



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра «Физическое и прикладное материаловедение»

Учебное пособие по дисциплине

«Методы анализа состава материалов»

Авторы
Долгачев Ю. В.,
Пустовойт В. Н.

Ростов-на-Дону, 2020

Аннотация

Учебное пособие предназначено для студентов очной формы обучения направления 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Долгачев Ю.В.,
д.т.н., профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» Пустовойт В.Н.



Оглавление

ОСНОВЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ АТОМОВ	5
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ	5
2. ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА	8
3. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ...11	
4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....12	
5. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК12	
ВИЗУАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ СТИЛОСКОПИРОВАНИЯ.....	13
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ	13
2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ НА СТИЛОСКОПЕ	14
3. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ...18	
4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....18	
5. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК18	
ОПТИКО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ.....	19
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ	19
2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ НА УСТАНОВКЕ MAGELLAN Q8	22
3. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ...24	
4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....24	
5. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК24	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕРЕОЛОГИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА ПУТЕМ АНАЛИЗА МИКРОСТРУКТУРЫ	25
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ	25
2. ПРАКТИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ	27
3. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ...30	
4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....30	
5. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК30	
ЭКСПРЕССНЫЙ МЕТОД МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В ОТОЖЖЕННЫХ СТАЛЯХ.....	32
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ	32
2. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ...34	

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	34
4. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	34
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА СПЛАВА ПУТЕМ РАСШИФРОВКИ ЕГО МАРКИ	35
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ	35
2. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ... ..	43
3. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	43
4. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	44

ОСНОВЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ АТОМОВ

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Определение элементного состава материалов *физическими методами* основано на измерении зависимостей «физическое свойство — состав». К ним относятся различные спектральные методы: атомно-абсорбционный; рентгеноспектральный; масс-спектральный, ионная диагностика и др.

Наиболее часто в физических методах исследования регистрируется взаимодействие вещества с электромагнитным излучением (его электрической или магнитной компонентой). При этом происходит изменение энергии ΔE молекул исследуемого материала в соответствии с уравнением Бора:

$$\Delta E = E - E_0 = h\nu,$$

где E и E_0 — энергии системы в возбужденном и стационарном состоянии; h — постоянная Планка; ν — частота.

В том случае, когда ΔE положительно, наблюдается поглощение энергии; если ΔE отрицательно, то происходит излучение энергии. В первом случае регистрируются спектры поглощения, во втором — эмиссионные спектры.

Спектр — излучение, разложенное по длинам волн.

Спектральная линия — узкий (почти хроматический) пик в спектре испускания либо провал в спектре пропускания объекта. Чаще всего этот термин применяется к квантовым процессам. Положение спектральной линии в спектре определяется длиной волны λ , частотой $\nu = c/\lambda$ или энергией кванта $h\nu$.

Спектрометрия — область физики, посвященная исследованию распределения интенсивности электромагнитного излучения по длинам волн или частотам. По типам спектров различают эмиссионную спектроскопию, изучающую спектры испускания, и абсорбционную спектроскопию, изучающую спектры поглощения.

На рис. 1 приведена шкала деления электромагнитного излучения по длинам волн и соответствующие им методы спектрометрии.

Высокоэнергетическая область спектра начинается γ -лучами ($\lambda = 10^{-16} - 10^{-10}$ м), которые характеризуют изменения в энергетическом состоянии ядер, вызывая внутриядерные превращения. Это метод *γ -резонансной спектроскопии*.

Рентгеновские лучи ($\lambda = 10^{-10} - 10^{-8}$ м) изменяют энергетическое состояние внутренних, прилегающих к ядру электронов, не

Методы анализа состава материалов

затрагивая ядра. *Рентгеноскопия* изучает взаимодействие данных электронов и ядра и дает возможность определить энергетические связи электронов как с ядром, так и между собой.

Ультрафиолетовое (УФ) и видимое излучение, объединяемые в одну область электронных спектров ($\lambda=10^{-8}-10^{-6}$ м), соответствует энергетическим изменениям внешних валентных электронов. На фиксировании этих явлений основана *ультрафиолетовая и оптическая спектроскопия*.

Инфракрасные (ИК) лучи ($\lambda=10^{-6}-10^{-4}$ м) вызывают изменения энергии колебательных уровней молекул, т. е. колебаний связей и функциональных групп. На этих явлениях основан метод *ИК-спектроскопии*.

Микроволновое поглощение ($\lambda=10^{-4}-10^{-1}$ м) связано с изменением энергии вращения атомов в молекуле и с колебаниями атомов в кристаллической решетке. Это метод *микроволновой спектроскопии*.

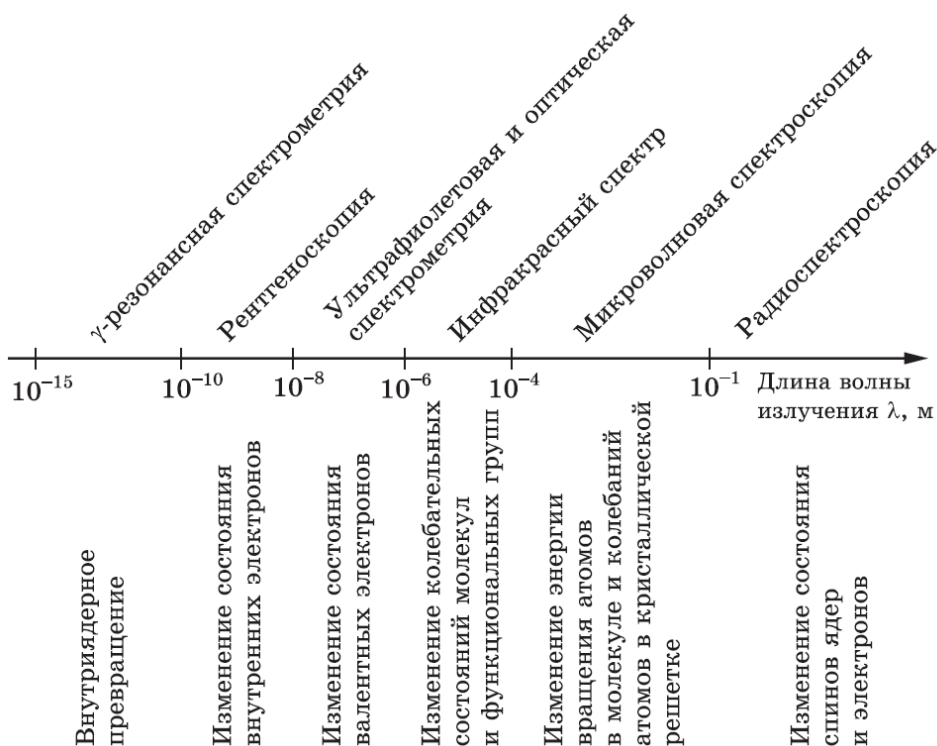


Рисунок 1 - Схема деления электромагнитного излучения по длинам волн и соответствующие им методы спектроскопии

Наконец, радиоволны ($\lambda > 10^{-1}$) соответствуют изменению энергии состояния спинов ядер и электронов. *Радиоспектроскопия* подразделяется на *метод ядерного магнитного резонанса* — ЯМР, *ядерного квадрупольного резонанса* — ЯКР, *электронного парамагнитного резонанса* — ЭПР, *электронно-циклотронного резонанса* — ЭЦР и др.

К спектрометрии в широком смысле относят также *ядерную спектрометрию*, в которую включают α - и β -спектрометрию, а также спектрометрию нейтронов, нейтрино и других элементарных частиц. Распределение атомных частиц по массам и энергиям изучает *масс-спектрометрия*, интенсивность звука по его частоте — акустическая спектрометрия; электронов по энергиям — *фотоэлектронная спектрометрия*, *рентгеноэлектронная спектрометрия* и т. д.

Определение химического состава *атомно-эмиссионным спектральным* методом основано на изучении атомных спектров вещества, возбуждаемых в горячих источниках света. Данный анализ дает информацию как о качественном, так и количественном составе анализируемого объекта.

Схему эмиссионного спектрального анализа можно представить следующим образом: перевод вещества в парообразное состояние, которое сопровождается возбуждением атомов или ионов; разложение испускаемого атомами или ионами света в спектр; регистрация и расшифровка полученных спектров. По характерным для каждого атома линиям можно идентифицировать элементы, содержащиеся в анализируемом образце (качественный спектральный анализ), а по относительным интенсивностям спектральных линий можно определить их концентрации (количественный анализ).

Для возбуждения атома ему необходимо сообщить энергию, называемую потенциалом возбуждения. В общем случае ее величина является функцией положения элемента в Периодической системе и, следовательно, зависит от заряда ядра и строения электронных оболочек атома. Возбужденное состояние атомов длится порядка 10^{-8} с, после чего атом переходит в невозбужденное состояние, а избыток энергии высвобождается в виде кванта (рис. 2).

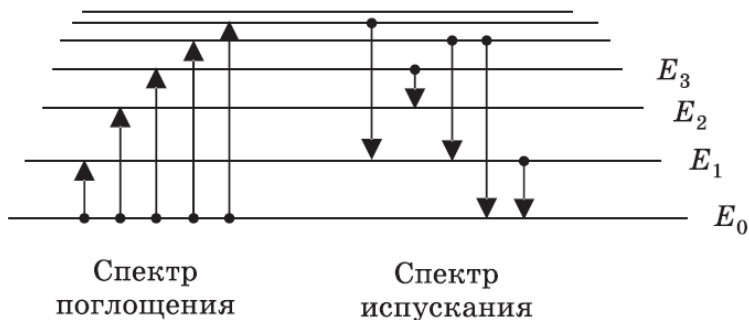


Рисунок 2 - Схема расположения энергетических уровней в атоме

На схеме нижний энергетический уровень E_0 соответствует атому, находящемуся в невозбужденном состоянии. Переходы с различных возбужденных уровней на один и тот же нижний приводят к появлению серии спектральных линий. Количество возможных электронных переходов и, следовательно, число линий в спектре элемента определяется строением внешних электронных оболочек атомов. Если элемент содержит мало внешних электронов (например, щелочные металлы), то его спектр будет иметь небольшое количество пиков. Линии, которые соответствуют переходам на основной уровень, называются резонансными. Особое значение для анализа имеют резонансные линии, соответствующие переходам с первого возбужденного уровня E_1 . Поскольку эти линии являются наиболее интенсивными, то они обеспечивают наибольшую чувствительность при определении малых количеств элемента. Эти линии получили название последних, так как при уменьшении концентрации элемента они исчезают в спектре последними.

