура перегретой при закалке стали: крупноигольчатый мартенсит, х 400

Способность стали к повышению твердости при закалке называется закаливаемостью – это одна из важных характеристик стали. Закаливаемость определяется содержанием углерода, т.к. от него зависит твердость мартенсита (рис. 4.5). Увеличение содержания углерода до 0,6-0,8 % приводит к резкому повышению твердости закаленной стали.

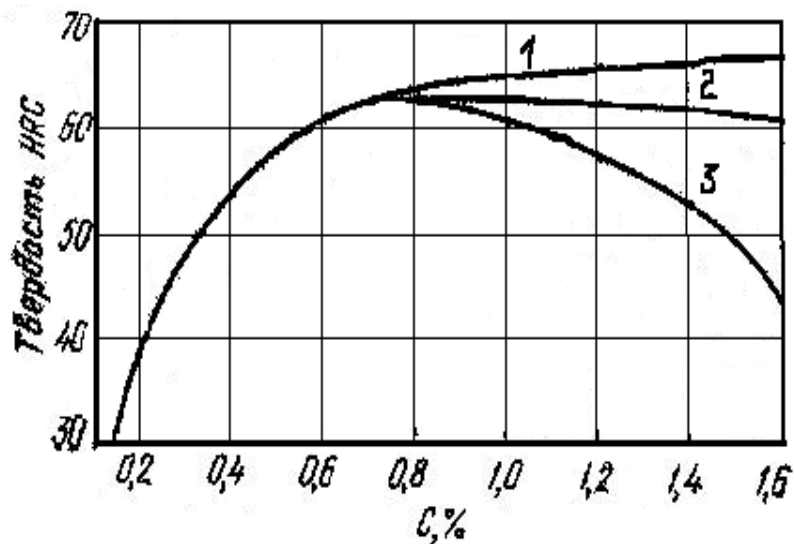


Рис.4.5 – Влияние содержания углерода на твердость мартенсита (1) и закаленной стали, нагретой выше A_{c1} (2) и выше A_{cm} (3)

При дальнейшем увеличении содержания углерода твердость повышается незначительно, если закалка производится от температур выше

критической точки A_{c1} , либо снижается, если нагрев производится выше A_{cm} . Это объясняется наличием в структуре остаточного аустенита и увеличением его количества при

повышении содержания углерода в стали и повышении температуры закалки.

Нагрев заэвтектоидных сталей выше A_{cm} , т.е. перегрев относительно оптимальной температуры закалки, кроме снижения твердости, приводит к другим нежелательным последствиям, получается крупноигльчатый мартенсит, увеличивается коробление и способность появления трещин.

Различают закалку объемную и поверхностную. В данной работе рассматриваются способы объемной закалки. При выборе способа закалки учитывают форму, размеры изделия, состав стали и предъявляемые к изделию требования.

Закалка в одном охладителе (непрерывная закалка). Имеет наиболее широкое применение. После нагрева и соответствующей выдержки изделие погружают в охлаждающую среду до полного охлаждения.

Если изделия сложной формы, при необходимости уменьшить внутренние напряжения и деформацию их применяют другие способы закалки.

Прерывистая закалка (закалка в двух средах). Вначале изделие охлаждают в воде до температур несколько выше M_n (300-400 °C), а затем переносят в среду с меньшей охлаждающей способностью (масло, режущий воздух). В результате замедленного охлаждения в температурном интервале мартенситного превращения получаются значительно меньшие внутренние напряжения по сравнению с непрерывной закалкой.

Закалка с подстуживанием. Нагретое в печи изделие перед погружением в закалочную среду некоторое время охлаждается на воздухе. При подстуживании распад аустенита не должен начаться. Применяется при закалке штампов, цементованных деталей и в других случаях.

Ступенчатая закалка. После нагрева до температуры закалки изделие охлаждают в среде, имеющей температуру выше точки M_n , и выдерживают некоторое время с целью выравнивания температуры по сечению. Длительность выдержки должна быть такая, чтобы не начался распад аустенита. Мартенситное превращение протекает при последующем сравнительно медленном охлаждении на воздухе, что дает малые внутренние напряжения и уменьшает опасность образования трещин.

Изотермическая закалка. Закалка по этому способу выполняется в основном так же, как ступенчатая закалка, но предусматривает более длительную выдержку при температуре выше точки M_n . Во время

изотермической выдержки происходит распад аустенита с образованием бейнита. При изотермической закалке получаются минимальные внутренние напряжения и практически отсутствует деформация.

Закалка с самоотпуском. Применяется для инструмента и деталей, которые работают с ударными нагрузками и должны сочетать высокую твердость на поверхности или в рабочей части с повышенной вязкостью в сердцевине или хвостовой (крепежной) части. Нагретое до температуры закалки изделие выдерживают в закалочной среде, но не до полного охлаждения. Охлаждение прерывают, когда сердцевина сохраняет еще достаточное количество тепла, за счет которого происходит нагрев и отпуск (самоотпуск) закаленных участков изделия.

Закалка с обработкой холодом. Применяется для уменьшения количества остаточного аустенита. Состоит в том, что изделие непосредственно после закалки охлаждают до отрицательных температур. В результате достижения температуры конца мартенситного превращения M_c аустенит дополнительно превращается в мартенсит.

4.2. Контрольные вопросы

1. Что называется закалкой, ее назначение?
2. С какой скоростью необходимо производить охлаждение, чтобы закалить сталь? Назвать охлаждающие среды, используемые при закалке.
3. Указать температуры закалки доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей.
4. Что понимают под неполной закалкой?
5. Почему не рекомендуется производить закалку заэвтектоидных сталей от температур выше A_{c_m} ?
6. Как осуществляется непрерывная закалка?
7. В чем состоит сущность прерывистой закалки?
8. Указать сущность ступенчатой закалки
9. Указать сущность изотермической закалки.
10. В каких случаях применяется закалка с самоотпуском, в чем она состоит?
11. Для чего применяется обработка холодом?
12. Какую структуру имеет доэвтектоидная сталь после полной и неполной закалки?
13. Какую структуру должна иметь заэвтектоидная сталь после

закалки?

14. Как сказывается перегрев на микроструктуре закаленной стали?
15. От чего зависит количество остаточного аустенита?
16. Что называется закаливаемостью, от чего она зависит?
17. Какие виды брака возможны при закалке, их причины и меры по устранению?

5. ВЛИЯНИЕ ОТПУСКА С МАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ ЗАКАЛЕННОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ

5.1 Превращения в закаленной, предварительно деформированной стали при нагреве (отпуске)

В большинстве случаев закалка не является окончательной операцией термической обработки, т.к. закаленная сталь при высокой твердости обладает повышенной склонностью к хрупкому разрушению и находится в напряженном состоянии. Заключительной операцией термической обработки является отпуск. Он служит для придания стали необходимых структуры и свойств, а также для снижения внутренних напряжений.

