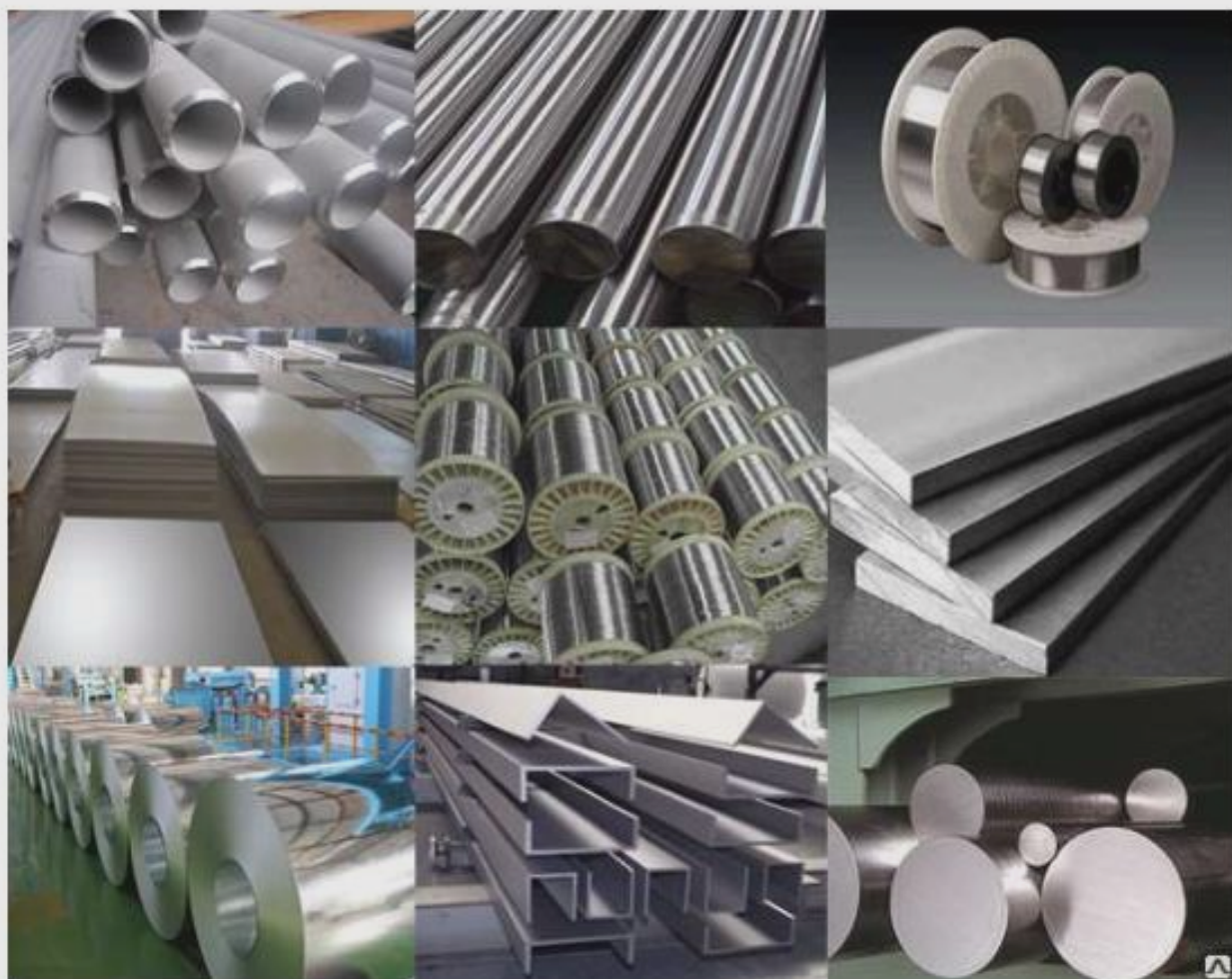


Ю.В. Долгачев, В.Н. Пустовойт

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ



Ростов-на-Дону
2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Ю.В. Долгачев, В.Н. Пустовойт

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Учебное пособие

Ростов-на-Дону
ДГТУ
2023

УДК 54.06:54.08

Д64

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *В.А. Кохановский*
(Ростовский государственный университет путей сообщения);

доктор технических наук, профессор *С.Н. Егоров*
(Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова)

Долгачев, Юрий Вячиславович.

Д64

Методы определения состава металлических сплавов :
учебное пособие / Ю.В. Долгачев, В.Н. Пустовойт ; Донской
государственный технический университет. – Ростов-на-Дону :
ДГТУ, 2023. – 57 с.

ISBN 978-5-7890-2113-2

Кратко изложены основные теоретические положения в рамках учебного курса «Методы анализа состава материалов», касающиеся практических методов определения химического и фазового состава металлических материалов.

Предназначено для обучающихся по направлениям подготовки «Материаловедение и технологии материалов», «Наноинженерия», «Металлургия», также будет полезно также магистрантам и аспирантам, специализирующимся в области материаловедения.

УДК 54.06: 54.08

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Донского государственного технического университета

ISBN 978-5-7890-2113-2

© Долгачев Ю.В., Пустовойт В.Н., 2023
© Донской государственный
технический университет, 2023

Предисловие

Триада «состав – структура – свойства» является главной основой материаловедения – науки, которая должна определять взаимосвязи между указанными компонентами триады. Изменение концентрации некоторых элементов даже на сотые доли процента может вызвать такое изменение свойств материала, которое переопределяет его эксплуатационное и функциональное назначение.

Важность определения состава материалов выражается в широком разнообразии разработанных методов анализа химического и фазового состава материалов.

Особенностью данного учебного пособия является его ориентированность на рассмотрение методов анализа, практически используемых в физическом материаловедении.

Выбранная тематика разделов определяется имеющимся на кафедре «Материаловедение и технологии металлов» оборудованием, которое используется в непосредственной научной и образовательной практике материаловедения.

Введение

С легкой руки Архимеда (в III веке до нашей эры) определение состава сплава по его удельному весу (или плотности) стало довольно распространенным приемом. К сожалению, у него немало недостатков. Необходимо знать, из каких именно металлов состоит сплав и какова зависимость плотности от состава (а это далеко не всегда прямая линия). Но самое главное, что чувствительность метода зависит от разности плотностей металлов, составляющих сплав. Когда плотности сплавляемых элементов близки, метод Архимеда оказывается практически бессильным.

Самые первые, относительно точные, методы определения состава сплавов возникли благодаря развитию химии. Начиная примерно с конца XIV века для разделения золота и серебра стала широко применяться азотная кислота, в которой серебро растворялось, а золото нет. Таким образом, компонент оказывался выделенным из сплава за счет характерной для него химической реакции. Этот метод был систематизирован в конце XVIII века в работах шведского химика Торберна Бергмана. В них предлагалось переводить исследуемое вещество в растворенное состояние, а затем проводить избирательное осаждение разных компонентов с помощью характерных для них реактивов. В частности, Бергман подробно описал методы определения большинства известных тогда металлов – золота, серебра, платины, ртути, свинца, меди, железа, олова, висмута, никеля, кобальта, цинка, сурьмы и марганца.

За два века методы «мокрой химии» серьезно усовершенствовались. Они широко применяются сегодня и позволяют не только установить, какие элементы присутствуют в образце (качественный анализ), но и определить концентрацию (относительное количество) каждого из них (количественный анализ). Для этого достаточно взвесить выделенный с помощью реактива осадок и, зная его химическую формулу, найти массу интересующего нас элемента.

У «мокрой химии» имеется существенный недостаток: анализ удобно проводить, когда хотя бы примерно ясно, что надо искать. К счастью, со времени Бергмана арсенал методов аналитической химии существенно пополнился. Одним из наиболее ценных приобретений стал спектральный анализ.

Профессор химии Гейдельбергского университета Роберт Бунзен изучал горение некоторых веществ. Он заметил, что соли металлов окрашивают пламя в различные цвета. Вскоре отчетливо выявилась закономерность. Один и тот же металл всегда окрашивал пламя в определенный цвет, независимо от того, в каком виде сжигался. Например, от бария пламя зеленело, а от натрия желтело.