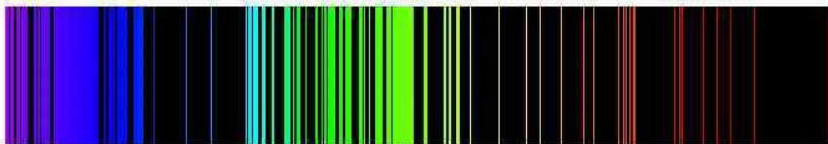
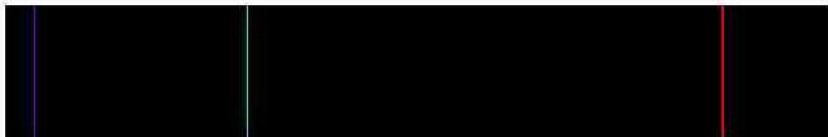
Метод атомно-эмиссионной спектрометрии позволяет проводить многокомпонентный анализ пробы при содержании примесного элемента до $10^{-60}\%$ масс. Верхняя граница определяемого содержания — до нескольких десятков процентов. Метод экспрес-сен, поддается автоматизации. При анализе расходуются очень малые количества вещества: порядка миллиграмма. Метод позволяет определять до 80 элементов Периодической системы, а также анализировать пробы в любом агрегатном состоянии.

2. ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА АТОМА ВОДОРОДА

Изолированные атомы испускают линейчатые спектры. Линии в атомарных спектрах располагаются не беспорядочно, а составляют определенные группы или, как принято говорить, серии.

Наиболее простой спектр имеет атом водорода (см. рис.3).

спектр водорода



спектр железа

Рисунок 3 – Спектры атомов водорода и железа.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (1)$$

где λ – длины волны; R – постоянная Ридберга, константа для всех серий в спектре атома водорода; n – целое число, имеющее определенное значение для каждой серии; m – целое число, принимающее для каждой серии последовательный ряд значений от $n+1$ до ∞ . Величина обратная длине волны называется волновым числом V (число волн, укладываемых на 1 см):

$$V = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{см}^{-1}) \quad (2)$$

Тогда формула (1) переписывается

$$V = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Из этого соотношения следует, что по мере увеличения m расстояние между двумя соседними спектральными линиями уменьшается и при $m=\infty$ получается предельное значение

$$V_{\infty} = \frac{R}{n^2}$$

волнового числа около которого сгущаются спектральные линии (его называют границей серии).

Шведский физик Ридберг показал, что не только в спектре водорода, но и в спектрах некоторых других элементов волновые числа линий могут быть представлены в виде разности двух функций от

целых чисел m и n .

Можно рассчитать энергию атома водорода для всех

$$E_n = -Rhc \frac{1}{n^2}$$

стационарных состояний: , где n пробегая значения 1,2,3... ∞ , обозначает номер энергетического уровня. Согласно этим представлениям целые числа n и m в серийной формуле (1) - номера уровней, на который и с которого, соответственно, совершает переход атом в процессе излучения. Расположение уровней и соответствующие переходы для атома водорода представлены на рис.1.

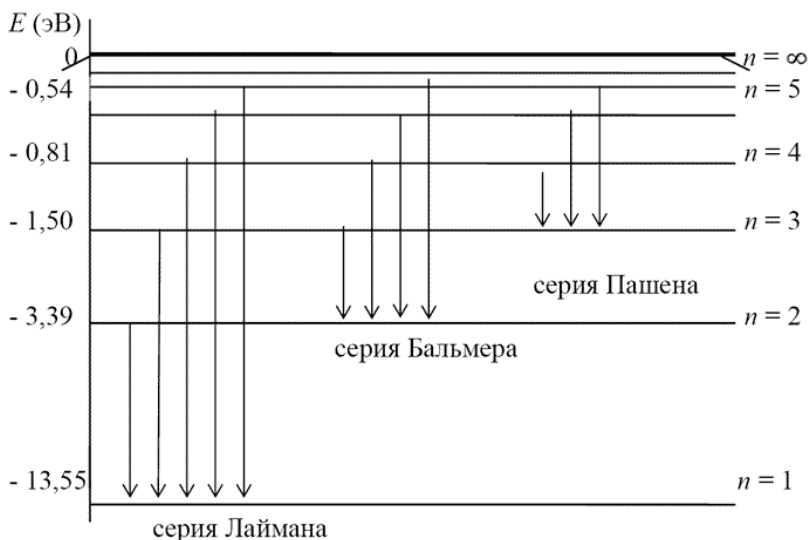


Рисунок 4 - Схема энергетических уровней атомов водорода.

Спектр атома водорода состоит из нескольких серий, расположенных в различных спектральных областях:

а) серия Лаймана - крайняя ультрафиолетовая часть спектра, возникает при переходе атома с одного из высших уровней $m=2,3,4 \dots$ на основной, $n=1$

$$V = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (3)$$

б) серия Бальмера - видимая область спектра, возникает при переходе атома с одного из высших уровней $m=3,4,5 \dots$ на второй $n=2$.

$$V = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (4)$$

в) серия Пашена - инфракрасная часть спектра, возникает при переходе атома с одного из высших уровней $m=4,5,6...$ на третий $n=3$

$$V = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (5)$$

В более далекой инфракрасной части спектра лежат еще две серии: Брэккета и Пфунда.

В настоящей работе изучаются четыре первые линии серии Бальмера. Обычно удается измерить длины волн только для первых трех линий этой серии, иногда удается увидеть линию H δ . Линии эти соответственно обозначаются символами :

H α - красная линия ($m=3$); H β - сине-голубая ($m=4$);

H γ - сине-фиолетовая ($m=5$); H δ - фиолетовая ($m=6$).

Затем, по формуле (4) вычисляется постоянная Ридберга для каждой измеренной спектральной линии. Затем находят среднее значение этой константы.

Согласно теории Бора постоянная Ридберга равна

$$R = \frac{e^4 \cdot m}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \quad (6)$$

где e – заряд электрона, $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл; m – масса покоя электрона, $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг; c – скорость света в вакууме, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

$R = 10,97 \cdot 10^6$ м $^{-1}$ – табличное значение постоянной Ридберга.

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – табличное значение постоянной Планка.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

- Ознакомьтесь с основными теоретическими представлениями о спектральном анализе.

- Изучите особенности спектра атома водорода.

- По справочным данным найдите λ для всех четырех линий. Затем вычислить с точностью до одного обратного сантиметра волновые числа этих же линий. Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1 - Определение постоянной Ридберга по спектру излучения атомов водорода.

m	3	4	5	6
λ , нм				
$\tilde{\nu}$, см ⁻¹				
R , см ⁻¹				

- Подставить в формулу (4) найденные на опыте волновые числа и указанные в табл. 1 квантовые числа m для каждой линии и вычислить постоянную Ридберга для измеренных линий. Значение R надо вычислить с точностью до одного обратного сантиметра, затем найти её среднее значение. Сравнить с теоретическим значением, рассчитанным по формуле (6).

- Подсчитайте абсолютную и относительную погрешность определения постоянной Ридберга. Запишите полученный результат с учетом погрешности.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- Опишите физические основы спектрального анализа?
- Что такое спектр и спектральная линия?
- Как происходит излучение атома?
- Чем отличается спектр атома от спектра сплава?
- Почему отличаются спектры атома водорода и атома железа?
- Как рассчитывается постоянная Ридберга?

5. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазурицкий М.И., Дуймакаев Ш.И., Шполянский А.Я. Методы спектроскопии и элементарного анализа вещества. - Ростов н/Д.: ИЦ ДГТУ, 2015. - 115 с.
2. Пашкова Е.В., Волосова Е.В., Шипуля А.Н. Спектральные методы анализа. - М.: СтГАУ - "Агрус", 2017. - 56 с.
3. Звекон А.А., Невоструев В.А., Каленский А.В. Спектральные методы исследования в химии. - Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2015. – 124 с.

ВИЗУАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ СТИЛОСКОПИРОВАНИЯ

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Спектральный анализ – один из наиболее распространенных современных физических методов определения химического состава металлов и сплавов в заводской практике.

Сущность спектрального анализа состоит в следующем. Анализируемое вещество, приведенное в состояние свечения, дает ценную информацию о своем составе посредством характеристического излучения. Металл превращается в пар с помощью дугового электрического разряда. Полученный пар «возбуждается», т. е. к его свободным атомам подводится дополнительная энергия, в результате чего наружные легкоподвижные электроны оболочки атома переходят из своего нормального энергетического состояния в более высокое – «возбужденное». Возвращаясь затем спонтанно в нормальное состояние, атомы излучают полученный ими при возбуждении избыток энергии в виде света определенной волны. Различные атомы данного элемента могут возбуждаться по-разному и испускать свет различных длин волн, который называется эмиссионным спектром. Для каждого элемента спектр вполне определен и характерен.