Отпуском называется нагрев закаленной стали до температур ниже A_{c1} и выдержка при температуре нагрева. Охлаждение производится обычно на воздухе.

Структура закаленной стали, состоящая из мартенсита и остаточного аустенита, неравновесная. При нагреве (отпуске) протекают процессы, приближающие сталь к равновесному, устойчивому состоянию. Принято выделять четыре температурных интервала и соответствующие им четыре превращения при отпуске. Это деление условно, но в некоторой мере отражает последовательность фазовых и структурных изменений, происходящих в закаленной стали при нагреве.

Первое превращение при отпуске относят к интервалу температур до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этих температурах протекает 1-я стадия распада мартенсита. На этой стадии происходит выделение значительной части углерода из пересыщенного α -твердого раствора путем двухфазного распада последнего с образованием метастабильного промежуточного карбида. Двухфазный характер распада состоит в том, что в стали одновременно существуют два твердых раствора углерода в α -железе: не испытавший распада твердый раствор с исходной концентрацией углерода и твердый раствор, обедненный углеродом вследствие выделения частиц карбидной фазы.

В области температур первого превращения образуется карбид Fe_xC , который по своей природе отличается от стабильного карбида железа-цементита типом кристаллической решетки, химическим составом. В отличие от цементита промежуточную карбидную фазу обозначают ε -карбид. ε -карбид выделяется в виде очень дисперсных частиц пластинчатой формы, когерентных (сопряженных) с решеткой твердого раствора.

Образующаяся на 1-й стадии распада мартенсита смесь обедненного

углеродом α -твердого раствора и частиц ε -карбида называется мартенситом отпуска.

По мере развития процесса отпуска в интервале температур первого превращения увеличивается количество участков (объемов) обедненного углеродом α -твердого раствора. Средняя концентрация углерода в твердом растворе к концу первого превращения составляет около 0,25%. Это значительно меньше исходной концентрации, но во много раз превосходит равновесное содержание углерода в α -железе.

В температурном интервале 200-300 °С имеет место второе превращение при отпуске. Оно заключается в том, что остаточный аустенит превращается в отпущенный мартенсит. Это превращение диффузионное и по своей природе подобно бейнитному превращению переохлажденного аустенита.

Одновременно продолжается дальнейшее выделение углерода из пересыщенного α -твердого раствора – 2-я стадия распада мартенсита. Выделение углерода, появление новых и рост ранее образовавшихся частиц ε -карбида происходит обычным диффузионным путем – переносом атомов углерода через α -твердый раствор. При первом и втором превращении происходит снятие части внутренних напряжений, уменьшается хрупкость стали.

В интервале температур 300-400 °С протекает третье превращение при отпуске, объединяющее ряд процессов. Заканчивается выделение избыточного углерода из твердого раствора, т.е. завершается 2-я стадия распада мартенсита. Нарушается когерентность между твердым раствором и карбидной фазой, и обособившийся карбид превращается в цементит. Одновременно с этим идут процессы возврата и рекристаллизации в наклепанной α -фазе и интенсивно снижаются внутренние напряжения. После третьего превращения структура стали представляет собой феррито-цементитную смесь.

При нагреве выше 400 °С вплоть до критической точки A_{c1} идет четвертое превращение при отпуске, характерной особенностью которого является коагуляция цементитных кристаллов. Более мелкие частицы растворяются, а более крупные растут. Одновременно преобразуется форма цементитных выделений из пластинчатой в округлую, этот процесс называется сфероидизацией. Коагуляция и сфероидизация имеют место и на более ранних стадиях отпуска, но интенсивное развитие эти процессы получают при нагреве выше 350 - 400 °С, когда достаточно высока диффузионная подвижность атомов углерода. Кроме того, в интервале температур четвертого превращения завершаются рекристаллизация ферритной основы и снятие внутренних напряжений.

Температурный интервал того или иного превращения зависит от скорости нагрева, увеличение которой приводит к повышению температур превращения. Указанные температурные интервалы относятся к отпуску углеродистых сталей при медленном нагреве.

На превращение в закаленной стали при нагреве оказывает влияние легирование. Легирующие элементы задерживают процессы при отпуске, смещают их в сторону более высоких температур. Это может привести к существенному различию структуры и свойств углеродистых и легированных сталей, отпущенных в одинаковых условиях. Кроме того, легирование может вызвать дополнительные процессы и явления, не наблюдаемые в углеродистых сталях (дисперсионное твердение, отпускную хрупкость).

Мартенсит отпуска, как и мартенсит закалки, имеет игольчатую структуру (рис. 5.1), но отличается более сильной травимостью и выглядит темнее.

Получаемые при отпуске феррито-цементитные смеси называются так же, как и продукты распада переохлажденного аустенита – троостит, сорбит, однако отличаются от них тем, что имеют не пластинчатое, а зернистое строение. Карбидная фаза в них (цементит) имеет округлую (зернистую) форму. Дисперсность структуры зависит от температуры отпуска, т.к. она определяет степень развития процесса коагуляции.

После отпуска в интервале температур 350 - 500 °С получается наиболее дисперсная феррито-цементитная смесь – тростит отпуска (рис. 5.2).

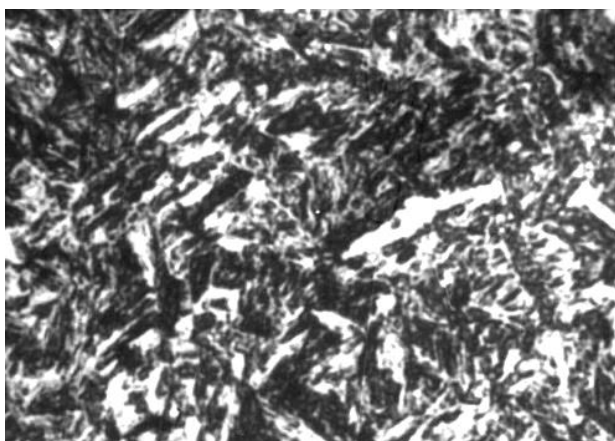


Рисунок 5.1 – Мартенсит отпуска, х 500

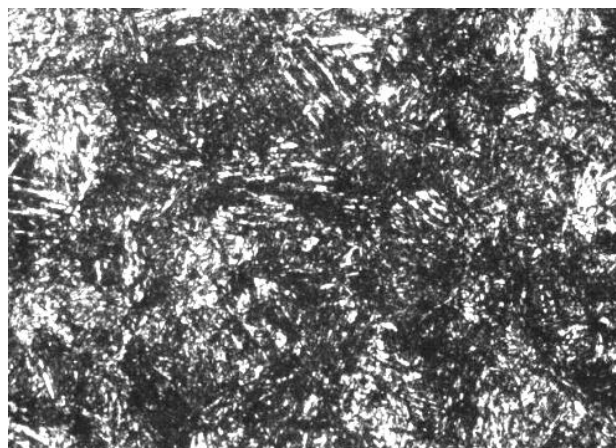


Рисунок 5.2 – Тростит отпуска, х 500

Благодаря сильной травимости в оптическом микроскопе он имеет вид темного поля. Рассмотреть строение тростита отпуска можно только с помощью электронного микроскопа при очень больших увеличениях

Сорбит отпуска (рис. 5.3) образуется после нагрева закаленной стали до температур 500-650 °С. Его строение различимо при сравнительно небольших увеличениях – в 500 раз и более.