Бунзен прекрасно понял значение своего открытия. Его можно было использовать для определения элементов, присутствовавших в образце. Практический путь реализации проекта был, однако, не ясен. Ведь если образец состоит из нескольких компонентов, то цвет у пламени получается сложный: всех нюансов не различишь. Нужна была еще одна идея, чтобы открытие смогло заявить о себе «во весь голос». Ее подал и реализовал знаменитый немецкий физик Густав Кирхгоф, с которым Бунзена связывала многолетняя дружба.

Вспомните, как призма разлагает солнечный свет на спектр. Именно это и предложил использовать Кирхгоф. Вместо самого пламени следовало рассматривать его спектр, где каждому цвету была отведена своя отдельная «территория». Все оттенки пламени оказывались разделенными и наблюдались без малейших усилий. Более того, Кирхгоф из подручных средств самостоятельно сконструировал прибор – спектроскоп, который позволял разложить пламя на составные части и наблюдать их.

Спектр каждого элемента состоял из специфически расположенных линий разного цвета. Например, для натрия самыми характерными были две яркие желтые линии, которые Кирхгоф быстро заметил в свой прибор. Они появлялись всегда, в каком бы виде ни сжигался натрий. Спектры двух различных элементов спутать было невозможно. Поэтому для определения химического состава оставалось только затабулировать длины волн (или по крайней мере цвета и характерное расположение) основных линий спектра всех известных элементов, с которыми впоследствии следовало сравнивать спектр исследуемого образца.

Технически спектральный анализ проводится по-разному, но всегда предусматривается осуществление двух важнейших этапов – возбуждения спектра и его регистрации. В опытах Бунзена спектр возбуждался пламенем горелки. Но существуют и совершенно другие пути – бомбар-

дировка электронами, облучение и т. д. И совсем необязательно регистрировать видимую часть спектра. Допустимо пользоваться любым другим диапазоном длин волн – ультрафиолетовым, инфракрасным и т. д. Лишь бы имелась возможность зафиксировать спектр и сравнить его с табличными данными.

С помощью спектральных методов проводят не только качественный, но и количественный анализ: устанавливают концентрацию разных элементов в образце. Кстати, ее совершенно необязательно выражать именно в массовых процентах (как это делал еще Архимед). Сегодня часто пользуются атомными процентами (или долями). В этом случае концентрация равна отношению числа атомов данного элемента к общему числу атомов.

Количественный спектральный анализ основан на простой закономерности: чем больше в образце атомов данного элемента, тем интенсивнее проявляются его линии. А интенсивность можно измерить, например, по степени почернения фоточувствительной пластинки. Необходимым условием количественного анализа является знание зависимости интенсивности от концентрации. Ее строят, пользуясь эталонами, т. е. образцами с заранее известной концентрацией анализируемого элемента. Колоссальным преимуществом спектрального анализа является быстрота его проведения. На современных компьютеризованных установках определение состава образца – буквально минутное дело.

На практике очень часто применяют комбинацию разных методов. Например, сначала проводят качественный спектральный анализ и устанавливают, какие элементы присутствуют в образце, а уж затем обращаются к «мокрой химии».

Помимо упомянутых нами существует множество других методов анализа. К какому из них прибегнуть, зависит от объекта исследования и имеющегося в наличии оборудования.

1. ОСНОВЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ АТОМОВ

1.1. Физические основы спектрального анализа

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.

Шкала деления электромагнитного излучения по длинам волн и соответствующие им методы спектрометрии приведена на рис. 1.1.

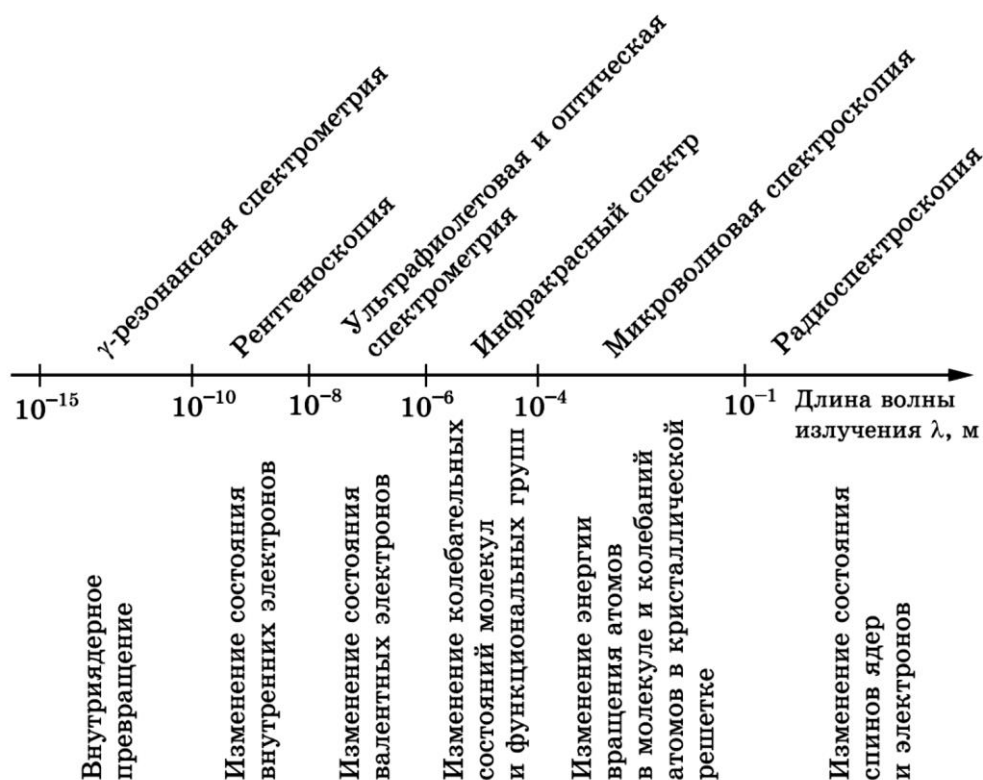


Рис. 1.1. Схема деления электромагнитного излучения по длинам волн и соответствующие им методы спектроскопии

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 затрагивая ядра. *Рентгеноскопия* изучает взаимодействие 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 фиксации 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*.

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 составах 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. 1.2).

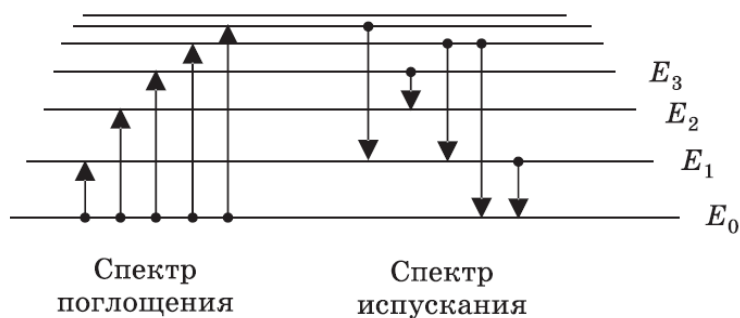


Рис. 1.2. Схема расположения энергетических уровней в атоме

На рис. 1.2 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 называют последними, так как при уменьшении концентрации элемента они исчезают в спектре последними.

Метод атомно-эмиссионной спектроскопии позволяет проводить многокомпонентный анализ пробы при содержании примесного элемента до 10^{-6} % масс. Верхняя граница определяемого содержания – до нескольких десятков процентов. Метод экспрессен, 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.

1.2. 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 (рис. 1.3).