Превращение в пар, возбуждение атомов и излучение света осуществляется с помощью дугового и искрового разрядов, образующихся между двумя электродами, одним из которых служит исследуемый образец, а вторым – «подставной» стержень или диск из какого-либо чистого металла.

В данной работе рассматривается визуальный спектральный анализ по спектрам испускания атомов вещества. Это раздел прикладной спектроскопии получил широкое распространение в промышленности.

Визуальный спектральный анализ с помощью спектроскопов, снабженных окуляром для рассматривания спектра в увеличенном виде (стилоскоп), предназначены для качественного и полуколичественного анализов. По характеру излучения (длине волн) и с помощью таблиц можно определить наличие того или иного элемента, присутствие которого в светящихся парах становится несомненным. Количественный анализ основан на существовании определенной связи между числом светящихся атомов (концентрацией) и измеряемой в процессе анализа интенсивностью света соответствующих длин волн (визуально).

Визуальный способ наблюдения допускает использование лишь «видимого» участка спектра с длинами волн от $4000 \cdot 10^{-10}$ до $7000 \cdot 10^{-10}$ м.

Особенности спектрального анализа заключаются в следующем:

- высокая скорость анализа (1–2 мин.);
- высокая чувствительность;
- универсальность аппаратуры;
- низкая стоимость анализа (по сравнению с методами химического анализа) при сравнительно невысокой стоимости основного оборудования;
- анализу может быть подвергнута любая деталь.

2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ НА СТИЛОСКОПЕ

Стилоскоп СЛ-11А предназначен для экспрессных анализов сталей и цветных сплавов, к точности которых не предъявляются высоких требований. Исследуемый образец практически не повреждается.

Анализ с помощью стилоскопа заключается в следующем: между анализируемым образцом и электродом зажигается электрическая дуга или искра. Их излучение с помощью трехлинзового осветителя направляется в щель стилоскопа и проходит через фокусирующее устройство и диспергирующую (разлагающую) систему. Исследователь рассматривает в окуляр ряд изображений входной щели в виде тонких линий, число которых соответствует числу отдельных длин волн, составляющих входящий в щель пучок света. Совокупность этих изображений (линий), называемая линейчатым спектром, отображает эмиссионный спектр данного источника света.

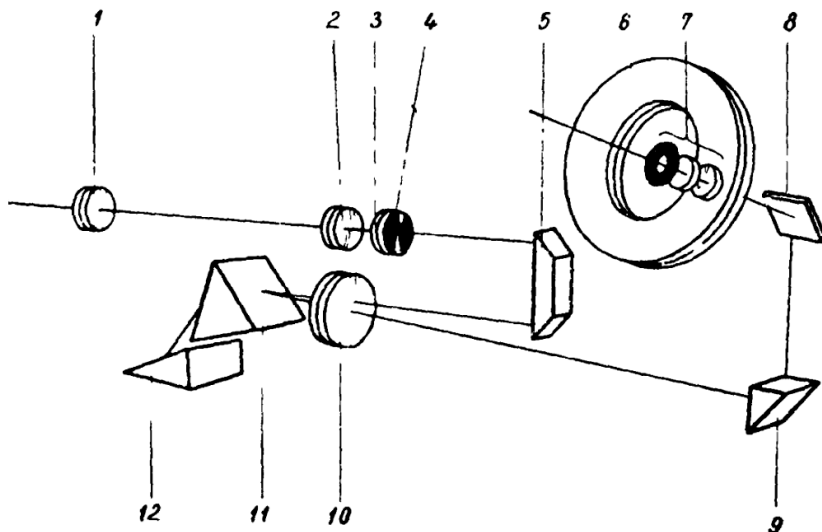


Рисунок 1 – Оптическая схема стилоскопа

Оптическая схема представлена на рисунке 1. Свет от дуги с помощью трехлинзовой осветительной системы *1, 2, 3* равномерно заполняет щель *4*, отражательная призма *5* направляет пучок на объектив *10*, в фокусе которого помещена щель, полученный параллельный пучок попадает на диспергирующие призмы *11* и *12*. Большой катет призмы *12* с преломляющим углом 31° посеребрен, поэтому лучи отражаются от него, проходят в обратном направлении через призмы на объектив и попадают на прямоугольную призму *9* и зеркало *8*, которые направляют их в окуляр *7*. В фокальной плоскости окуляра расположен фотометрический клин *6*, позволяющий выравнять интенсивности аналитических линий, что упрощает проведение количественного анализа. Более точно сравнивать интенсивность спектральных линий позволяет фотометр, которым снабжены такие спектрометры, как стилометры.

Стилоскоп состоит из следующих составных частей (рисунок 2): осветительной системы, щели с объективом, отражательной призмы, диспергирующей системы и окулярной головки. Все эти части помещены внутри корпуса *6*.

На основании *17* смонтирован столик *1* для установки образцов. Щель постоянной ширины $0,015$ мм нанесена на стеклянной пластинке, склеенной с третьей линзой осветителя.

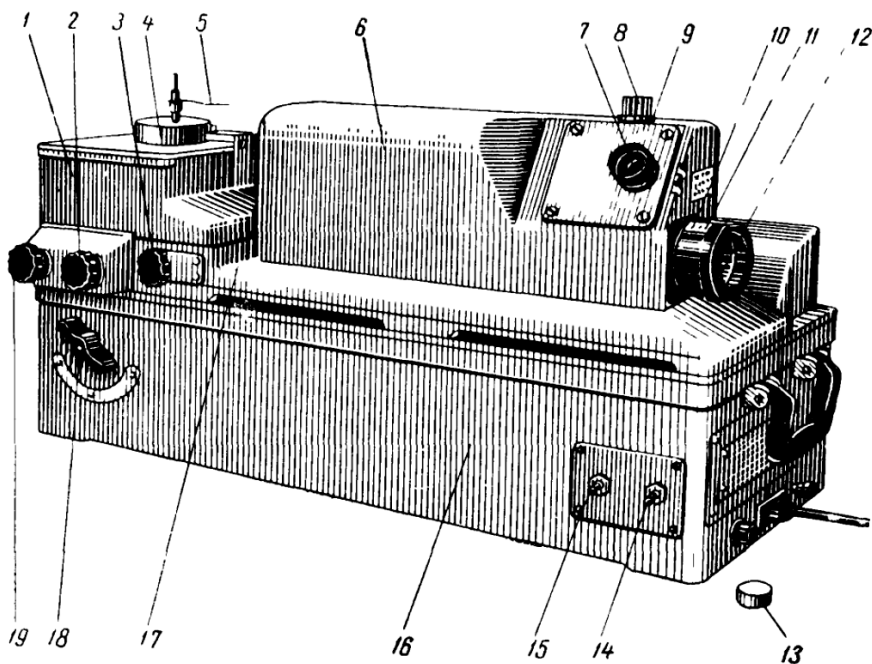


Рисунок 2 – Устройство стилоскопа

Диспергирующая система состоит из двух призм (см. рисунок 1): одна с преломляющим углом 63° закреплена неподвижно, другая с преломляющим углом 31° может поворачиваться вместе со своим мостиком, вследствие чего спектр перемещается в поле зрения окуляра. Поворот призмы осуществляется маховиком 12 (см. рисунок 2), соединенным с барабаном, на котором нанесены равномерная шкала 10 с ценой деления 2° и шкала 11 с символами химических элементов. При совмещении символа с отсчетным штрихом барабана в поле зрения окуляра появляется соответствующая группа линий.

На кронштейне окулярной головки расположены: прямоугольная призма, зеркало, фотометрический клин со шкалой и окуляр 7 в оправе.

На основании прибора расположен кронштейн 2 с держателем 1, в котором можно устанавливать дисковый электрод 3. Держатель электродов можно перемещать по высоте маховиком 19, в направлении, перпендикулярном оптической оси, – маховиком 3, и в случае применения дискового электрода вращать маховиком 2. В качестве источника возбуждения спектра служит генератор 16.

Анализируемый образец помещают на столик 4, зажигают дугу, для чего переключатель 18 устанавливают в положение «Дуга» или «Искра», переключатель 14 – в положение «2А» или «4А», подводят провод питания от сети и устанавливают переключатель 15 в положение «Вкл». Наблюдая в окуляр прибора маховиком 12 приводят на середину поля зрения требуемую область спектра.

Для проведения *качественного анализа* необходимо сложное излучение светящихся паров разложить на простые монохроматические лучи, определить их длины волн и с помощью таблиц (прилагаются к прибору) установить принадлежность их к спектрам того или иного элемента. Характерные линии хрома появляются в зеленой части спектра, а вольфрама – в синей.

Количественный анализ (примерная концентрация элемента) определяется посредством специальных таблиц по сравнительной интенсивности характерных линий искомого элемента и соседних определенных линий основного элемента (в сталях линия железа), интенсивности которых приняты за стандарт. Имея подготовленную фотографию выбранных линий (для определения того или иного элемента) можно легко установить наличие их в спектре и констатировать присутствие искомого элемента. Для определения точного места нахождения определяемой линии или группы линий необходимо изучить находящиеся вблизи линии по взаимному расположению (пары линий, одиночные и т. д.) и интенсивности. Наблюдая спектр, можно оценить содержание интересующего элемента в веществе, исходя из яркости его спектральных линий. Чем больше содержание данного элемента в исследуемом образце, тем интенсивнее линии этого элемента. Необходимо внимательно оценить интенсивность линий определяемого элемента относительно линий сравнения (линий железа).

Некоторые примеры определения концентрации элементов с использованием атласа спектров.

Например, запись 0,3% - 1 Cr - 7 расшифровывается следующим образом. Сравнивая первую линию хрома седьмой группы по интенсивности (яркости) с седьмой стандартной линией железа определенной длины волны имеем 0,3 % Cr в исследуемом образце. Проанализировав таким образом несколько записей, можно определить примерное количество (с одним знаком после запятой) того или иного элемента в образце.