Отпуск при температурах, близких к A_{c1} , приводит к образованию наиболее грубой феррито-цементитной смеси – перлита (рис.5.4), который благодаря его строению называется зернистым.



Рисунок 5.3 – Сорбит отпуска, х
500



Рисунок 5.4 – Зернистый перлит,
х 500

Отпуск вызывает изменение механических свойств закаленных сталей (рис. 5.5) при нагреве до 200 °С твердость и прочность сталей практически не изменяются, снижается их хрупкость.

Дальнейшее повышение температуры отпуска приводит к падению твердости и прочности, а пластичность и ударная вязкость при этом повышаются. Наиболее высокие показатели пластичности и ударной вязкости при повышенной прочности приобретают стали после отпуска при температурах 600-650 °С.

Указанный характер изменения механических свойств является общей тенденцией, в случае высокоуглеродистых и легированных сталей наблюдаются некоторые отклонения.

Важнейшими параметрами, определяющими структуру и свойства отпущенной стали, являются температура и длительность отпуска. По температуре нагрева различают три вида отпуска: низкий, средний и высокий.

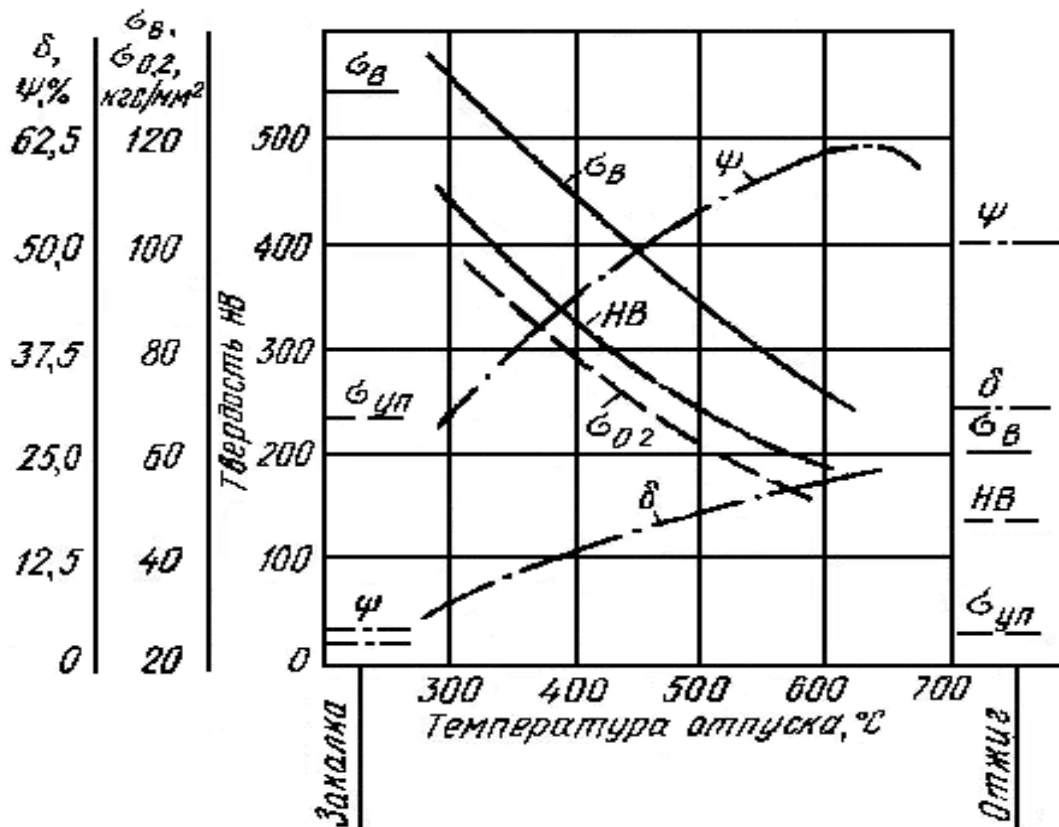


Рисунок 5.5 – Изменение механических свойств стали 40 в зависимости от температуры отпуска

Низкий отпуск – до 250 °С. Применяется для снижения внутренних напряжений и уменьшения хрупкости при сохранении высокой твердости. Получаемая структура – мартенсит отпуска.

Низкому отпуску подвергают режущий и измерительный инструмент, штампы холодной штамповки, детали после поверхностной закалки цементации, цианирования.

Средний отпуск – 350-500 °С. Применяется в основном для пружин и рессор, когда необходимо обеспечить высокие упругие свойства в сочетании с достаточно высокой прочностью и вязкостью. Структура после среднего отпуска – троостит отпуска.

Высокий отпуск – 500-650 °С. Структура – сорбит отпуска. Этот отпуск полностью снимает внутренние напряжения, значительно повышает ударную вязкость. Прочность и прочность при этом снижаются, но остаются значительно более высокими, чем в отожженном состоянии. Таким образом, высокий отпуск обеспечивает хорошее сочетание свойств прочности, пластичности и вязкости.

Закалка в сочетании с высоким отпуском называется улучшением. Улучшению подвергают большинство деталей машин: валы, оси, шестерни, втулки и др.

Время выдержки при отпуске должно быть достаточным для завершения превращений и снятия напряжений. Чем выше температура отпуска, тем меньше его длительность, т.к. больше скорость диффузии.

Для изделий небольших сечений выдержка при низком отпуске составляет около 2 ч, при среднем – примерно 1 ч, при высоком – 20-30 мин. С увеличением размеров деталей длительность отпуска возрастает.