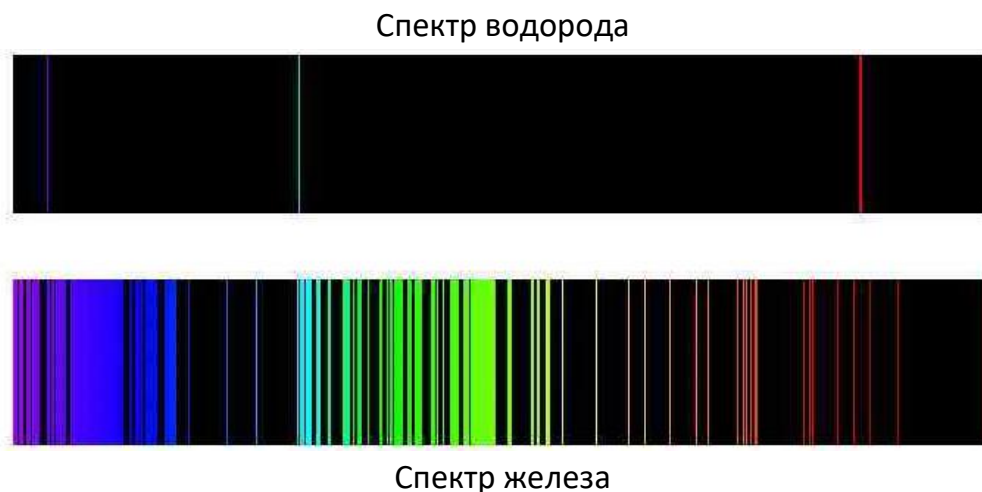


Рис. 1.3. Спектры атомов водорода и железа

Расположение линий в атомарном спектре водорода описывается формулой Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (1.1)$$

где λ – длины волн; 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):

$$V = \frac{1}{\lambda} \text{ (см}^{-1}\text{)}. \quad (1.2)$$

Тогда формула (1.1) перепишется

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

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

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

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

где n , пробегая значения $1, 2, 3, \dots, \infty$, обозначает номер энергетического уровня. Согласно этим представлениям, целые числа n и m в серийной формуле (1.1) – 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. 1.4.

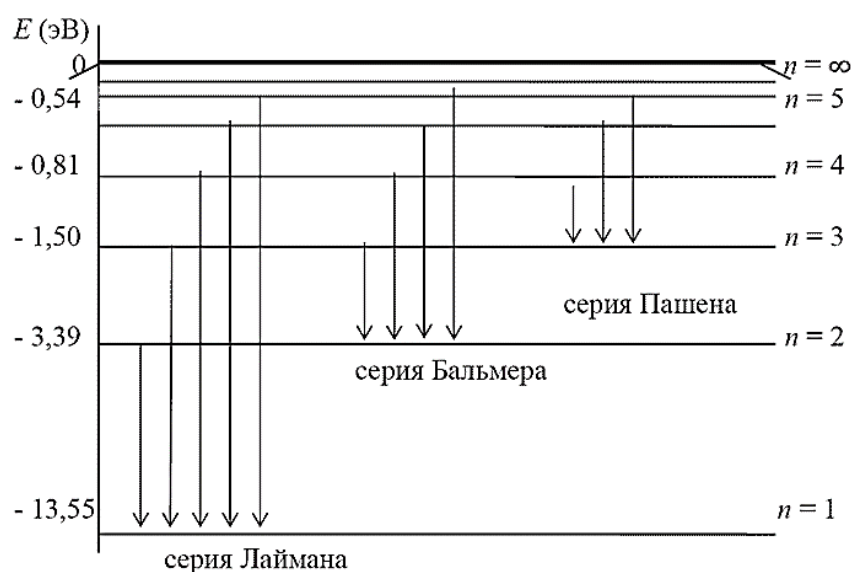


Рис. 1.4. Схема энергетических уровней атомов водорода

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, $n = 1$:

$$V = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2}\right); \quad (1.3)$$

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

$$V = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right); \quad (1.4)$$

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

$$V = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2}\right). \quad (1.5)$$

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

Отдельно изучим 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 (1.4) вычисляется постоянная Ридберга для каждой измеренной спектральной линии. После этого находят среднее значение этой константы.

Согласно теории Бора, постоянная Ридберга равна

$$R = \frac{e^4 \cdot m}{8\epsilon_0^2 h^3 c}, \quad (1.6)$$

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.

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

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

2. ВИЗУАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ СТИЛОСКОПИРОВАНИЯ

2.1. Сущность метода стилоскопирования

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), предназначен для качественного и полуколичественного анализов. По характеру излучения (длине волн), а также с помощью таблиц можно определить наличие того или иного элемента, присутствие которого в светящихся парах становится несомненным. Количественный ана-

лиз 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.

2.2. Особенности работы на стилоскопе

Стилоскоп СЛ-11А предназначен для экспрессных анализов сталей и цветных сплавов, к точности которых не предъявляется 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.

Оптическая схема представлена на рис. 2.1. 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 выравнивать интенсивности аналитических линий, что упрощает проведение количественного анализа. Более точно сравнивать интенсивность спектральных линий позволяет фотометр, которым снабжены такие спектрометры, как стилометры.

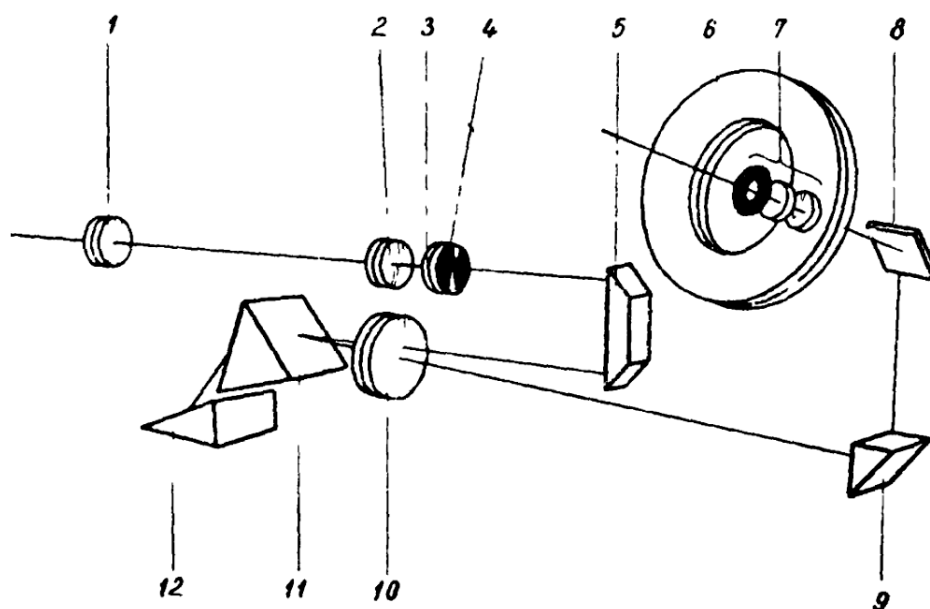


Рис. 2.1. Оптическая схема стилоскопа

Стилоскоп состоит из следующих составных частей (рис. 2.2): 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.

Диспергирующая система состоит из двух призм (см. рис. 2.1): 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. рис. 2.2), 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.

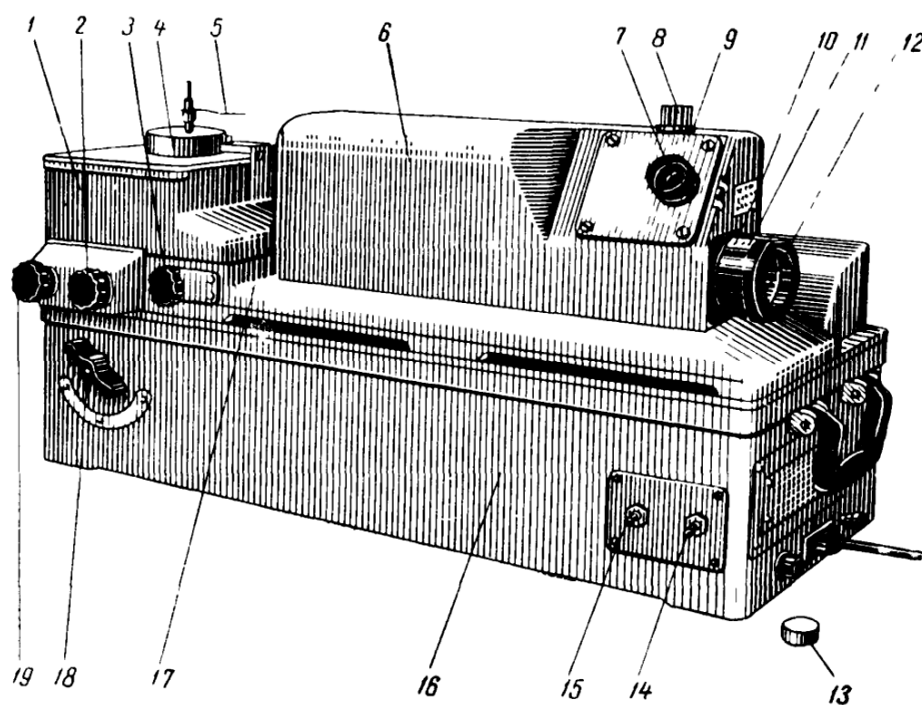


Рис. 2.2. Устройство стилоскопа

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 маховичком 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 приготовленную 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).