Другой пример: 0,3% - 3Mn III ≤ I; Mn II > I означает, что, если в третьей группе для определения марганца третья ли-

ния марганца по интенсивности немного меньше первой линии железа, и вторая линия марганца по интенсивности превосходит ту же линию железа, то в стали содержание марганца составляет 0,3%.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

- Ознакомьтесь с основным принципом действия и устройством стилоскопа.
- Проведите качественный и полуколичественный анализ того или иного элемента в стали или сплаве.
- Зарисуйте группу линий, по которой производился анализ образца.
- Расшифруйте полученные данные.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- Опишите назначение и возможности стилоскопа?
- Каков принцип действия стилоскопа?
- Как устроена оптическая система стилоскопа?
- Опишите процесс наблюдения спектров?
- Каковы особенности качественного анализа?
- Каковы особенности количественного анализа?

5. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазурицкий М.И., Дуймакаев Ш.И., Шполянский А.Я. Методы спектроскопии и элементарного анализа вещества. - Ростов н/Д.: ИЦ ДГТУ, 2015. - 115 с.
2. Атлас спектральных линий для стилоскопа. – Львов: «Львовэнергоремонт», 1969. – 37 с.
3. РД ЭО 0505-03 Инструкция по стилоскопированию металла.

ОПТИКО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

1.1. Назначение оптико-эмиссионного спектрального анализа

Сегодня анализ химического состава нашел широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. Качество, надежность, долговечность изделия в большой степени зависят от состава использованного сплава. Малейшее отклонение от заданного химического состава может привести к негативному изменению свойств. Особая опасность заключается в том, что данное отклонение может быть визуально незаметным и как следствие неопределимым без специальных приборов. Человеческие органы чувств не дают возможности проанализировать такие параметры металла, как его состав или марку используемого сплава. Одним из приборов позволяющим получить необходимую информацию о химическом составе сплава является оптико-эмиссионный спектрометр.

Оптический эмиссионный спектрометр используется для измерения массовой доли химических элементов в металлах и сплавах и применяется в аналитических лабораториях промышленных предприятий, в цехах для быстрой сортировки и идентификации металлов и сплавов, а также для анализа больших конструкций без нарушения их целостности.

1.2 Принцип действия оптико-эмиссионного анализатора

Принцип действия спектрометра основан на измерении интенсивности излучения на определенной длине волны спектра эмиссионного излучения атомов анализируемых элементов. Излучение возбуждается искровым разрядом между вспомогательным электродом и анализируемым металлическим образцом. В процессе анализа аргон обтекает исследуемый объект, делая его более заметным для изучения. Эмиссионный спектрометр фиксирует интенсивность излучения и на основе получаемых данных анализирует состав металла. Содержание элементов в образце определяется по градуировочным зависимостям между интенсивностью эмиссионного излучения и содержанием элемента в образце.

Спектрометр состоит из источника возбуждения спектра, оптической системы и автоматизированной системы управления и

регистрации на базе IBM-совместимого компьютера.

Искровой источник возбуждения спектра предназначен для возбуждения эмиссионного светового потока от искры между образцом и электродом. Спектральный состав света определяется химическим составом исследуемой пробы.

В настоящее время наиболее оптимальной компоновкой оптической системы считается исполнение по схеме Пашена-Рунге (рис. 1).

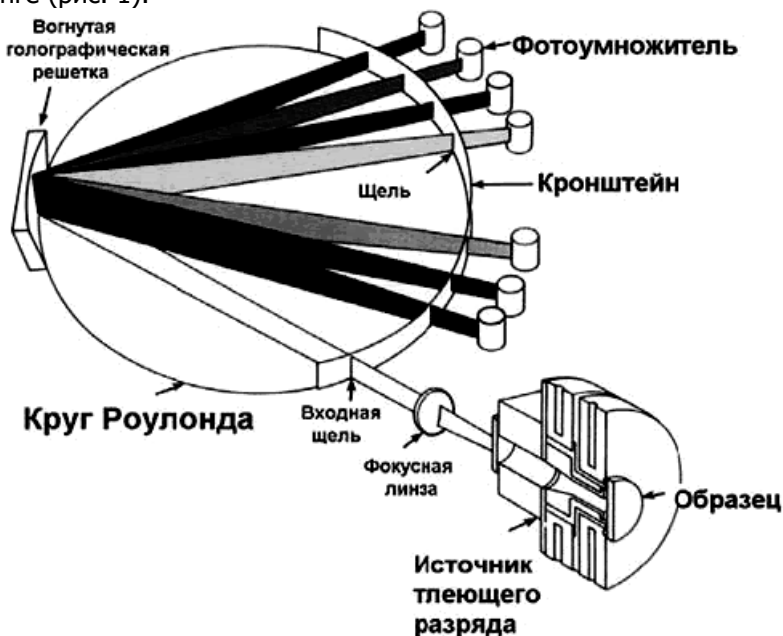


Рис. 1 Оптическая система по схеме Пашена-Рунге

Когда возбужденные с помощью тлеющего разряда атомы переходят на более низкую орбиту, они излучают свет. Каждая излученная длина волны является характерной для каждого атома испустившего ее. Свет фокусируется на входной щели спектрометра и расщепляется на вогнутой голографической решетке в соответствии с длинами волн. После этого через точно установленные выходные щели свет попадает на соответствующий элементу фотоумножитель.

Для обеспечения хорошей прозрачности оптическая камера должна быть вакуумирована. Кроме этого система должна быть независимой от внешних условий (температуры и давления воздуха). В настоящее время стационарные оптические спектромет-

ры термостабилизированы с точностью до десятых долей градуса.

Управление процессом измерения и обработки выходной информации осуществляется от встроенного IBM-совместимого компьютера с помощью специального программного комплекса. По программе осуществляется настройка прибора, построение градуировочных зависимостей на основе анализа стандартных образцов, оптимизация его параметров, управление режимами спектрометра, обработка, сохранение и печать результатов измерения.

1.3 Установка Magellan Q8

Qantron Magellan (Magellan Q8) - оптико-эмиссионный анализатор с вакуумной оптикой фирмы Bruker (рис. 2). Позволяет определять химический состав сплавов на основе железа (стали и чугуны), меди (бронзы, латуни и др.) алюминия (дуралюмины и др.). Установка оснащена датчиками, определяющими процентное количество таких элементов, как углерод, азот, фосфор, сера, ванадий, вольфрам, кремний, марганец, хром, молибден, никель, алюминий, кобальт, медь, ниобий, титан, олово, бор, железо, цинк, олово, бериллий, магний, свинец.

Калибровка установки осуществляется с помощью калибровочных образцов различных сталей, чугунов, бронзы, алюминиевых сплавов. Точность определения химического состава сплавов составляет до сотых долей процента.



Рис. 2. Установка Magellan Q8

2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ НА УСТАНОВКЕ MAGELLAN Q8

2.1 Пробоподготовка

Перед анализом поверхность образцов на железной основе должна быть подготовлена с помощью шлифовальной машины и шкурки зернистостью 40 – 60. Для подготовки образцов из цветных металлов рекомендуется фрезерование или подготовка с помощью токарного станка. Для износостойких материалов типа чугуна рекомендуется применять шлифовку абразивным камнем. Точность анализа напрямую зависит от качества аргона и качества пробоподготовки. Перед анализом поверхность образца должна быть сухой и чистой. Не допускается фрезерование с ис-

пользованием эмульсионных масел.

2.2 Проведение измерений

Поместите подготовленный образец на аналитический столик. При этом аналитическое отверстие должно быть полностью закрыто образцом. Зафиксируйте образец, опустив автоматический прижим образца.

Нажмите кнопку прожига, чтобы начать измерение. Так же можно начать измерение нажав клавишу F2 на клавиатуре или на соответствующую кнопку на экране программного обеспечения QMatrix. После этого вы услышите звук горения искры в различных режимах.

После окончания горения искры результаты анализа будут представлены на экране. По окончании измерения почистите электрод специальной щеточкой.

Проанализируйте образец еще раз. При этом не допускается наложений пятен обжига друг на друга. После окончания второго измерения необходимо сравнить результаты измерений. Если воспроизводимость неудовлетворительна, необходимо провести еще один анализ.

Если звук искры слишком громкий или горение искры можно видеть в промежутке между аналитическим столиком и образцом, необходимо остановить анализ кнопкой "Стоп". После этого необходимо проверить анализируемую поверхность и повторить измерение.

2.3 Контроль пятна прожига

Цвет и форма пятна прожига зависит от нескольких факторов. Обычно пятно представляет собой светлый кратер (центр) с темными окраинами, состоящими из мелкодисперсного металлического порошка. Если цвет пятна отличается от нормального то проконтролируйте следующие факторы:

Не содержит ли образец поры или органические включения?

Качество аргона соответствует требованиям – 99,998%?

Аргоновая система проверена на утечки?

Поверхность образцов подготовлена правильно? (Без перегрева более чем 100°C, без "замыливания" на старой "шкурке", без следов загрязнения или внедрения в поверхность материала абразива).

2.4 Чистка электрода.

Рекомендуется чистить электрод после каждого прожига.