5.2 Контрольные вопросы

1. Опишите структурное состояние закаленной стали.
2. Что понимают под отпуском, его назначение?
3. Охарактеризуйте первое превращение при отпуске.
4. Что происходит на 2-й стадии распада мартенсита?
5. В чем состоит второе превращение при отпуске?
6. Какие процессы протекают при третьем превращении?
7. Охарактеризуйте четвертое превращение при отпуске.
8. Какое влияние оказывает скорость нагрева на температурные интервалы превращений при отпуске?
9. Каково влияние легирующих элементов на превращения при отпуске?
10. Что представляет собой мартенсит отпуска?
11. В чем состоит различие феррито-цементитных смесей, полученных при отпуске и при распаде переохлажденного аустенита?
12. При каких температурах образуются троостит отпуска, сорбит отпуска, зернистый перлит?
13. Как изменяются механические свойства закаленной стали при отпуске?
14. Что называется низким отпуском? Какие изделия подвергают низкому отпуску и почему?
15. Охарактеризуйте средний отпуск.
16. Охарактеризуйте высокий отпуск.

6. ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОГО УПРОЧНЕНИЯ С РАДИАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ СТАЛИ

6.1 Структурные изменения в металлах и сплавах при радиационном облучении

Материалы подвергаются радиационному облучению в двух случаях: в процессе эксплуатации и преднамеренно в процессе комплексной термообработки. В том и другом случае возникают радиационные повреждения.

Высокоэнергетическое излучение вызывает в металлических системах следующие процессы:

1. Ионизация;
2. Смещение атомов с занимаемых ими мест в пространственной решетке;
3. Возбуждает колебание атомов без их смещения;
4. Образование термических пиков, т.е. мест значительного перегрева.
5. Образование продуктов ядерной реакции.

Радиационное облучение характеризуется:

- интенсивностью облучения, т.е. количеством частиц, проходящих через 1 см^2 за 1 с ;
- временем действия облучения, т.е. длительностью интегрального потока частиц;
- степенью взаимодействия облучения, которая определяется сечением взаимодействия, которое подразделяется на макро- и микроскопическое.

Любое излучение вызывает образование дефектов в материалах. Действие излучения можно разделить на первичную и вторичную стадии. Первичная стадия протекает при первом непосредственном воздействии облучения, вторичная вызвана эффектами, возникшими при первичной стадии.

При движении нейтрона происходит его столкновение с атомами, находящимися в кристаллической решетке. Упругое взаимодействие происходит на расстоянии порядка 10^{-12} см, при этом атому передается энергия, которая может выбить атом из занимаемого им узла. Неупругое взаимодействие оставляет ядру часть энергии и вылетает из него. В результате ядро переходит в возбужденное состояние и излучает γ -квант энергии, сам атом получает энергию отдачи и может вылететь из своего

постоянного места нахождения. Все эти действия создают дефекты в кристаллической решетке материала.

Основное действие быстрых электронов при соударении с атомами заключается в их смещении из положения равновесия. Энергия электронов значительно меньше энергии нейтронов, поэтому смещаться могут отдельные атомы, в то время как нейтроны вызывают лавинообразное смещение.

Летающие электроны генерируют γ -лучи, поэтому их действие подобно электронному.

Выбитые атомы производят подобное действие и сами начинают вызывать смещение следующих атомов, т.е. происходит вторичное смещение.

Облучение приводит к образованию тепловых пиков, вследствие теплового эффекта может быть выражено расплавлением или испарением металла.

Облучение генерирует точечные дефекты, т.е. вакансии, межузельные атомы.

Формируются также специфические дефекты в виде газовых пузырей, что приводит к газовому распуханию, которое ассоциируется с радиационным распуханием и приводит к взрыву.

Радиация меняет кристаллическую структуру, степень ее совершенства, что имеет проявления на всем комплексе физико-механических и коррозионных свойств.

При увеличении дозы облучения происходит интенсификация электросопротивления. Рост носит немонотонный характер, при сравнительно низких степенях облучения зависимость линейная, при больших - экспоненциальная или логарифмическая.

Для полупроводников, сверхпроводников и изоляторов теплопроводность в большинстве случаев резко снижается. Например при облучении графита его теплопроводность снижается более чем в 50 раз.

При облучении параметры решетки увеличиваются, а следовательно увеличивается и удельный объем кристаллической решетки.

Для изучения радиоактивного излучения используются различные приборы, в том числе радиометр Бета-Гамма излучения РКС-20.03 «Припять».

Дозиметр-радиометр РКС-20.03 «Припять» - электронно-измерительный прибор, предназначенный для индивидуального и коллективного пользования при измерении мощности эквивалентной дозы фонового ионизирующего излучения, плотности потока бета-излучения, удельной активности в жидких и сыпучих веществах.

Источник питания: гальванический элемент типа «Корунд» или внешний источник питания постоянного напряжения от 4,7 до 12 В (Например блок питания «Электроника Д2-10 М»).

Таблица 6.1 - Технические характеристики РКС-20.03 «Припять»

Диапазоны измерений	Значение
Мощность экспозиционной дозы гамма- и рентгеновского излучений	0,01...19,99 мР/ч
Мощность эквивалентной дозы гамма и рентгеновского излучений	0,1...199,9 мкЭв/ч
Плотность потока бета-излучения	10...19999 час/см ² ·мин
Предел допускаемой основной относительной погрешности (гамма/бета)	±20 /±25 %
Рабочая температура окружающего воздуха	-20...+40 °С
Питание	9,0 В
Масса	0,25 кг
Габаритные размеры	145x73x37 мм

У прибора представлена опция измерения мощности потока бета-частиц, для измерения указанного параметра необходимо в режиме «бета» измерить МЭД (гамма), потом снять с задней панели металлическую крышку-фильтр, и измерить мощность потока гамма- и бета-частиц вместе, после чего произвести вычитание вручную.

Также у прибора есть выключатель звукового сигнализатора и кнопка контроля заряда батареи, выводящая на экран значение напряжения батареи питания.

6.2. Контрольные вопросы

1. Какие процессы в металлических системах вызывает высокоэнергетическое излучение?
2. Чем характеризуется радиационное облучение?
3. Как Вы понимаете термин «тепловые пики»?
4. Какие дефекты, производятся облучением?
5. Как влияет радиация на кристаллическую структуру?
6. Как при облучении меняются параметры кристаллической решетки?

7. ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОГО УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ СТАЛИ

7.1. Воздействие ударных волн на металлические сплавы в комплексных технологиях упрочнения

При резком кратковременном увеличении нагрузки больше предела прочности материал не разрушается.

Ударные волны могут быть получены разными способами, например ультразвуковыми колебаниями, импульсным электрическим разрядом, взрывчатыми веществами. Получение ударных волн взрывчатыми веществами – это один из наиболее распространенных источников получения таких волн высокого давления.

В результате взрыва образуются газы с объемом, значительно превышающим их начальный объем (более 1000 раз).

Взрыв – это химическая реакция, связанная с выделением большого количества газов и тепла. В случае если взрыв происходит быстро, то энергия не успевает рассеяться. Развиваемое при этом давление зависит от типа взрывного вещества.