Рассмотрим пример определения концентрации элементов с использованием атласа спектров: запись $0,3 \% - 1\text{CrVII} = 1$ расшифровывается следующим образом: если первая линия хрома (седьмой группы по интенсивности) равна первой стандартной линии железа, то имеем $0,3 \% \text{ Cr}$ 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: $0,3 \% - 3\text{MnIII} \leq 1; 2\text{MnIII} > 1$ означает, что, если третья линия марганца (в третьей группе для определения марганца) имеет яркость немного меньше первой линии железа, а вторая линия марганца по интенсивности превосходит ту же линию железа, то в стали содержание марганца составляет $0,3 \%$.

3. ОПТИКО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ

3.1. Оптико-эмиссионный анализатор

3.1.1. 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.

3.1.2. 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 полученных 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. 3.1).

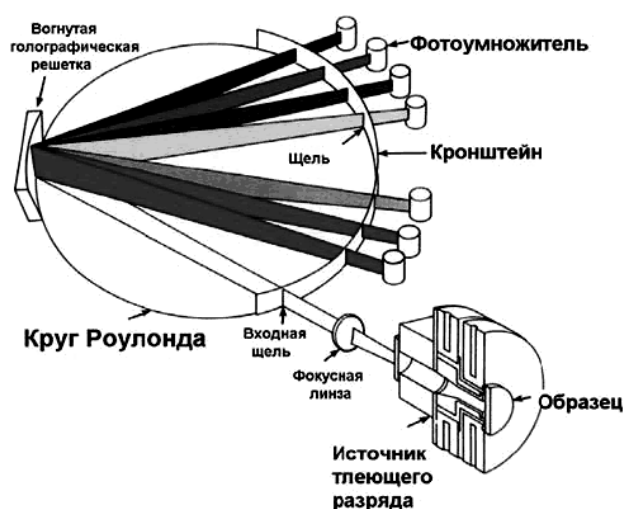


Рис. 3.1. Оптическая система по схеме Пашена-Рунге

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 спектрометры 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.

3.1.3. Установка Magellan Q8

Оптико-эмиссионный анализатор с вакуумной оптикой Qantron Magellan фирмы Bruker (Magellan Q8) (рис. 3.2) 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.



Рис. 3.2. Установка Magellan Q8

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

3.2. Особенности работы на установке Magellan Q8

3.2.1. 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 использованием эмульсионных масел.

3.2.2. 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.

3.2.3. 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).

3.2.4. 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, однако надо учитывать, что образец не должен нагреваться выше 60°C, а также что в следствии прожига удаляется часть материала образца и от прожига к прожигу меняется расстояние до электрода.

4. РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИФРАКТОМЕТРИЯ

С момента открытия дифракции рентгеновских лучей по настоящее время разработано множество методов измерения дифракционных картин и способов их анализа. В практике научно-исследовательских лабораторий широкое применение находят рентгеновские дифрактометры – приборы, в которых регистрация дифракционной картины (рис. 4.1) производится с помощью счетчиков (пропорциональных, сцинтилляционных и полупроводниковых).

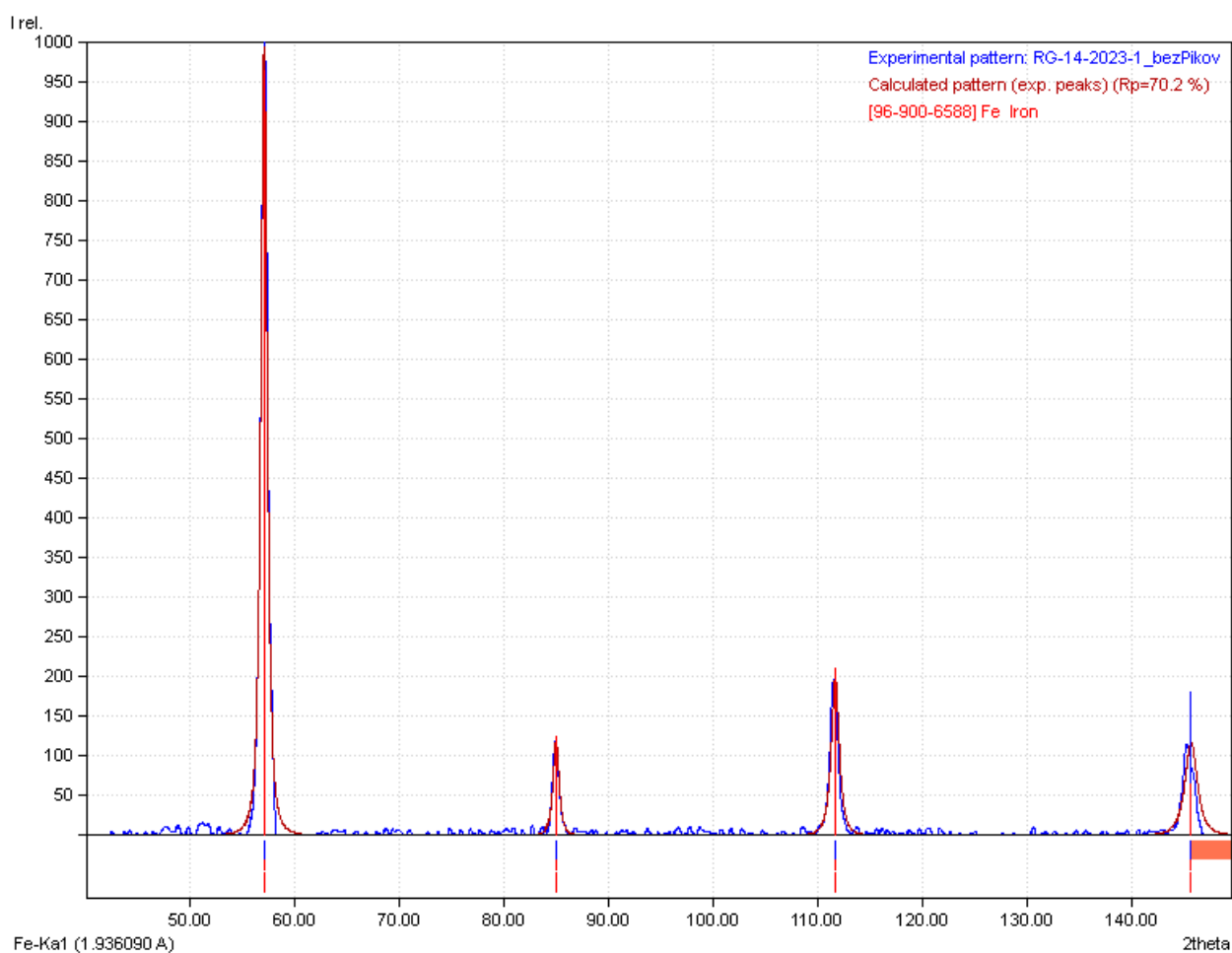


Рис. 4.1. Анализ дифрактограммы чистого железа

Дифрактометры используют характеристическое (или монохроматическое) излучение какого-либо источника (рентгеновская трубка, синхротронное излучение, изотопный источник). Помимо источника в состав таких дифрактометров входят исследуемый образец, закрепленный

на специальном держателе, какой-либо рентгеновский детектор (счетчик), измеряющий интенсивность рассеянного образцом излучения, и специальное устройство, называемое рентгеновским гониометром (ГУР), позволяющее производить синхронный поворот образца и счетчика с автоматической записью распределения интенсивности по углам дифракции. Методы монократической дифрактометрии делятся на методы дифрактометрии монокристаллов и поликристаллов (метод порошков). В обоих случаях измеряется угловая дисперсия рассеяния рентгеновских лучей исследуемыми образцами, но вид получающихся дифракционных картин существенно отличается, как и отличается методика обработки экспериментальных данных.