Кисточку держать в чистом виде и использовать только для одной металлической основы. В некоторых случаях, связанных с особыми обстоятельствами (мал размер образца, не требуется высокого качества результатов) можно прожигать на одном месте, но надо учитывать: что образец не должен нагреваться выше 60°C, что в следствии прожига удаляется часть материала образца и от прожига к прожигу меняется расстояние до электрода.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

- Уясните цель работы.
- Ознакомьтесь с назначением, возможностями и принципом действия оптико-эмиссионного спектрометра.
- Изучите рекомендации по работе на установке Magellan Q8.
- Произведите пробоподготовку образца и проведите измерения подготовленного образца.
- Распечатайте результаты химического анализа.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- Опишите назначение и возможности установки Magellan Q8?
- Каков принцип действия оптико-эмиссионного спектрометра?
- Что вызывает свечение металлического образца?
- Как устроена оптическая система спектрометра?
- Опишите процесс пробоподготовки?
- Как произвести измерение на спектрометре Magellan Q8?
- Каким должно быть правильное пятно прожига?

5. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильева В.И. и др. Спектральные методы анализа. Практическое руководство. - Санкт-Петербург: Лань, 2014. - 416 с.
2. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А.С. Зубченко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2003. - 782 с.
3. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. - 639 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕРЕОЛОГИЧЕСКИХ СОТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА ПУТЕМ АНАЛИЗА МИКРОСТРУКТУРЫ

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Структурный объемный состав сплава связан с его химическим составом. В формулы, связывающие химический состав по массе и структурный (фазовый) состав сплава по объему, обязательно входят величины плотностей сплава и его структурных составляющих. Сопоставление химического состава с объемным структурным составом позволяет взаимно проверить правильность данных, полученных при химическом и стереометрическом анализе. Кроме того, такое сопоставление позволяет определять химический состав или плотность некоторых структурных составляющих, которые могут быть выделены из сплава и исследованы отдельно.

Примем следующие обозначения химического состава и плотности отдельных структурных составляющих или фаз и их содержания в сплаве по массе и по объему:

- отдельные структурные составляющие (или фазы) сплава: α, β, γ
- объемная доля структурных составляющих в сплаве: $\Sigma V_\alpha, \Sigma V_\beta, \Sigma V_\gamma$
- содержание структурной составляющей в сплаве % (по массе): $G_\alpha, G_\beta, G_\gamma$
- плотность структурных составляющих, г/см³: $d_\alpha, d_\beta, d_\gamma$
- содержание какого-либо элемента \mathcal{E} в структурной составляющей, % (по массе): $\mathcal{E}_\alpha, \mathcal{E}_\beta, \mathcal{E}_\gamma$.

Плотность сплава d_c (г/см³) складывается из масс всех его структурных составляющих, находящихся в единице объема сплава (в 1 см³). В свою очередь масса каждой из структурных составляющих в единице объема сплава равна ее объемной доле, умноженной на плотность этой составляющей. Поэтому

$$d_c = d_\alpha \Sigma V_\alpha + d_\beta \Sigma V_\beta + d_\gamma \Sigma V_\gamma, \text{ г/см}^3 \quad (1)$$

Если в сплаве имеются поры или рассеянные пустоты различного происхождения, их также следует учитывать как самостоятельную составляющую с плотностью, практически равной нулю.

Если известен полный структурный состав сплава по объ-

ему, содержание любой из его структурных составляющих по массе определяют по формуле:

$$G_{\alpha} = \frac{d_{\alpha} \sum V_{\alpha}}{d_{\alpha} \sum V_{\alpha} + d_{\beta} \sum V_{\beta} + d_{\gamma} \sum V_{\gamma} + \dots} \cdot 100\% \quad (2)$$

Многочлен в знаменателе формулы (2) представляет собой плотность самого сплава d_c . Поэтому, если плотность сплава известна по непосредственному экспериментальному измерению (например, методом гидростатического взвешивания), можно пользоваться более простой формулой:

$$G_{\alpha} = \frac{d_{\alpha} \sum V_{\alpha}}{d_c} \cdot 100\% \quad (3)$$

Эта формула позволяет определить любую из трех величин — содержание структурной составляющей по массе G_{α} , ее объемную долю $\sum V_{\alpha}$ плотность d_{α} , если известны две из этих величин и плотность самого сплава.

Интересующая нас структурная составляющая, вообще говоря, может не быть химическим элементом, а иметь сложный состав, являясь химическим соединением, твердым раствором или многофазным образованием (эвтектикой, эвтектоидом). Пусть содержание какого-либо элемента в этой составляющей равно \mathcal{E}_{α} , % (по массе), содержание такого же элемента в сплаве \mathcal{E} % (по массе), причем элемент полностью сосредоточен только в интересующей нас составляющей. Тогда содержание элемента этой составляющей в сплаве, % (по массе), входящее в формулы (2) и (3), определяется выражением

$$\mathcal{E} = \frac{G_{\alpha} \cdot \mathcal{E}_{\alpha}}{100\%} \quad (4)$$

Ниже приведены плотности (г/см³) некоторых структурных составляющих железоуглеродистых сплавов, которые могут быть использованы при расчетах по формулам (1)—(4): феррит 7.874, цементит 7.662, графит 2.216, перлит 7.848, фосфид железа 6.74, двойная фосфидная эвтектика 7.14, сульфид железа (FeS) 4.30, сульфид марганца (MnS) 3.99, кремнезем (SiO₂) 2.26 – 2.31, глинозем (Al₂O₃) 3.85 – 4.10, ортосиликат марганца (2MnO-SiO₂) 3.58 – 3.70, силикат глинозема (Al₂O₃-SiO₂) 3.05, ортосиликат железа (2FeO-SiO₂) 4.35, окись магния (MgO) 3.50 – 3.65, закись марганца 4.73 – 5.50.

2. ПРАКТИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ

Основной задачей металлографического анализа является идентификация (распознавание) изображений структуры на плоском микрошлифе. В настоящее время накоплен большой практический опыт металлографических исследований, позволяющий безошибочно идентифицировать наблюдаемые изображения структуры и правильно распознавать те или иные элементы структуры металлов и сплавов.

Другая важная задача анализа - стереологическая, сущностью которой является составление представлений об организации структуры в объеме по видимым плоским изображениям. Эта задача решается методами количественной металлографии, которые дают единственно правильное описание структуры в отличие от качественных методов, предполагающих приближенное описание такими терминами, как "крупный", "мелкий", "средний" и т.п. Дело в том, что дуализм "структура-свойства" является количественно строго определенным, то есть все свойства металлов и сплавов однозначно определяются особенностями организации их структуры и, в частности, размерами структурных элементов. Например, важнейшая характеристика металлов - предел текучести - очень точно определяется через размеры структурных элементов универсальной зависимостью Холла-Петча

$$\sigma_T = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-\frac{1}{2}},$$
 где σ_0 и k_y - константы материала; d - размер структурного элемента (например, диаметр зерна).

Широкому распространению весьма трудоемких методов количественной металлографии в значительной мере способствует применение специальных автоматических приборов для количественного анализа изображений, решающих задачу идентификации, стереологическую и метрологическую задачи. Сущность последней - определение наиболее достоверного значения измеряемой величины и пределов ее варьирования при заданной доверительной вероятности.

Для решения стереологических задач наибольшее применение находят линейный и точечный методы количественной металлографии, которые используются при определении таких параметров, как объемная доля фазы или структурной составляющей, удельная поверхность границ зерен или фаз в сплаве, размер зерна и др.

Сущность линейного метода иллюстрирует рис.1, где показан простейший вариант анализа с применением в качестве отсчетного устройства окуляр-микрометра. Осевая линия линейки окуляр-микрометра разделена на 100 частей.

Суммарная длина отрезков этой линии, лежащих на α -фазе (на рис.1 заштрихована), при по- казанном положении линейки

равна 42 делениям (12+2+9+9). Объемную долю i -той фазы в линейном методе определяют по формуле

$$V_{\alpha} = \sum_{i=1}^n \frac{l_{\alpha i}}{l}, \quad (5)$$

где $\sum_{i=1}^n \frac{l_{\alpha i}}{l}$ - суммарная длина отрезков, проходящих по α -фазе; l - длина базовой линии (в данном случае линейки окуляр-микрометра).

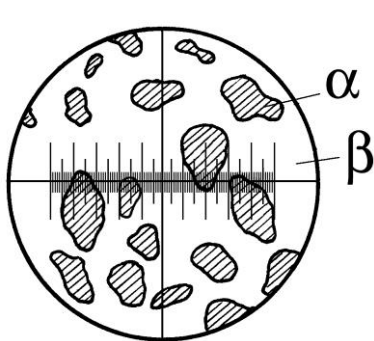


Рис.1. Схема определения объемной доли α -фазы линейным методом

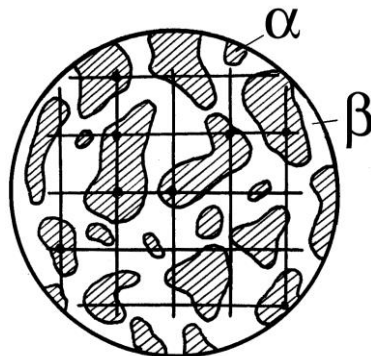


Рис.2. Схема определения объемной доли α -фазы точечным методом

При этом для повышения точности вычислений следует выбирать тем большее увеличение микроскопа, чем меньше объемная доля искомой фазы. Для рассматриваемого случая V_{α} составляет 0,42 или 42%. Повторяя измерения на достаточно большом (не менее 25) числе полей зрения, получаем результат требуемой точности и достоверности. Этот же метод может быть реализован на серии из 10-15 снимков микроструктуры, на которые наносятся либо случайные секущие, либо, еще лучше, квадратная (упорядоченная) сетка. Длины отрезков, отвечающие искомой фазе, измеряются мерительным циркулем. Точность линейного метода, обусловленная числом измеренных в процессе анализа отрезков, зависит также от объемной доли исследуемой фазы или структурной составляющей, ее дисперсности, характера структуры и оценивается абсолютной ошибкой, которая вычисляется по формуле

$$\varepsilon = K \cdot t(P, n - 1) \sqrt{\frac{V_{\alpha}(1 - V_{\alpha})}{n}}, \quad (6)$$

где n - число измеренных при анализе отрезков; K - коэффици-

ент, зависящий от характера структуры; $t(P, n-1)$ - квантиль распределения Стьюдента - нормированное отклонение, зависящее от доверительной вероятности P (для обычно принимаемого при количественных исследованиях значения $P = 0,95$, $t = 0,6745$).