Поведение металла под действием ударных волн характеризуется диаграммами деформации, которые отличаются от обычных ярко выраженными максимумами.

Взрывная обработка, по сути, является высокоскоростной деформацией, так как взрывная волна импульсно передает нагрузку на поверхность упрочняемого изделия. Такая обработка применяется как намеренная, так и побочная при сварке взрывом, резке, штамповке, чеканке.

Высокоскоростная деформация – это результат чрезвычайно быстрого распространения фронта давлений, его амплитуда намного превышает предел текучести материала.

Деформировать и разрушать могут вторичная и отраженная волны.

При ударном нагружении развиваются тепловые процессы. Различают мгновенную и остаточную после снятия нагрузки температуру.

Особенности пластической деформации при ударном нагружении:

1. Зарождение и рост плотности дислокаций происходит при напряжениях больше предела временного сопротивления.
2. Возрастает роль двойникования, происходит множественное скольжение по непараллельным плоскостям.
3. Фазовые превращения диффузионные и бездиффузионные при

ударных нагрузках ускоряются.

Задачи, решаемые комплексного упрочнения ударными волнами:

1. Повышение твердости, прочности.
2. Изменение физико-механических свойств, со значительным уклоном в сторону физических свойств (изменение плотности, электросопротивления, теплопроводности и магнитных свойств).
3. Повышение износостойкости и качества поверхности.

Взрывные волны обеспечивают при химических реакциях увеличение объема порядка 1000 раз по отношению к объему исходных веществ.

Для взрыва характерны две стадии: взрыв и детонация.

Ударная волна имеет некоторые особенности:

1. Скорость движения ударной волны больше скорости звука;
2. На фронте ударной волны параметры состояния и движения меняются скачкообразно;
3. Ударная волна сопровождается перемещением частиц;
4. Скорость ударной волны не зависит от ее интенсивности.

Технологические параметры комплексного упрочнения ударными волнами:

1. Вид взрывчатого вещества;
2. Масса заряда;
3. Дистанция взрыва;
4. Тип передающей среды;
5. Плотность передающей среды.

Оборудование, применяемое для упрочнения ударными волнами, состоит из взрывных камер, бассейнов, разовых экспериментальных емкостей и открытого пространства для крупногабаритных изделий.

Чаще всего упрочнению взрывом подвергают детали дорожных и строительных машин (зубья ковшей экскаваторов, детали дробилок), детали горных машин, детали железнодорожного транспорта (стрелки и крестовины), пустотелые крупногабаритные изделия (валы, колеса).

Упрочнение взрывом имеет ряд преимуществ:

1. Возможность изготовления широкого ассортимента изделий по габаритам;
2. Минимальные затраты на оборудование и инструмент;
3. Возможность изготовления широкого ассортимента изделий по сложности формы;
4. Повышение комплекса механических свойств;

5. Возможность обработки труднодеформируемых сплавов;
6. Возможность компактирования порошков.

7.2. Контрольные вопросы

1. Какими способами могут быть получены ударные волны?
2. Что такое взрыв?
3. Что такое взрывная обработка?
4. Назовите особенности пластической деформации при ударном нагружении.
5. Круг каких задач охватывает комплексное упрочнение ударными волнами?
6. Какие особенности имеет ударная волна?
7. Назовите технологические параметры комплексного упрочнения ударными волнами.
8. Какие изделия чаще всего подвергают упрочнению взрывом?
9. Какие преимущества с другими известными способами поверхностного упрочнения имеет упрочнение взрывом?

8. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДАМИ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Начало работы с SPSS. Расчеты критериев. Расчет перцентилей. Расчет корреляции. Расчет описательных статистик. Метод расчета критерия хи-квадрат.

На всех предыдущих занятиях, когда мы изучали различные методы анализа данных и разные критерии для их оценки, мы использовали так называемые описательные статистики – это показатели, которые описывают особенности того или иного распределения данных. Действительно, чтобы представить, как выглядит полученное в ходе эксперимента множество результатов, лучше всего построить их частотное распределение и для полученной кривой указать следующие ее характеристики:

среднее арифметическое (M);

среднее квадратичное отклонение (σ);

дисперсию (σ^2);

зет — оценки точечных значений (Z).

Когда эти описательные статистики подсчитываются применительно к очень большой по численности группе испытуемых (тысячи и миллионы людей), то сама эта группа называется «генеральной совокупностью», а описательные статистики называются «параметры» совокупности. Такое различие в названиях призвано подчеркнуть, что описательные статистики, которые обычно рассчитываются для малых выборок, могут не совпадать с показателями, рассчитанными для того же признака на огромных выборках, т.е. будут иметь место расхождения M , σ и остальных показателей. Конечно, показатели, которые получены на очень больших выборках, являются более надежными, поскольку показывают не случайные, а стабильные (устойчивые) тенденции в распределении результатов. Поэтому, чтобы подчеркнуть надежность описательных статистик, выведенных на генеральной совокупности данных, их стали называть «параметрами», рассматривая их как своего рода устойчивые стандарты для изучаемого признака или характеристики.

В этой связи те критерии, при расчете которых используются параметры (или описательные статистики) получили название – «параметрических критериев». К числу параметрических относятся: критерии F и t , а также коэффициент корреляции r . Но помимо данного вида критериев в статистике существует еще одна группа критериев, которые называются «непараметрические». Они называются так потому, что не опираются в своих расчетах на параметры (описательные статистики), а используют совершенно другие показатели – какие именно будет сказано далее применительно к каждому конкретному критерию. Итак, начнем с изучения первого непараметрического критерия под названием «хи-квадрат».

Когда мы имеем дело со свойствами живых существ (их анатомическими,

биологическими или психическими проявлениями), то эти свойства в своем частотном распределении подчиняются закону нормального распределения. Однако этот закон не распространяется на события, происходящие с живыми существами, поскольку сами события являются следствием внешних факторов, т.е. свойств окружающего физического мира. В этом мире одни события могут возникать одинаково часто, а могут встречаться с разной вероятностью, и описать данную вероятность довольно сложно. Можно, например, сказать, что такое природное явление, как дождь наиболее вероятно в осенний период для нашего региона и наименее вероятно в зимний период, а в весенний и летний период примерно равновероятно.