Качественный рентгеновский фазовый анализ (РФА) включает сравнение дифракционного спектра от неизвестного материала со спектрами однофазных образцов (эталонов). Основная концепция качественного РФА остается неизменной с начала использования этого метода. Используемая база данных представляет собой набор спектров однофазных образцов в виде таблиц межплоскостных расстояний d и отвечающих им относительных интенсивностей I/I_1 . Информация о каждом соединении содержит, по крайней мере, таблицу пар $d-I$, химическую формулу, название соединения, идентификационный номер и ссылку на первичный источник информации. Дополнительно могут быть указаны индексы Миллера для всех рентгеновских линий, параметры элементарной ячейки, физические свойства вещества, условия его получения (синтеза) и некоторая другая информация. База данных распространяется и поддерживается международным центром по дифракционным данным, расположенным в Свартморе, США.

Широкое внедрение компьютерной техники в процесс сбора и обработки дифракционных данных привело к повышению точности определения межплоскостных расстояний, что приводит к необходимости постоянного улучшения эталонных спектров.

База данных дифракционных спектров (Powder Diffraction File, PDF) распространяется как в полном виде (PDF-2), занимая при этом объем более 300 Мб, так и в усеченном варианте (PDF-1) объемом порядка 5 Мб. В таком виде в базе содержится только таблица межплоскостных расстояний и относительных интенсивностей, идентификационный номер фазы, химическая формула, метка достоверности данных

и так называемое корундовое число. Ведутся работы по разработке и внедрению следующего поколения базы данных – PDF-3, в которой будет представлена наиболее полная информация обо всех кристаллических фазах (без ограничений на объем).

Для автоматизации проведения качественного РФА разработан целый ряд компьютерных программ, существенно упрощающих применение этого метода.

Как качественный, так и количественный фазовый анализ базируется на точном определении положения и интенсивности линий дифракционных спектров. Дифракционная картина многофазного поликристаллического образца является суперпозицией дифракционных спектров всех фаз, входящих в состав образца. Таким образом, проведение фазового анализа сводится к сравнению дифракционной картины образца с дифракционными спектрами возможных фаз (эталонов). Проблема выбора эталонов (метод внешнего и внутреннего стандарта) связана с определенными трудностями, особенно для деформированных материалов, так как текстурированность значительно искажает дифракционный спектр и может привести к исчезновению некоторых линий.

При проведении качественного РФА необходимо учитывать химический состав образца, поскольку существует довольно много соединений, имеющих практически одинаковые спектры.

Количественный рентгеновский фазовый анализ основан на зависимости интенсивности дифракционного отражения от содержания C_i соответствующей фазы. Сравнивая экспериментальные значения I_{hkl} с эталонными и вводя необходимые поправки, можно определять содержание фазы C_i . Существует довольно много методов количественного РФА, все они базируются на предварительной съемке эталонных веществ.

5. МАГНИТНЫЙ ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ

В практике магнитного структурного анализа широкое распространение получили магнитные структурно-нечувствительные характеристики при качественном и количественном определениях фазового состава сталей и сплавов, при оценке изменений, происходящих в фазовом составе в результате различных термических или деформационных воздействий, при исследованиях кинетики фазовых превращений, а также при определении концентрации магнитной фазы в неферромагнитных материалах, объема пор и неферромагнитных включений в ферромагнитной матрице. Использование методов магнитного фазового анализа иногда является предпочтительным, поскольку они обладают высокой точностью, достаточной экспрессностью, бесконтактным съемом информации и в ряде случаев позволяют получить более достоверные сведения о фазовых превращениях. Например, в деформированных железоникелевых сплавах вследствие дилатометрической аномалии магнитные методы имеют преимущество перед дилатометрическими.

5.1. Используемые магнитные характеристики

Для фазового магнитного анализа можно использовать магнитные характеристики, значения которых определяются физическими свойствами фаз независимо от их структурного состояния. К числу таких магнитных параметров относят константы естественной кристаллографической анизотропии K , температуру Кюри T_c и намагниченность насыщения M_s . Информацию об изменениях фазового состава можно получить при проведении термомагнитного анализа из сравнения зависимостей $K = f(T)$ и $M_s = f(T)$. Для фазового экспресс-анализа относительно тонких поверхностных слоев или изделий, имеющих одинаковый состав фаз на поверхности и в сечении, можно применять метод термоЭДС. Возможность использования термоЭДС для фазового анализа подтверждается тем, что для многих марок сталей изменения намагниченности и термоЭДС при вариациях температуры закалки и отпуска имеют эквидистантный характер.

Для получения достоверной информации при фазовом анализе необходимо знать, как влияют на выбранные физические параметры форма выделений, степень дисперсности и напряженное состояние исследуемой фазы. Теоретические и экспериментальные данные показы-

вают, что упругие деформации, форма выделений и степень дисперсности неферромагнитной фазы при правильном выборе намагничивающего поля слабо влияют на значения намагниченности насыщения и температуры Кюри. Так, для железа и никеля при комнатной температуре изменение намагниченности насыщения под действием напряжений составляет $0,1 - 2 \text{ A}/(\text{МПа} \cdot \text{см})$, а положение точки Кюри изменяется на $10^{-3} - 10^{-2} \text{ }^\circ/\text{МПа}$. Существенные изменения M_s и T_c при наличии напряжений будут свидетельствовать о переходе ферромагнетика из области упругой деформации в область пластической.

Для неферромагнитных сплавов в качестве параметра магнитного фазового анализа используют парамагнитную восприимчивость. Если известны значения парамагнитной восприимчивости исходных фаз, то можно определить состав двухфазного сплава, поскольку парамагнитная восприимчивость является линейной функцией его состава.

Для качественного магнитного анализа многофазных систем применяют магнитно-металлографический метод, сущность которого заключается в следующем. Ферромагнитная фаза, находящаяся в парамагнитной матрице, имеет магнитные поля рассеяния, вызванные появлением магнитных зарядов на границах раздела фаз. При нанесении на тщательно отполированную поверхность металла магнитной суспензии, которая применяется для наблюдения доменной структуры, магнитные частички, находящиеся в суспензии во взвешенном состоянии, под действием пондеромоторных сил смещаются и оседают в местах, соответствующих наибольшему градиенту магнитного поля, отмечая тем самым расположение ферромагнитных фаз в парамагнитной матрице. Первоначально этот метод был предложен для обнаружения α -фазы в аустенитных сталях, а затем был использован для регистрации остаточного аустенита в инструментальных сталях. Магнитно-металлографический метод целесообразно применять (в сочетании с другими методами) для определения остаточного аустенита в многофазных сплавах.

5.2. Методы фазового магнитного анализа

При проведении фазового анализа используют разные методы; каждый основан на измерении конкретного физического параметра (иногда набора физических параметров). Чаще всего применяют три типа измерительных схем: баллистические, пондеромоторные, магнитометрические. Для решения задач физического металловедения, связанных, например, с исследованием распада переохлажденного аустенита,

больше подходят пондеромоторные и магнитометрические методы, которые позволяют проследить кинетику распада переохлажденного аустенита как в изотермических условиях, так и при охлаждении с разными скоростями.