Коэффициент K в любом случае может быть принят равным 1. В случае, если сечения микрочастиц анализируемой фазы равноосны и распределены равномерно, коэффициент K можно снизить до 0,65. При полосчатой структуре (неметаллические включения на продольном микрошлифе, полосчатое расположение феррита или перлита и т.п.) коэффициент K очень сильно изменяется в зависимости от направления секущих линий относительно оси ориентации структуры. При перпендикулярном расположении секущей по отношению к оси ориентации K может быть снижен до 0,4.

Сущность точечного метода (метод А. А. Глаголева) иллюстрирует рис. 2, на котором показана двухфазная структура с наложенной на нее квадратной сеткой, имеющей 25 узловых точек. Из них 8 точек попали на участки микрошлифа, занятые α -фазой (на рис.2 заштрихованы). Объемная доля определяется соотношением

$$V_{\alpha} = \frac{n_{\alpha}}{n}, \quad (7)$$

где n_{α} - число точек, попавших на участки шлифа, занятые α -фазой; n - общее число узловых точек сетки.

В примере, приведенном на рис.2, объемная доля $V_{\alpha} = \frac{8}{25}$

или 0,32. Повторное положение сетки на другие кадры (поля зрения) позволяет определить объемную долю фазы с любой необходимой точностью и достоверностью.

Точность точечного метода, обусловленная общим числом использованных точек, зависит от объемной доли исследуемой фазы или структурной составляющей и оценивается абсолютной ошибкой, вычисляемой по формуле

$$\varepsilon = t(P, n-1) \sqrt{\frac{V_{\alpha}(1-V_{\alpha})}{n}}. \quad (8)$$

Располагая информацией об объемной доле структурных составляющих можно, например, определить содержание углерода в отожженной углеродистой стали или в ферритном графитизированном чугуне.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Уясните цель работы.
2. Изучите методические основы и приемы количественной металлографии.
3. Определите линейным и точечным методом по микрофотографиям или их копиям объемную долю графитных включений в чугунах или перлита в доэвтектидной стали.
4. Обоснуйте какой метод является наиболее точным и далее используйте результаты полученные этим методом.
5. Рассчитайте по формуле (1) общую плотность сплава d_c .
6. По формуле (3) найдите содержание всех структурных составляющих по массе G_a (для сталей перлита и феррита, а для чугунов графита и феррита соответственно).
7. Вычислите содержание углерода Ξ в каждой структурной составляющей по формуле (4) с учетом того, что в перлите углерода 0,8%, в феррите 0,006%, в графите 100%.
8. Подсчитайте общее содержание углерода в сплаве и определите подходящую для него марку..

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- Как связаны структурный объемный состав сплава и его химический состав по массе?
- В чем заключается сущность линейного метода количественной металлографии?
- В чем заключается сущность точечного метода количественной металлографии?
- От чего зависит и как оценивается точность линейного и точечного метода количественной металлографии?
- Опишите порядок вычислений содержания углерода в структурных составляющих сплава.
- Содержание углерода в какой структурной составляющей является определяющим для общего содержания углерода в сплаве?

5. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Домбровский Ю.М. Стереология: учебное пособие. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2002. – 101 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термическая обработка стали. - М.: Металлургия, 1983. - 480 с.
3. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А.С. Зубченко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2003. - 782 с.

4. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. - 639 с.

ЭКСПРЕССНЫЙ МЕТОД МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В ОТОЖЖЕННЫХ СТАЛЯХ

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Если углеродистая сталь хорошо отожжена (рис. 1), т.е. приведена в равновесное состояние, то микроструктурным анализом можно определить содержание в ней углерода.

Такие определения фактически выполняют только для доэвтектоидных сталей, так как в заэвтектоидных сталях значительное изменение в содержании углерода мало и почти незаметно изменяет микроструктуру.

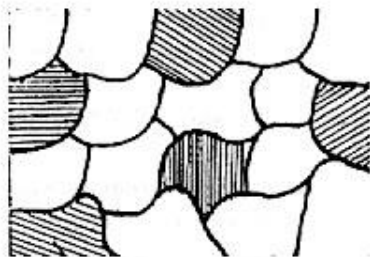
Углерод в доэвтектоидной стали распределен между избыточным ферритом и перлитом. В феррите содержатся тысячные доли процента углерода, которыми можно пренебречь и считать, что практически весь углерод в доэвтектоидной стали находится в перлите. В перлите содержится 0,8 % С. В доэвтектоидной стали на перлит приходится только часть сплава, и содержание углерода в весовых процентах пропорционально площади шлифа, занимаемой перлитом. Эта пропорция вытекает из примерного равенства удельных весов феррита и перлита; в противном случае по микроструктуре можно было бы судить только об объемном соотношении.

Содержание углерода в доэвтектоидной стали:

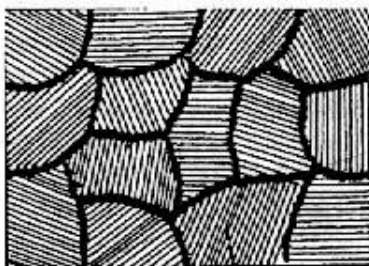
$$\% \text{ C} = (0,8 \times F_{\text{п}}) / 100,$$

где $F_{\text{п}}$ – площадь, занятая перлитом (в %) в поле зрения микроскопа.

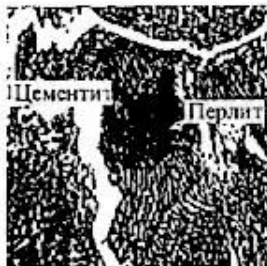
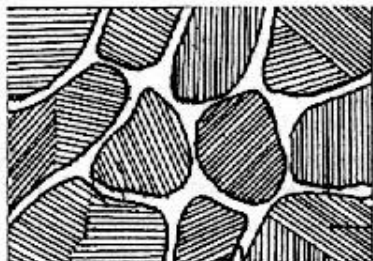
$F_{\text{п}}$ чаще всего оценивают на глаз. Такой метод может показаться слишком грубым, но в действительности же он дает хорошие результаты. Если абсолютная ошибка в оценке площади, занимаемой перлитом, составляет 10%, то абсолютная ошибка в определении содержания углерода составляет всего 0,08%.



а)



б)



в)

Рисунок 1 - Микроструктура углеродистых сталей (слева схематичное изображение, справа фотография): а) доэвтектоидной; б) эвтектоидной; в) заэвтектоидной.

2. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

- 2.1. Уясните цель работы.
- 2.2. Изучите теоретические сведения о приеме экспрессного определения углерода по микроструктуре.
- 2.3. Примените описываемую методику экспрессного метода к изображению микроструктуры выданному преподавателем.
- 2.4. Повторите анализ, используя линейный метод для определения объемной доли перлита и вычисляя содержание углерода по этим данным.
- 2.5. Сравните результаты, полученные «на глаз» и линейным методом. Вычислите абсолютную ошибку определения углерода, принимая данные полученные с помощью линейного метода за истинное значение.

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- Суть экспрессного метода определения углерода в отожженных сталях?
- Каковы области применимости метода?
- Почему этим способом нельзя определять углерод в заэвтектоидных сталях?
- Какова точность метода?

4. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термическая обработка стали. - М.: Металлургия, 1983. - 480 с.
2. Домбровский Ю.М. Стереология: учебное пособие. – Ростов н/Д: ДГТУ, 2002. – 101 с.
3. Рыжонков Д.И., Лёвина В.В., Дзидзигури Э.Л. Наноматериалы: учебное пособие. – М.: БИНОМ, 2010. – 365 с.
4. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А.С. Зубченко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2003. - 782 с.
5. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. - 639 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА СПЛАВА ПУТЕМ РАСШИФРОВКИ ЕГО МАРКИ

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

В большинстве случаев, возможно определить химический состав материала раскрыв содержание всех букв и цифр его марки. Следует иметь в виду, что в ряде сплавов содержание компонентов прямо не указано в марке, но следует из принципов маркировки данного материала и может быть отражено при расшифровке.

Углеродистые конструкционные стали.

Углеродистая конструкционная сталь обыкновенного качества (общего назначения) ГОСТ 380-2005: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст2кп, Ст3сп, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст5Гсп, Ст6пс и др.).

Буквы Ст в маркировке сталей обозначают сталь обыкновенного качества; буква Г – повышенное содержание марганца. Буквы кп (сталь кипящая), пс (сталь полуспокойная), сп (сталь спокойная) обозначают способ раскисления (процесс удаления из стали кислорода, который является вредной примесью). Цифры, стоящие после букв Ст, обозначают **условный** номер марки в зависимости от массовой доли химических элементов и механических свойств стали. Чем больше номер, тем больше углерода и других химических элементов и механических свойств стали, а также выше ее механические свойства. Эти стали хорошо свариваются, куются, штампуются и обрабатываются резанием. Применяются для изготовления сварных строительных конструкций, крепежных изделий, малонагруженных деталей машин, а также стандартных и нормализованных деталей: рукояток, кнопок, ручек, заглушек, пробок, петель шарнирных и т.д.

Углеродистая конструкционная качественная сталь ГОСТ 1050-88: 05кп, 08кп, 08пс, 10пс, 15кп, 15пс, 15,18кп, 20кп, 20пс, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60.