Предположим синоптики, занимающиеся предсказанием погоды, составили прогноз того, сколько раз ожидаются те или иные природные явления (дождь, снег и др.) в каждом месяце года в нашем регионе. Потом записали, сколько по факту произошло этих явлений в каждом из двенадцати месяцев. Естественно, количество ожидаемых явлений и количество состоявшихся явлений не совпало точно, причем в каждом месяце эти разногласия носили разный характер: в каких-то месяцах различия оказались заметными, а в каких-то — незначительными. Предположим, что руководство синоптической службы решило оценить, можно ли считать расхождения в ожидаемых и реальных частотах появления природных феноменов существенными. На языке статистики это означало проверить расхождения в ожидаемых и реальных частотах на достоверность различий. Сейчас мы рассмотрим метод, с помощью которого можно ответить на данный вопрос. Этот метод называется расчет критерия хи-квадрат. Сам критерий хи-квадрат обозначается греческой буквой χ^2 . Суть критерия заключается в том, что он сравнивает ожидаемые частоты появления каких-то событий и фактические частоты появления этих событий. Фактические частоты, которые иногда называют наблюдаемые частоты, принято обозначать буквой f_0 (поскольку f — это начальная буква в слове «frequencies», т. е. частоты, а значок «0» внизу относится к слову «observe», что значит «наблюдать»). Ожидаемые частоты обозначаются буквой f_e (значок «e» внизу относится к слову «expect», что значит «ожидать»). Формула расчета критерия:

$$\chi^2 = \frac{(f_0 - f_e)^2}{f_e} \quad (8.1)$$

Разберем пример с использованием данного критерия. Предположим, что вам поручили оценить, насколько хорошо работает метеослужба какого-то региона, данные которой используются аэропортами для планирования полетов. В первом столбце приведенной ниже таблицы указаны дни с различными природными явлениями (снег, дождь и т.п.), в следующем столбце — наблюдавшаяся по факту частота появления этих дней в течение одного из зимних месяцев и прогнозируемая (ожидавшаяся) метеослужбой частота этих явлений. Природное явление Условный код явления
Наблюдавшаяся частота f_0 Ожидаемая частота f_e Их разница ($f_0 - f_e$)

Солнечно	«1»	12	14	2
Дождь	«2»	11	8	3
Снег	«3»	8	5	3
Ветер	«4»	20	17	3
Высокое давление	«5»	10	16	6
Низкое давление	«6»	14	14	0
Магнитная буря	«7»	9	10	1

Вычислим экспериментальное значение хи-квадрат по формуле:

$$\chi_{\text{эксп}}^2 = \frac{2^2}{14} + \frac{3^2}{8} + \frac{3^2}{5} + \frac{3^2}{7} + \frac{6^2}{16} + 0 + \frac{1^2}{10} = 6,09$$

Чтобы определить, являются ли различия в частотах фактических и ожидаемых достоверными, нужно сравнить значение $\chi_{\text{эксп}}^2$ с критическим значением этого критерия — $\chi_{\text{крит}}^2$ по соответствующей таблице.

Таблица 5

Доверительные границы критерия «хи-квадрат» с K степенями свободы для двух уровней значимости $P_{0,05}$ и $P_{0,01}$

K	$P_{0,05}$	$P_{0,01}$	K	$P_{0,05}$	$P_{0,01}$
1	3.84	6.63	26	38.9	45.6
2	5.99	9.21	27	40.1	47.0
3	7.81	11.3	28	41.3	48.3
4	9.49	13.3	29	42.6	49.6
5	11.1	15.1	30	43.8	50.9
6	12.6	16.8	31	45.0	52.2
7	14.1	18.5	32	46.2	53.5
8	15.5	20.1	33	47.4	54.8
9	16.9	21.7	34	48.6	56.1
10	18.3	23.2	35	49.8	57.3
11	19.7	24.7	36	51.0	58.6
12	21.0	26.2	37	52.2	59.9
13	22.4	27.2	38	53.4	61.2
14	23.7	29.1	39	54.6	62.4
15	25.0	30.6	40	55.8	63.7
16	26.3	32.0	41	56.9	65.0
17	27.6	33.4	42	58.1	66.2
18	28.9	34.8	43	59.3	67.5
19	30.1	36.2	44	60.5	68.7
20	31.4	37.6	45	61.7	70.0
21	32.7	38.9	46	62.8	71.2
22	33.9	40.3	47	64.0	72.4
23	35.2	41.6	48	65.2	73.7
24	36.4	43.0	49	66.3	74.9
25	37.7	44.3	50	67.5	76.2

Обратите внимание, что для выбора критического значения вам придется выбрать какую-то конкретную строку. Строки означают различное число степеней свободы – показатель K . Вы помните, что, что он определяется как количество статистических объектов за минусом единицы: $K = N - 1$. В роли статистических объектов могут выступать сами испытуемые, но не только они. В данном примере с погодными явлениями нет испытуемых, а в роли изучаемых объектов выступают семь природных явлений, следовательно, именно природные явления будут определять число N . Если $N=7$, то число степеней свободы будет на 1 меньше, значит, $K=6$.

В таблице на строке $K=6$ стоит критическое значение (при уровне значимости $p=0,05$) равное 12,6.

Сделать вывод о достоверности различий можно лишь в том случае, когда

экспериментальное значение χ^2 превысит критическое значение. В данном случае $\chi^2_{\text{эксп}}=6,09$ в то время, как $\chi^2_{\text{крит}}= 12,6$, следовательно, экспериментальное значение не превысило критическое, и мы не можем говорить о наличии достоверных различий между ожидаемыми природными явлениями и их реальными проявлениями. Иными словами, наши прогнозы нельзя признать слишком отличающимися от действительности, поскольку эти различия не достоверны (нет стабильной тенденции в расхождении ожидаемых и фактических частот).

На практике критерий хи-квадрат применяют не только в тех случаях, когда требуется сравнить ожидаемые (прогнозируемые) и фактические (наблюдаемые) частоты каких-то явлений. Его применение возможно и для сравнения результатов двух групп испытуемых, если данные одной группы рассматривать в качестве ожидаемых результатов, а данные другой группы принять за фактически наблюдаемые результаты! Поскольку критерий хи-квадрат не требует наличия нормального распределения частот в выборке данных (преобладания средних значений), то он применим для анализа любых частотных распределений. Рассмотрим пример подобного рода, где требуется сравнить результаты двух групп испытуемых, при этом сделаем расчеты критерия с помощью компьютерной программы SPSS

Предположим, у нас имеются результаты контрольных работ двух групп учащихся. Ученики из класса «А» писали контрольную работу первыми и дали определенные результаты. Затем контрольную работу предстояло писать ученикам из класса «Б». Учителя вполне могли рассматривать результаты работы, полученные в классе «А», в качестве потенциально ожидаемых и для другого класса – «Б». Но класс «Б» показал несколько иные результаты. Встал вопрос: можно ли признать, что результаты класса «Б» существенно отличаются от результатов класса «А»?