Для количественного определения фазового состава сталей (например, остаточного аустенита), с большой долей ферромагнитной составляющей можно использовать баллистический метод. Распространенным методом измерения намагниченности насыщения является метод Штеблея, в соответствии с которым магнитный поток измеряют при удалении исследуемого образца из межполюсного пространства через канал, просверленный в полюсах электромагнита. Чаще всего используют дифференциальную схему измерения. Стандартный и исследуемый образцы закрепляют встык в неферромагнитном держателе, который перемещают при измерении в канале электромагнита. Между полюсами электромагнита размещают две измерительные катушки. Катушки включаются так, чтобы индуцируемые в них токи были противоположны по направлению. Подобная конструкция позволяет уменьшить влияние колебаний тока в цепи электромагнита на результаты измерений. При достаточно большой разности витков в катушках можно проводить исследования, связанные с небольшими изменениями намагниченности, например, в области парапроцесса.

При проведении фазового магнитного анализа необходимо, чтобы приложенное магнитное поле было достаточным для достижения состояния намагниченности насыщения всех ферромагнитных фаз в исследуемом образце. Величина внутреннего магнитного поля, необходимого для достижения намагниченности насыщения, зависит от коэффициента размагничивания образца, внутреннего коэффициента размагничивания отдельных фаз и структурных составляющих стали.

5.3. Качественный и количественных фазовый анализ сталей

Температура Кюри – одна из важных магнитных характеристик, зависящих от химического и фазового составов ферромагнитных материалов. Переход от магнитного порядка к магнитному беспорядку при температуре Кюри не сопровождается ни химическими изменениями, ни изменениями в кристаллической структуре вещества и относится к фазовым переходам II рода. Наличие в сплавах двух и более ферромагнитных фаз может быть зарегистрировано путем измерения температуры Кюри каждой из них. Такой метод определения числа ферромагнитных фаз в сталях и сплавах нашел широкое применение.

Для получения полной информации о числе ферромагнитных фаз и об их объемном соотношении чаще всего используют магнитограммы – зависимость намагниченности насыщения от температуры. Простейшими являются магнитограммы одно- и двухфазных сплавов, содержащих ферромагнитную и неферромагнитную фазы. Стали, содержащие две ферромагнитные фазы, имеют две точки Кюри, характеризующие каждую из фаз, а намагниченность стали определяется суммой намагниченностей каждой из фаз. Анализируя кривые $M_s(T)$, можно установить число ферромагнитных фаз в сплаве, температуру Кюри каждой из них и, если имеется достаточно сведений о магнитных свойствах отдельных фаз, количество каждой фазы в стали или сплаве (рис. 5.1).

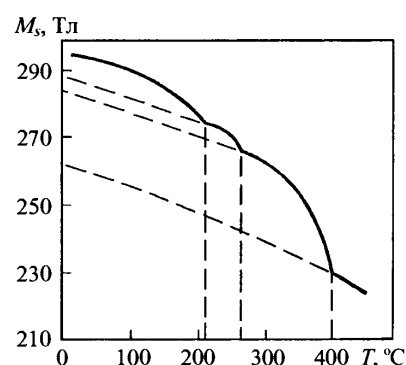


Рис. 5.1. Магнитограмма стали У12

Зная удельные намагниченности $J_s = M_s/V$ и $\sigma_s = M_s/m$, можно определить плотность магнитных фаз, входящих в состав стали (сплава), без их выделения:

$$\rho = J_s/\sigma_s = m/V. \quad (5.1)$$

Физической предпосылкой проведения количественного фазового магнитного анализа по намагниченности насыщения является выполнение закона аддитивности M_s для гетерогенных систем. С учетом объемной доли каждой фазы и ее намагниченности, закон аддитивности намагниченности насыщения можно выразить следующим образом:

$$M_s = \sum_i \frac{P_i}{100\%} M_{si}, \quad (5.2)$$

где P_i – объемная доля i -й фазы, %; M_{si} – намагниченность насыщения i -й фазы.

В ферромагнитных сталях помимо ферромагнитных фаз могут присутствовать диа- и парамагнитные фазы. Однако в практических расчетах намагниченность этих фаз не учитывается, поскольку их вклад очень мал.

Закон аддитивности неоднократно проверялся исследователями на различных многофазных ферромагнитных системах. Он оказался справедлив как при комнатной температуре, так и при температурах, отличных от комнатной, только в последнем случае следует учитывать характер изменения намагниченности насыщения каждой фазы от температуры.

Фазовый магнитный анализ широко применяют при определении количества остаточного аустенита в сталях. Метод измерения количества остаточного аустенита является относительным, так как намагниченность насыщения исследуемого образца сравнивается с намагниченностью насыщения стандартного образца. Выбор стандартного образца играет важную роль в точности определения количества остаточного аустенита магнитными методами. Наиболее простой является система, содержащая только одну парамагнитную фазу. Примером такой системы может служить широкий класс закаленных углеродистых сталей и некоторые легированные стали, в которых при нагреве под закалку практически все карбиды растворяются. Для сталей такого типа в качестве стандартного образца желательно использовать образец с полностью (100 %) мартенситной структурой.

Объемную долю аустенитной фазы можно вычислить следующим образом:

$$P_A = 100\% - P_M = \left(1 - \frac{M_s}{M_{SM}}\right) 100\%. \quad (5.3)$$

При вычислении процентного количества остаточного аустенита сравнивают намагниченности насыщения исследуемого образца, содержащего мартенсит и остаточный аустенит, и образца со 100 %-ной мартенситной структурой. Однако образец со 100 %-ной мартенситной структурой получить практически невозможно. Поэтому приходится подбирать стандартный образец, который по своему структурному состоянию и химическому составу идентичен образцу со 100 %-ной мартенситной структурой. Точность определения количества остаточного аустенита в этом случае зависит от того, насколько близок к 100 %-ной мартенситной структуре стандартный образец. Для этих целей используют обработку холодом, но даже при таком виде обработки в средне- и высокоуглеродистых сталях сохраняется до 6 % остаточного аустенита. В тех случаях, когда количество остаточного аустенита в исследуемой стали мало, погрешность его определения при использовании данного стандартного образца будет велика и при расчетах можно получить отрицательное значение.

Для низкоуглеродистых и слаболегированных сталей в качестве материала для стандартного образца можно использовать АРМКО-железо, так как небольшое различие в содержании углерода и легирующих элементов в стандартном и исследуемом образцах мало сказывается

на намагниченности насыщения сталей этого класса. Для высокоуглеродистых и высоколегированных сталей подобный стандартный образец обычно не применяется, потому что углерод, хром, марганец, кремний, ванадий при растворении в α -Fe значительно снижают его намагниченность насыщения.

Для определения количества остаточного аустенита в низкоуглеродистых и малолегированных конструкционных сталях в качестве стандартного можно использовать образец из исследуемой стали со структурой феррита отжига и с намагниченностью насыщения. В высоколегированных сталях с карбидообразующими элементами, легко растворяющимися в цементите (Mn, Cr) или образующими специальные карбиды (V, W, Ti и др.), мартенсит закалки и феррит отжига будут отличаться не только по концентрации углерода, но и по концентрации легирующих элементов, вследствие чего различие в значениях намагниченности этих фаз может быть довольно значительным.

Приближение будет более точным, если брать ферритный стандартный образец, содержащий то же количество легирующих элементов, что и мартенсит закалки испытуемого образца. При одинаковом содержании легирующих элементов на намагниченность испытуемого образца влияет различие концентрации углерода в них, при этом чем ниже содержание углерода в испытуемой стали, тем выше точность определения количества остаточного аустенита. Значение намагниченности насыщения ферритного стандартного образца, легированного одним элементом, можно рассчитать на основании существующих литературных данных о влиянии этого элемента на намагниченность насыщения ферритной фазы.

В практике фазового магнитного анализа для исключения влияния остаточного аустенита стандартных образцов используют образцы той же марки стали, закаленные на структуру мартенсита и отпущенные при высокой температуре. Однако в результате образования карбидов при отпуске намагниченность насыщения стандартного образца будет снижаться, поэтому точность определения количества остаточного аустенита в исследуемой стали будет зависеть от объема карбидной фазы и ее намагниченности в стандартном образце.