Цифры в маркировке указывают среднюю долю углерода в сотых долях процента. Буквы кп, пс обозначают способ раскисления (кп – кипящие, пс – полуспокойные). В марках, где способ раскисления не указан, сталь спокойная. С увеличением массовой доли углерода повышаются механические свойства. Из низкоуглеродистых качественных сталей марок 05, 08кп, 08пс, 10, 10пс, 10кп изготавливают детали штамповкой и холодной высадкой: трубки, прокладки, колпачки, крепежные детали, шайбы, вилки, втулки и тяги. Стали марок 15, 20, 25 идут на изготовление малонагруженных деталей машин – валиков, втулок, пальцев, упоров, копиров, осей, шестерен и других деталей, работающих при температурах 40...425°C. Стали марок 30-60 идут на изготовление отечественных деталей машин, улучшаемых путем закалки с последующим отпуском и нормализацией: шатунов, коленчатых валов, шлицевых валиков, тяг, штоков, сухарей, зубчатых колес и др.

Углеродистые инструментальные стали ГОСТ 1435-99.

В зависимости от химического состава углеродистая инструментальная сталь выпускается следующих марок:

- качественная сталь – У7, У8, У8Г, У9, У10, У11, У12, У13;
- высококачественная сталь – У7А, У8А, У8ГА, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А.

В маркировке буква У обозначает, что сталь углеродистая инструментальная. Цифры, следующие за буквой У, соответствуют массовой доле углерода в десятых процента. Буква Г указывает на повышенное содержание марганца (0,4...0,6%); буква А, стоящая в конце марки, - на то, что сталь высококачественная, имеет пониженное содержание вредных примесей (серы и фосфора). Марки стали без буквы А в обозначении – качественные. Из-за ограниченной свариваемости эта сталь не применяется для сварных конструкций, но при необходимости сваривается методом контактной сварки. Углеродистые инструментальные стали находят широкое применение для изготовления слесарно-монтажного, измерительного, столярно-плотничного инструмента: зубила, долота, плоскогубцы, пилы, фрезы, зенковки, калибры, сверла, надфили, напильники и т.д. Инструмент, изготовленный из углеродистых инструментальных сталей, обладает хорошими режущими свойствами.

Легированные конструкционные стали.

Легированные стали маркируются цифрами, указывающими массовую долю углерода и легирующих элементов, и буквами, обозначающими легирующие элементы. Буквой А в конце марки обозначают сталь высококачественную, а буквой Ш – особовысококачественную. Эти стали имеют пониженную массовую долю вредных примесей – серы и фосфора. Цифры, стоящие вначале, указывают на содержание углерода в конструкционных сталях – в сотых долях процента, в инструментальных – в десятых долях процента. Если впереди марки цифр нет, то массовая доля углерода в пределах 1%. Цифры, стоящие после букв, соответствуют массовой доле легирующих элементов в процентах. Если после букв цифр нет, то массовая доля элементов в пределах 1%. Например, 18Х2Н4МА – легированная конструкционная высококачественная сталь (с пониженным содержанием серы и фосфора), 2% хрома, 4% никеля, 1% молибдена, 0,18% углерода. Так как массовая доля углерода до 0,3%, сталь является цементуемой, т.е. подвергается химико-термической обработке.

Согласно ГОСТ 5950-73 приняты условные буквенные обозначения легирующих элементов: алюминий – Ю, азот – А, бор – Р, ванадий – Ф, вольфрам – В, кобальт – К, кремний – С, никель – Н, ниобий – Б, селен – Е, хром – Х, цирконий – Ц, титан – Т, фосфор – П, редкоземельные металлы – РЗМ. Кроме того, стандартом предусмотрены и другие обозначения отдельных групп легированных сталей: Р (впереди марки) – быстрорежущие; Ш (в конце марки) – сталь особовысококачественная; Ш (впереди марки) – сталь подшипниковая; А (впереди марки) – сталь автоматная; А (в конце марки) – сталь высококачественная; А (в середине марки) – сталь с содержанием азота; Э – сталь электротехническая; и т.д.

Принцип маркировки легированных конструкционных сталей рассмотрим на примерах. Марка 15ХА – стал легированная конструкционная, цементуемая, высококачественная, массовая доля углерода – 0,15%, хрома – около 1%, с пониженным содержанием вредных примесей (серы и фосфора). Марка 30ХГСН2А – сталь легированная конструкционная улучшаемая, высококачественная, массовая доля углерода – 0,3%, хрома, марганца, кремния по 1%, никеля – 2%, имеет пониженное содержание вредных примесей.

Легированные конструкционные стали подразделяются на улучшаемые термической обработкой и цементуемые, т.е. подвергаемые химико-термической обработке.

Цементуемые легированные стали – это низкоуглероди-

стые (до 0,3% углерода), низко- и среднелегированные стали марок 15X, 20X, 15Г, 20Г, 10Г2, 18ХГТ, 20ХГТ и др. Легированные цементуемые конструкционные стали применяются для изготовления деталей, работающих в условиях трения при незначительных нагрузках: втулок, пальцев, валиков, толкателей, шестерен и др.

Улучшаемые легированные стали – это среднеуглеродистые (массовая доля углерода – более 0,3%) и среднелегированные стали марок 30X, 30Г, 35X, 38ХА, 40X, 50X, 50Г, 50Г2, 30ХГТ и др. Улучшаемые легированные конструкционные стали применяются для изготовления деталей, работающих при средних и высоких нагрузках: шпинделей, подшипников скольжения, червячных валов, роторов, рычагов, толкателей, блоков, крепежных деталей, работающих при высоких температурах, крупных зубчатых колес, валиков горячей прокатки.

Легированные инструментальные стали.

Быстрорежущие инструментальные стали – высококачественные стали, предназначенные для изготовления режущего инструмента, работающего при высоких режимах резания. Марки: Р9, Р18, Р6АМ, Р6М5К5, 11Р3АМ3Ф, Р6АМ5Ф2, Р12Ф3, Р18К5Ф2, Р9М4К8.

В маркировке быстрорежущих сталей приняты следующие обозначения: буквой Р обозначаются все быстрорежущие стали. Цифра, стоящая справа после буквы Р, указывает на среднюю массовую долю основного легирующего элемента – вольфрама. Буква К означает кобальт, М – молибден, А – азот.

Из быстрорежущих сталей делают токарные, строгальные резцы, фрезы, развертки, модульные фрезы, долбяки, протяжки, сверла, метчики плашки.

Высоколегированные стали.

Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали и сплавы – конструкционные материалы, которые сопротивляются химического и электрохимического воздействию окружающей среды.

Хром и никель являются постоянными легирующими элементами при получении коррозионно-стойких сталей: 12Х12, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 08Х13, 12Х21Н5Т, Х28АН и др.

Углеродистые и легированные стали специального назначения.

Рессорно-пружинная сталь ГОСТ 14959-79 выпускается качественной, высококачественная, а также углеродистой (65, 70, 80, 85, 60Г, 65Г, 70Г) и легированной (55С2, 55С2А, 60С2, 70С3А, 60С2Г, 50ХГ, 50ХГА и др.). Цифры в маркировке углеродистых

сталей указывают среднюю массовую долю углерода в сотых долях процента; буква Г, стоящая справа после цифры, повышенное содержание марганца. В обозначении легированных сталей цифры, стоящие впереди марки, показывают на массовую долю углерода в сотых долях процента.

Шарикоподшипниковая сталь ГОСТ 801-78 (ШХ4, ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ). В маркировке этих сталей приняты следующие обозначения: буквы ШХ – шарикоподшипниковая хромистая; буквы С, Г – легирующие элементы (кремний и марганец); цифры показывают количество хрома в десятых долях процента.

Чугуны

По форме графита чугуны разделяют на:

- чугуны с пластинчатым графитом – серые чугуны;
- чугуны с шаровидным графитом – высокопрочные чугуны;
- чугуны с хлопьевидным графитом – ковкие чугуны.

Маркировка серого чугуна определена ГОСТ 1412–85. Согласно стандарта, такой чугун маркируется буквами «СЧ» и двумя цифрами, которые показывают минимально допустимое временное сопротивление чугуна в кгс/мм². Например, обозначение чугуна СЧ 30 означает, что он относится к серым чугунам с пластинчатым графитом и его $\sigma_b = 300$ МПа (30 кгс/мм²). Всего стандартом предусмотрен следующий ряд марок чугунов – от СЧ 10 до СЧ 35.

Высокопрочный чугун маркируют в соответствии с ГОСТ 7293–85. Марку высокопрочного чугуна обозначают буквами «ВЧ» и двумя цифрами, которые показывают его минимальное временное сопротивление в кгс/мм². Например, маркировка ВЧ 50 означает, что этот чугун является высокопрочным и его $\sigma_b = 500$ МПа (50 кгс/мм²).

Марки ковкого чугуна определены в ГОСТ 1215–79. Он обозначается буквами «КЧ» и двумя группами цифр, которые определяют минимальное временное сопротивление в кгс/мм² и относительное удлинение при растяжении в процентах. Например, КЧ 37–12 означает, что эта марка ковкого чугуна с $\sigma_b = 370$ МПа (37 кгс/мм²) и относительным удлинением 12 %.

В промышленности широко применяют изделия из легированных чугунов с особыми свойствами. Обычно их маркировка начинается с буквы, указывающей на область применения чугуна.

Например, по ГОСТ 1585–85 чугун маркируют буквами «АЧ» (антифрикционный чугун), затем указывают тип чугуна (С – серый с пластинчатым графитом, В – высокопрочный с шаровид-

ным графитом, К – ковкий чугун с компактным графитом), далее число, обозначающее порядковый номер марки: АЧС–5, АЧК–2.