Для ответа на вопрос мы можем воспользоваться критерием хи-квадрат. Для начала возьмем сводную таблицу результатов контрольной работы, которую вам раздали. В каждом классе было по 35 человек. Оценки за работу

В классе «Б» (f_0 – наблюдаемые частоты) В классе «А» (f_e – ожидаемые частоты)

«1»	3	2
«2»	8	4
«3»	10	12
«4»	7	8
«5»	7	6

Попробуем сделать расчет $\chi^2_{\text{эксп}}$ в программе SPSS. Обычно работу с программой мы начинали с того, что вводили в базу данных сразу все полученные в эксперименте значения, называя первую группу (колонку) результатов – переменной V1, а вторую группу результатов – V2 и так далее. Но с критерием хи-квадрат надо поступать иначе. Ввод данных для этого критерия имеет свою особую специфику: можно даже сказать, что ввод требует соблюдения целого ряда «хитростей», которые присущи только хи-квадрату! Поэтому внимательно изучите, как надо вводить данные в

программу для расчета критерия χ^2 .

В базу данных вводится только одна группа данных, которая соответствует фактическим, т.е. наблюдаемым частотам. А группа данных, соответствующая ожидаемым частотам, не вводится в базу данных вообще! Эта группа данных будет вводиться в другом месте программы, когда компьютер сам запросит ввести ожидаемые значения. Сейчас мы разберем по порядку действия на компьютере.

Итак, начинаем ввод фактических значений – в нашем примере фактическими значениями выступают результаты класса «Б». Их надо набирать в первой колонке базы данных программы не в свернутом виде, как это представлено в сводной таблице (на листочке), а в развернутом виде. Поясним, что означает в развернутом виде. Это означает, что если оценка «1» встретилась в классе «Б» 3 раза, то надо три раза набрать цифру 1 в первую графу базы данных, т.е. заполнить три клетки по вертикали (в столбик) цифрой 1. Таким образом, мы столько раз набираем определенную оценку, сколько раз она профигурировала в результатах. Значит, оценку «2» мы наберем (по вертикали) 8 раз, оценку «3» наберем 10 раз, затем оценку «4» напечатаем 7 раз и оценку «5» напечатаем 7 раз.

Всего должно получиться 35 заполненных строк в первой графе базы данных. Больше ничего в базу данных вводить не надо. Нажимаем команду Analyze. Из предложенного меню действий выбираем строку, где написано Nonparametric tests, что означает «непараметрические критерии». Далее предлагается выбрать определенный критерий из имеющихся в списке. Здесь надо нажать на строку со словом Chi-Square. Появится окно, где первую переменную следует выбрать из предложенного перечня переменных традиционным путем переноса (с помощью стрелочки).

Теперь настал момент, когда надо вводить в программу вторую переменную, т.е. результаты работы в классе «А» — ожидаемые результаты. Напомним, что слово «ожидаемые значения» переводится как «Expected Values», поэтому нужно вводить ожидаемые значения в той части поля, где имеется рубрика «Expected Values» (нижний правый квадрат окна). Под этой рубрикой имеется строка со словом «Value», эту строку надо активировать, для чего следует нажать мышью на точку впереди этого слова. При этом произойдет активация команды «использовать значения», которые будут сейчас введены в качестве ожидаемых частот.

Если фактические (наблюдаемые) частоты вводились в базу данных развернутым способом: сколько раз встретилось какая-то оценка, столько раз ее и набирали, то здесь способ ввода данных будет совершенно иным! Дело в том, что программа к наступившему моменту уже обработала первую переменную (данные класса «Б») и создала свернутый протокол результатов. Свернутый протокол – это точная копия первой графы нашей таблицы № 10, которую вы уже имеете:

«1»	3
«2»	8
«3»	10
«4»	7

«5» 7

Теперь компьютер «подготовился» к восприятию следующих данных, т.е. ожидаемых частот, но уже в форме свернутого протокола!

По этой причине вы должны ввести запрашиваемую программой вторую графу данных (ожидаемые частоты – результаты класса «А») и именно в том порядке, как они записаны в таблице № 10, иными словами вы вводите:2

4

12

8

6

Важно помнить, что программа заставляет вводить частоты в соответствии с порядком возрастания величины самого результата: первыми следует набирать частоты встречаемости результата «1», а затем частоты для результата «2», далее частоты для результата «3» и так до частот, соответствующих результату «5».

Теперь ознакомимся с технологией ввода ожидаемых частот в маленькое окошко. Сначала надо поставить курсор в это маленькое окошко и набрать первое значение. У нас в таблице это значение равно 2 — это ожидаемая частота встречаемости результата в «1» балл. Набрав цифру 2, следует нажать на слово Add, которое стоит чуть ниже, после этого набранная цифра переместится в формируемую колонку данных для последующей обработки. Затем нужно вернуть курсор в маленькое окошко и набрать следующую цифру – ей будет цифра 4, после чего снова нажать слово Add, которое означает «добавить» данных в формируемую колонку. Так надо ввести всю последовательность ожидаемых частот. Если вы неправильно нажали цифру, то ошибку можно исправить командой Remove, которая уберет выделенное вами значение, а вам придется ввести новое. Следите, чтобы вводимые частоты соответствовали порядку возрастания оценочных баллов в таблице. Когда все значения будут введены, можно нажать команду ОК на выполнение анализа.

Обращаем внимание на, что при расчетах хи-критерия в статистических пакетах требуется, чтобы количество наблюдаемых частот составляло применительно к отдельному объекту (коду) не менее 5-ти случаев! Иначе программа SPSS не производит расчет данного критерия, поскольку количество наблюдений слишком мало (о чем выдается сообщение при открытии результирующего окна «OutPut»).

Еще одно важное замечание касается общего количества частот во второй группе данных. Оно должно в сумме соответствовать общему количеству случаев наблюдений, зарегистрированных в первой группе. Если вернуться к примеру с оценками мебели, то это означает, что при опросе 100-та покупателей относительно мебели первой фирмы, должны быть опрошены тоже 100 покупателей относительно мебели второй фирмы, — только в этом случае опрос будет считаться вполне корректным. Однако если оказалось, что во второй группе данных зарегистрировано меньшее количество оценок, чем в первой группе, то это допустимо потому, что программа сама

посчитает предполагаемые вероятности встречаемости кодов с учетом тех пропорций между частотами, которые Вы введете в «Values».

Когда расчеты выполнены, автоматически открывается окно «OutPut» и на экране появятся две таблички, в нижней из них будут указаны величина хи-квадрат (Chi-Square) и величина уровня значимости (sig), по которой можно судить о правомерности вывода о достоверности различий. В таблице также указано число степеней свободы (df) – оно отражает количество изучаемых событий за минусом единицы.