При выборе стандартного образца для систем с двумя и большим числом парамагнитных фаз возникают еще большие трудности. В высокоуглеродистых и высоколегированных инструментальных сталях после

закалки, кроме мартенсита и остаточного аустенита, присутствуют карбиды – в зависимости от степени легирования либо ферромагнитные, либо парамагнитные. При определении количества остаточного аустенита следует учитывать объем карбидной фазы и намагниченность насыщения карбидов, если карбидная фаза ферромагнитная.

Определить количество остаточного аустенита только магнитными методами невозможно. Для расчета остаточного аустенита необходимо использовать стандартный образец со 100 %-ной мартенситной структурой и найти объем карбидной фазы в стандартном образце другими методами. Точность определения аустенита в стали в значительной степени обусловлена точностью метода карбидного анализа. Обычно расчет аустенита в стали проводят методом последовательных приближений. Поскольку намагниченность насыщения стандартного образца зависит от содержания в твердом растворе углерода и легирующих элементов, при определении аустенита в сталях этого класса необходимо соблюдать следующие условия:

1. Стандартный и исследуемый образцы должны иметь одинаковое количество карбидов и одинаковую концентрацию углерода и легирующих элементов в твердом растворе. Для снижения количества остаточного аустенита в стандартном образце его подвергают обработке холодом. Например, при определении остаточного аустенита в стали ШХ15 в качестве стандартного берут изделие, подвергнутое закалке и последующей обработке холодом при $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это допустимо для сталей с высокой температурой начала мартенситного превращения, когда обработка холодом обеспечивает почти полное превращение аустенита. Кроме того, стандартный и исследуемый образцы должны иметь полную прокаливаемость.

2. Если первое условие не может быть выполнено, то учитывают снижение намагниченности насыщения в зависимости от содержания углерода и легирующих элементов в стали в соответствии с имеющимися литературными данными о влиянии углерода, вольфрама, хрома, кремния и других легирующих элементов на намагниченность насыщения. Количество карбидов определяют с помощью карбидного анализа. Кратко рассмотрев методы определения намагниченности насыщения систем с двумя парамагнитными фазами, видим, что задача эта непростая, но она еще более усложняется, если помимо парамагнитных карбидов в стали присутствуют и ферромагнитные карбиды. При достаточной идентичности ферромагнитных фаз и в предположении, что содержание

карбидной фазы в стандартном и исследуемом образцах одинаковое, вычисление количества остаточного аустенита в сталях можно осуществлять по приближенной формуле, степень приближения которой будет в основном определяться разницей объема карбидных фаз стандартного и исследуемого образцов:

$$P_A = \frac{M_{SM} - M_S}{M_{SM}} (100\% - P_K), \quad (5.4)$$

где P_K – объемная доля карбидной фазы в стандартном образце, %.

Рассмотренные методы измерения намагниченности насыщения и способы определения количества остаточного аустенита используют в основном в лабораторных условиях. Для решения промышленных задач неразрушающего определения количества остаточного аустенита в деталях применяют приборы и установки другого типа.

5.4. Контроль структуры и пористости изделий порошковой металлургии

Дифференциальные магнитные приборы получили распространение при определении пористости ферромагнитных материалов, а также при решении задач структуроскопии изделий из спеченных сталей. Физической предпосылкой определения пористости является то, что разность магнитных потоков, фиксируемая преобразователем дифференциального прибора, пропорциональна не только намагниченности исследуемой детали, но и объему ферромагнитной фазы в ней. Поскольку увеличение числа пор равносильно сокращению объема ферромагнитной фазы при прочих равных условиях, то по измеренному значению намагниченности насыщения можно оценить пористость в исследуемом материале.

По значению коэрцитивной силы (тока размагничивания) судят о структурном состоянии стали, а по значению индукции насыщения – о пористости изделия.

Таким образом, фазовый магнитный анализ, основанный на измерении структурно-нечувствительных характеристик ферромагнитных материалов, широко используется не только в исследовательской практике при решении задач физического металловедения, но и для неразрушающего определения фазового состава и пористости в промышленных изделиях. Сочетание при контроле фазочувствительных и структурно-чувствительных магнитных параметров позволяет определить качество спекания изделий порошковой металлургии.

6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕРЕОЛОГИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА МИКРОСТРУКТУРЫ

6.1. Основы стереологического анализа

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 Э 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

$$d_c = d_\alpha \Sigma V_\alpha + d_\beta \Sigma V_\beta + d_\gamma \Sigma V_\gamma, \text{ г/см}^3. \quad (6.1)$$

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

$$G_{\alpha} = \frac{d_{\alpha} \sum V_{\alpha}}{d_{\alpha} \sum V_{\alpha} + d_{\beta} \sum V_{\beta} + d_{\gamma} \sum V_{\gamma} + \dots} \cdot 100\% . \quad (6.2)$$

Многочлен в знаменателе формулы (6.2) 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:

$$G_{\alpha} = \frac{d_{\alpha} \sum V_{\alpha}}{d_c} \cdot 100\% . \quad (6.3)$$

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 (6.2) и (6.3), определяется выражением

$$\mathcal{E} = \frac{G_{\alpha} \cdot \mathcal{E}_{\alpha}}{100\%} . \quad (6.4)$$

Ниже приведены плотности (г/см³) некоторых структурных составляющих железоуглеродистых сплавов, которые могут быть использованы при расчетах по формулам (6.1)–(6.4): 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.

6.2. 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. 6.1, на котором 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. 6.1 заштрихована), при показанном положении линейки равна 42 делениям ($12+2+9+9$). Объемную долю i -той фазы в линейном методе определяют по формуле

$$V_{\alpha} = \sum_{i=1}^n \frac{l_{\alpha i}}{l}, \quad (6.5)$$

где $\sum_{i=1}^n \frac{l_{\alpha i}}{l}$ – суммарная длина отрезков, прохо-

дящих по α -фазе; l – длина базовой линии (в данном случае линейки окуляр-микрометра).

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

$$\varepsilon = K \cdot t(P, n-1) \sqrt{\frac{V_{\alpha}(1-V_{\alpha})}{n}}, \quad (6.6)$$

где n – число измеренных при анализе отрезков; K – коэффициент, 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

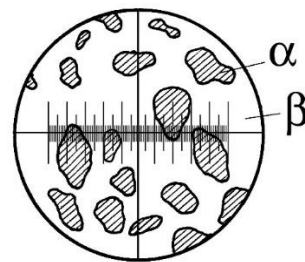


Рис. 6.1. Схема определения объемной доли α -фазы линейным методом

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. 6.2, 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. 6.2 заштрихованы). Объемная доля определяется соотношением

$$V_{\alpha} = \frac{n_{\alpha}}{n}, \quad (6.7)$$

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

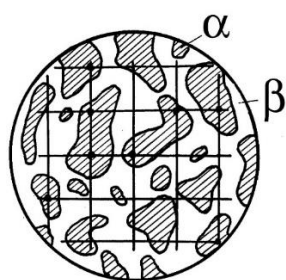


Рис. 6.2. Схема определения
 объемной доли α -фазы
 точечным методом

В примере, приведенном на рис. 6.2, 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.