Очень широко легированные чугуны применяют для изготовления изделий, работающих в условиях интенсивного абразивного износа (мельющие тела, прокатные валки, формы для прессования огнеупоров и т.п.). Такие чугуны в структуре содержат значительное количество твердой и износостойкой карбидной фазы и по структурному типу их относят к белым чугунам. В этом случае легирующие элементы и их содержание обозначают так же, как и для сталей. Впереди указывают буквы «ИЧ» – износостойкий чугун, далее содержание легирующих элементов, начиная с основного – хрома. Содержание углерода в чугуне зависит от содержания основных элементов и в марке не указывается. Например, марка ИЧХ4Г7Д соответствует износостойкому чугуну с содержанием хрома (в среднем) 4 %, 7 % Mn, < 0,7 % Si.

По ГОСТ 7769–82 выпускают изделия из коррозионно-стойких чугунов. Первая буква «Ч» (чугун), далее буква и цифра, показывающие содержание легирующего элемента, например, ЧГ6С3 (6 % марганца, 3 % кремния).

Цветные металлы и сплавы.

Медь и её сплавы. Технически чистая медь обладает высокими пластичностью и коррозионной стойкостью, малым удельным электросопротивлением и высокой теплопроводностью.

По чистоте медь подразделяют на марки (ГОСТ 859-78):

Марка меди	МВЧ	МОО	МО	М1	М2	М3
% Cu+Ag, не менее	99,993	99,99	99,95	99,9	99,7	99,5

После обозначения марки указывают способ изготовления меди: к - катодная, б - бескислородная, р - раскисленная. Медь огневого рафинирования не обозначается.

Примеры: МООк - технически чистая катодная медь, содержащая не менее 99,99% меди и серебра; М3 - технически чистая медь огневого рафинирования, содержит не менее 99,5% меди и серебра.

Медные сплавы разделяют на бронзы и латуни.

Бронзы - это сплавы меди с оловом (4 - 33% Sn хотя бывают безоловянные бронзы), свинцом (до 30% Pb), алюминием (5-11% Al), кремнием (4-5% Si), сурьмой и фосфором (ГОСТ 493-79, ГОСТ 613-79, ГОСТ 5017-74, ГОСТ 18175-78).

Латуни - сплавы меди с цинком (до 50% Zn) и небольшими добавками алюминия, кремния, свинца, никеля, марганца

(ГОСТ 15527-70, ГОСТ 17711-80).

Медные сплавы предназначены для изготовления деталей методами литья, называют литейными, а сплавы, предназначенные для изготовления деталей пластическим деформированием - сплавами, обрабатываемыми давлением.

Медные сплавы обозначают начальными буквами их названия (Бр или Л), после чего следуют первые буквы названий основных элементов, образующих сплав, и цифры, указывающие количество элемента в процентах.

Приняты следующие обозначения компонентов сплавов: А – алюминий, Мц – марганец, С – свинец, Б – бериллий, Мг – магний, Ср – серебро, Ж – железо, Мш – мышьяк, Су – сурьма, К – кремний, Н – никель, Т – титан, Кд – кадмий, О – олово, Ф – фосфор, Х – хром, Ц – цинк.

Примеры: БрА9Мц2Л - бронза, содержащая 9% алюминия, 2% Мп, остальное Сu ("Л" указывает, что сплав литейный); ЛЦ40Мц3Ж - латунь, содержащая 40% Zn, 3% Мп, ~1% Fe, остальное Сu; Бр0Ф8,0-0,3 - бронза наряду с медью содержащая 8% олова и 0,3% фосфора; ЛАМш77-2-0,05 - латунь содержащая 77% Сu, 2% Al, 0,055 мышьяка, остальное Zn (в обозначении латуни, предназначенной для обработки давлением, первое число указывает на содержание меди).

В несложных по составу латунях указывают только содержание в сплаве меди: Л96 - латунь содержащая 96% Сu и ~4% Zn (томпак); Л63 - латунь содержащая 63% Сu и ~37% Zn.

Алюминий и его сплавы. Алюминий - легкий металл, обладающий высокими тепло- и электропроводностью, стойкий к коррозии.

В зависимости от степени частоты первичный алюминий согласно ГОСТ 11069-74 бывает особой (А999), высокой (А995, А95) и технической чистоты (А85, А7Е, А0 и др.). Алюминий маркируют буквой А и цифрами, обозначающими доли процента свыше 99,0% Al. Буква "Е" обозначает повышенное содержание железа и пониженное кремния. Примеры: А999 - алюминий особой чистоты, в котором содержится не менее 99,999% Al; А5 - алюминий технической чистоты в котором 99,5% алюминия.

Алюминиевые сплавы разделяют на деформируемые и литейные. Те и другие могут быть не упрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Алюминиевые сплавы маркируются по следующему принципу: марки литейных сплавов имеют первую букву А, за ней Л. Сплавы дляковки и штамповки за буквой А имеют букву К. После

этих двух букв ставится условный номер сплава. Принятые обозначения деформированных сплавов такие: сплава авиаль - АВ, алюминивно-магниевого - АМг, алюминивно-марганцового - АМц. Дуралюмины обозначаются буквой Д с последующим условным номером.

Деформируемые алюминиевые сплавы хорошо обрабатываются прокаткой, ковкой, штамповкой. Их марки приведены в ГОСТ4784-74.

К деформируемым алюминиевым сплавам не упрочняемым термообработкой, относятся сплавы системы Al-Mn (АМц1, АМцС) и Al-Mg (АМг, АМг1, АМг2, АМг3). Аббревиатура включает в себя начальные буквы, входящие в состав сплава компонентов и цифры, указывающие содержание легирующего элемента в процентах.

К деформируемым алюминиевым сплавам, упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы системы Al-Cu-Mg с добавками некоторых элементов (дуралюмины, ковошные сплавы), а также высокопрочные и жаропрочные сплавы сложного хим.состава.

Дуралюмины маркируются буквой "Д" и порядковым номером, например: Д1, Д12, Д18, АК4, АК8. Чистый деформируемый алюминий обозначается буквами "АД" и условным обозначением степени его чистоты: АДоч (99,98% Al), АД000 (99,80% Al), АД0 (99,50% Al), АД1 (99,30% Al), АД (99,00% Al).

Литейные алюминиевые сплавы (ГОСТ 2685-75) обладает хорошей жидкотекучестью, имеет сравнительно небольшую усадку и предназначены в основном для фасонного литья. Эти сплавы маркируются буквами "АЛ" с последующим порядковым номером: АЛ2, АЛ9, АЛ13, АЛ22, АЛ30. Иногда маркируют по составу: АК7М2; АК21М2, 5Н2,5; АК4МЦ6. В этом случае "М" обозначает медь, "К" - кремний, "Ц" - цинк, "Н" - никель; цифра - среднее % содержание элемента.

Из алюминиевых антифрикционных сплавов (ГОСТ 14113-78) изготавливают подшипники и вкладыши как литьем так и обработкой давлением. Такие сплавы маркируют буквой "А" и начальными буквами входящих в них элементов: АО9-2, АО6-1, АН-2,5, АМСТ. В первые два сплава входят в указанное количество олова и меди (первая цифра-олово, вторая-медь в %), в третий 2,7-3,3% Ni и в четвертый медь сурьма и теллур.

Титан и его сплавы. Титан - тугоплавкий металл с невысокой плотностью. Удельная прочность титана выше, чем у многих легированных конструкционных сталей, поэтому при замене сталей титановыми сплавами можно при равной прочности уменьшить массу детали на 40%. Титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается, из него можно изготовить сложные отливки, но обработка резанием затруднительна.

Для получения сплавов с улучшенными свойствами его легируют алюминием, хромом, молибденом. Титан и его сплавы маркируют буквами "BT" и порядковым номером: BT1-00, BT3-1, BT8, BT14. Пять титановых сплавов обозначены иначе: OT4-0, OT4, OT4-1, ПТ-7М, ПТ-3В.

Магний и его сплавы. Среди промышленных металлов магний обладает наименьшей плотностью (1700 кг/м³). Магний и его сплавы неустойчивы против коррозии, при повышении температуры магний интенсивно окисляется и даже самовоспламеняется. Он обладает малой прочностью и пластичностью, поэтому как конструкционный материал чистый магний не используется.

Для повышения химико-механических свойств в магниевые сплавы вводят алюминий, цинк, марганец и другие легирующие добавки. Магниевые сплавы подразделяют на деформируемые (ГОСТ 14957-76) и литейные (ГОСТ 2856-79). Первые маркируются буквами "МА", вторые "МЛ". После букв указывается порядковый номер сплава в соответствующем ГОСТе. Например: МА1 - деформируемый магниевый сплав №1; МЛ19 -литейный магниевый сплав №19.

2. РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

- Уясните цель работы.
- Ознакомьтесь с принципами маркировки различных материалов.
- Расшифруйте марки сплавов которые выданы преподавателем.

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- Чем отличается сталь обыкновенного качества от качественной?
- Опишите принципы маркировки легированных сталей?
- Чем отличаются цементуемые стали от улучшаемых?
- У каких сталей правила маркировки отличаются от общепринятых?
- Как разделяют чугуны и как их маркируют?

- Какие бывают медные сплавы и как их обозначают?
- Как подразделяют и обозначают алюминиевые сплавы?
- Каковы особенности титановых сплавов?
- Каковы свойства и область применения магниевых сплавов?

4. РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуляев А.П. Металловедение. - М.: Металлургия, 1986. - 544 с.
2. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. - М.: Металлургия, 1984. - 360 с.
3. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А.С. Зубченко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2003. - 782 с.
4. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В.Г. Сорокина. - М.: Машиностроение, 1989. - 639 с.