В данном примере событием выступает оценка, выставленная за контрольную работу, т.е. оценки от 1-го до 5-ти баллов. Но число степеней свободы будет не пять, а на единицу меньше, следовательно, оно равно 4. Это число потребуется вам, если вы захотите посмотреть критическое значение данного ($\chi^2_{\text{крит}}$) в статистической таблице, чтобы оценить, больше оно или меньше полученного при расчетах $\chi^2_{\text{эксп}}$ (на экране). Если рассчитанное нами экспериментальное значение превышает критическое, то можно сделать вывод о достоверности различий фактических и ожидаемых частот или просто о различии двух групп результатов. Однако, как мы отмечали ранее, вывод о достоверности возможно сделать и не прибегая к таблице, а основании показателя уровня значимости (sig): он должен быть меньше 0,05. Мы получили после расчетов такие показатели:

$\chi^2_{\text{эксп}} = 4,43$, sig= 0,35

Это дает нам право утверждать, что различия между результатами контрольной работы в классе «Б» и в классе «А» носят недостоверный характер (ошибочность вывода о достоверных различиях составляет 35%).

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

Основные

1. Болдин А.П. Основы научных исследований: Учебник для студентов учреждений высшего профобразования / А.П.Болдин, В.А.Максимов. – М.: Изд. Центр «Академия», 2012. – 336 с.
2. Сизий Ю.А. Основи наукових досліджень в технології машинобудування: Навч. посібник / Ю.А.Сизий, Д.В.Сталінський. – Х.:УкрДНТЦ «Енергосталь», Вид. «САГА», 2007. – 212 с.
3. Демченко И.И. Основы научных исследований: Учеб пособие /И.И. Демченко, В.А. Ковалев. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. 171с.
4. Баранов Е.Г., Бунько В.А., Колоколов О.В. и др. Основы научных исследований. - Киев: Высшая школа, 1984.- 176 с.
5. Мальцев П.М.. Основы научных исследований. Учебное пособие / П.М.Мальцев, Н.А.Емельянова. Киев: Вища школа. Головное изд-во. – 1982. – 192 с.
6. Рузавин Г. И.Методы научного исследования.- М., Мысль, 1975. - 237 с.

7. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.:Наука 1976, 279 с
8. Борисов Ф.И., Талдыкин Ю.А. Обработка опытных данных: Практикум/ГАЦМиЗ – Красноярск, 1998. – 80 с.
9. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента. -М.: МГУ, 1976.- 248 с.
- 10.Бородюк В.П., Круг Г.К. и др. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум). – М.: Высш. школа, 1983.- 216 с.

Дополнительные

11. Лапшин И.И. Философия изобретения и изобретение в философии / И.И.Лапшин.- М.: Республика, 1999. – 399 с.
12. Кун Томас. Структура научных революций: пер. с англ. / Томас Кун.- М.: ООО «Изд. АСТ», 2002. – 608.
13. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. - М.: Мир. 1972, 381 с.
14. Василенко П.М., Погорелый Л.В. Основы научных исследований.- Киев: Высшая школа, 1985.- 266 с.
15. Тимошенко Г.М.Теория инженерного эксперимента. Учебное пособие / Г.М.Тимошенко, П.Ф.Зима. Донецк: ДПИ, 1984. – 60 с.
16. Каф. «Горные машины». Методология научных исследований: Учебное пособие // Курс лекций для студ. спец.150404 «Металлургические машины и оборудование».- Красноярск: Сибирский Федеральный университет, 2007. – 45 с.
17. Алімов В.І.Психологічні аспекти науково-технічної творчості. Навчальний посібник / В.І.Алімов, Ю.Б.Максименко, Г.В.Матвеев, С.В.Алімова, В.А.Туков. – Донецьк: ДПП, 2003. – 88 с.
18. Алимova С.В. Психологическая инерция, научно-техническое творчество и музыка. Междисциплинарные исследования в психологии / С.В.Алимova, В.А.Туков, В.И.Алимов. – Донецк: Свет книги, 2013.- 310 с..
19. Алимов В.И. Основы рационализаторской и изобретательской деятельности. Учебно-методическое пособие / В.И.Алимов. В.А.Харченко, В.В.Оробцев– Донецк: ДонГТУ, 1998. – 43 с.
20. Чус А.В. Основы технического творчества / А.В.Чус, В.Н.Данченко. – Киев-Донецк: Вища школа, 1983. – 184 с.
21. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. Учебное пособие для студентов ВТУЗов / А.И. Половинкин. – М.:Машиностроение, 1988. – 368 с.
23. Алимов В.И. Методические указания к практическим работам по курсу «Рационализаторская и изобретательская деятельность»/ В.И.Алимов. В.Н.Крымов -Донецк: ДонНТУ, 2006. – 48 с.
24. Гуревич Ю.Г. Metallурги изобретают / Ю.Г.Гуревич. – М.:Metallургия, 1990. - 107 с.
- 25.Кедров Б.М. Творчество в науке и технике / Б.М.Кедров. – М.:Молодая гвардия, 1987. – 192 с.
- 26.Алимов В.И. Термическая обработка металлов. Экспериментальные работы. Учебное пособие/ В.И.Алимов, А.П.Штыхно, М.В.Георгиаду, О.В.Пушкина-Донецк:Донбасс, 2014.-105 с.
- 27.Коваленко О.А. Новые материалы. Учебное пособие / О.А.Коваленко.- Алчевск:ДГМИ, 2003. – 234 с.
- 28.Интенсификация творческой деятельности студентов /Под ред. В.И.Андрева, Г.Мильхорна. – Казань: Изд. КазУ-та.1990. – 198 с

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Белевитин В.А. Упрочнение и восстановление деталей машин [Электронный ресурс]: справочное пособие / В. А. Белевитин, А. В. Суворов ; В.А. Беливитин, А.В. Суворов ; ФГБОУ ВПО "Челяб. гос. пед. ун-т". - 6 Мб. - Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2015. - 1 файл. - Систем. требования: Acrobat Reader.

2. Минаев А.А. Совмещенные металлургические процессы : монография / А. А. Минаев ; А.А. Минаев. - Донецк: УНИТЕХ, 2008. - 552с.: ил.

Дополнительная литература

1. Коновалов Ю.В. Металлургия [Электронный ресурс] : учебное пособие для бакалавров : в 3 кн. Кн. 2 : Ч. 3. Металловедение и основы термической обработки металлов. Ч. 4. Теоретические основы обработки металлов давлением. Сортамент прокатной продукции. Ч. 5. Производство заготовок. Ч. 6. Листопрокатное производство / Ю. В. Коновалов, А. А. Минаев; ГБУЗ "ДонНТУ". - (207 Мб). - Донецк : ГБУЗ "ДонНТУ", 2012. - 1 файл. - Систем. требования: Acrobat Reader.

2. Кашаев В.В. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии и сертификация металлопродукции [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов / В. В. Кашаев ; В.В. Кашаев ; ГОУ ВПО "ДонНТУ". - 1 Мб. - Донецк: ДонНТУ, 2016. - 1 файл. - Систем. требования: Acrobat Reader.