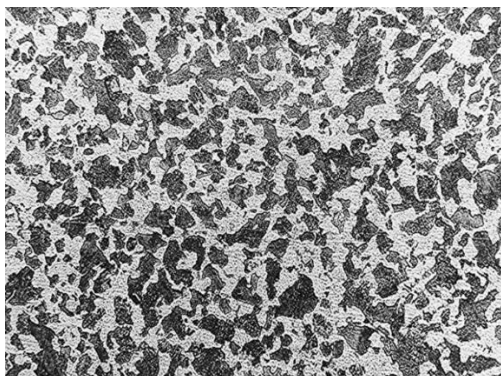
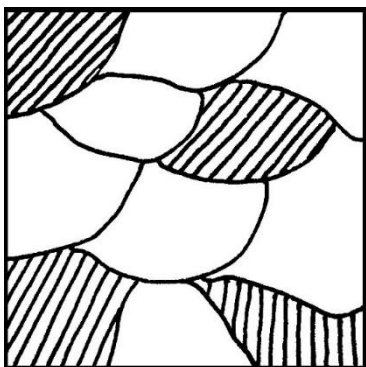
Точность точечного метода, обусловленная общим числом использованных точек, зависит от объемной доли исследуемой фазы или структурной составляющей и оценивается абсолютной ошибкой, вычисляемой по формуле

$$\varepsilon = t(P, n-1) \sqrt{\frac{V_{\alpha}(1-V_{\alpha})}{n}}. \quad (6.8)$$

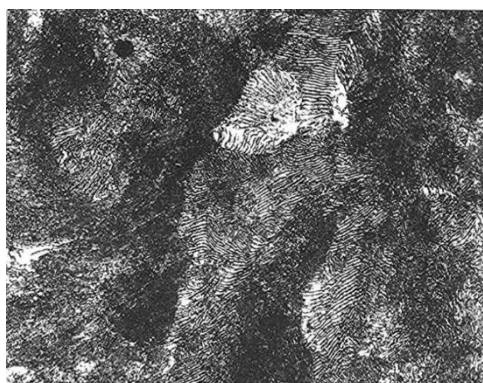
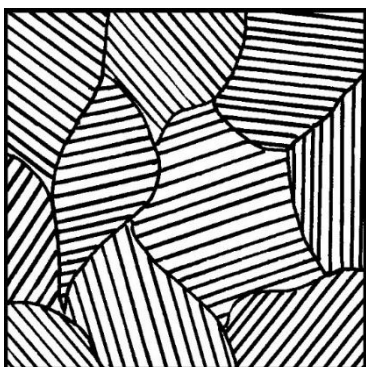
Располагая информацией об объемной доле структурных составляющих, можно, например, определить содержание углерода в отожденной углеродистой стали или в ферритном графитизированном чугуна.

7. ЭКСПРЕССНЫЙ МЕТОД МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В ОТОЖЖЕННЫХ СТАЛЯХ

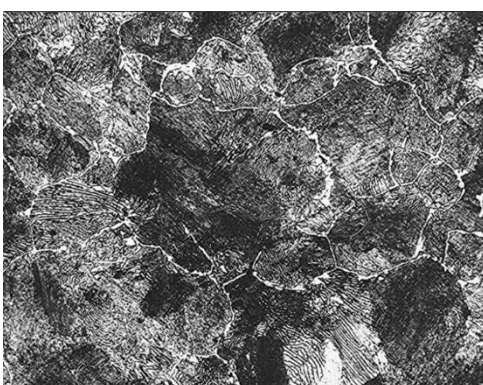
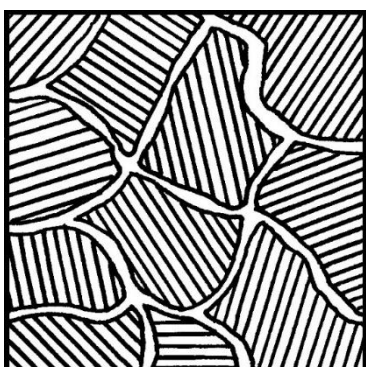
Если углеродистая сталь хорошо отожжена (рис. 7.1), т. е. приведена в равновесное состояние, то микроструктурным анализом можно определить содержание в ней углерода.



а)



б)



в)

Рис. 7.1. Микроструктура углеродистых сталей (слева – схематичное изображение, справа – фотография): *а* – доэвтектоидной; *б* – эвтектоидной; *в* – заэвтектоидной

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 %.

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА СПЛАВА С ПОМОЩЬЮ РАСШИФРОВКИ ЕГО МАРКИ

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.

8.1. 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 °С. 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.

8.2. Углеродистые инструментальные стали

В зависимости от химического состава углеродистая инструментальная сталь выпускается следующих марок (ГОСТ 1435-99):

- 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.

8.3. Легированные стали

Легированные конструкционные 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 цементируемой, т. е. подвергается химико-термической обработке.

Согласно ГОСТ 5950-2000 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 – сталь легированная конструкционная, цементируемая, 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 цементируемые, т.е. подвергаемые химико-термической обработке.

Цементируемые легированные стали – это низкоуглеродистые (до 0,3% углерода), низко- и среднелегированные стали марок 15Х, 20Х, 15Г, 20Г, 10Г2, 18ХГТ, 20ХГТ и др. Легированные цементируемые кон-

струкционные 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 30Х, 30Г, 35Х, 38ХА, 40Х, 50Х, 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.

Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали и сплавы – конструкционные материалы, которые сопротивляются химическому и электрохимическому воздействию окружающей среды. Хром и никель являются постоянными легирующими элементами при получении коррозионно-стойких сталей: 12Х12, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 08Х13, 12Х21Н5Т, Х28АН и др.

8.4. Легированные стали специального назначения

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

Рессорно-пружинная сталь ГОСТ 14959-2016 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, сто-

ящая 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 801-2022 (ШХ4, ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ). В маркировке этих сталей приняты следующие обозначения: буквы ШХ – шарикоподшипниковая хромистая, цифры показывают количество хрома в десятых долях процента; буквы С, Г – легирующие элементы (кремний и марганец).

8.5 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 шаровидным 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 (мелющие 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 легированных чугунов со специальными свойствами чугунов. Первая буква «Ч» (чугун), далее буква и цифра, показывающие содержание легирующего элемента, например, ЧГ6С3 (6 % марганца, 3 % кремния).

8.6. 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 859-2001):

Марка меди	МВЧ	М00	М0	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 5017-2006, ГОСТ 18175-78).

Латуни – сплавы меди с цинком (до 50% Zn) и небольшими добавками алюминия, кремния, свинца, никеля, марганца (ГОСТ 15527-2004, ГОСТ 17711-93).

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 Cu («Л» указывает, что сплав литейный); ЛЦ40Мц3Ж – латунь, содержащая 40% Zn, 3% Мп, ~1% Fe, остальное Cu; Бр0Ф8,0-0,3 – бронза наряду с медью содержащая 8% олова и 0,3% фосфора; ЛАМш77-2-0,05 – латунь, содержащая 77% Cu, 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% Cu и ~4% Zn (томпак); Л63 – латунь содержащая 63% Cu и ~37% Zn.

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

В зависимости от степени чистоты первичный алюминий согласно ГОСТ 11069-2001 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, алюминиево-магниевые – АМг, алюминиево-марганцовые – АМц. Дуралюмины обозначаются буквой Д с последующим условным номером.

Деформируемые алюминиевые сплавы хорошо обрабатываются прокаткой, ковкой, штамповкой. Их марки приведены в ГОСТ 4784-97.

К деформируемым алюминиевым сплавам не упрочняемым термической обработкой, 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, ковочные 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 1583-93) 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 указанном процентном количестве олово и медь (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 «ВТ» и порядковым номером: ВТ1-00, ВТ3-1, ВТ8, ВТ14. Пять титановых сплавов обозначены иначе: 0Т4-0, 0Т4, 0Т4-1, 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 стандарте. Например: МА1 – деформируемый магниевый сплав №1; МЛ19 – литейный магниевый сплав №19.

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАРКИ СТАЛИ ПО ИСКРЕ

В производственных цехах часто возникает потребность в быстрой проверке марки стали детали или инструмента. В таком случае марки стали определяют по искре. Этот метод остался основным для анализа в небольших мастерских и предприятиях.

Марку стали по искре определяют на основании цвета искры и количества «звездочек». Например, присутствие вольфрама в стали придает искре тёмно-бордовый цвет, и поэтому все стали содержащие более 3–4 % W, по искре резко отличаются от углеродистых. По искре всегда можно безошибочно отличить быстрорежущую сталь от углеродистой. Углеродистая сталь даёт светло-жёлтую искру в виде нитей, на которых появляются «звездочки», количество которых увеличивается по мере повышения содержания углерода в стали. При определенном навыке можно различать стали по содержанию углерода с точностью 0,1–0,15 %. Но качественную сталь нельзя отличить от стали обыкновенного качества, которая содержит, кроме того серу, фосфор и другие примеси. Из-за малого количества эти примеси не придают особой окраске искре. Например, сталь марки 20 в среднем содержит 0,2 % С и столько же углерода содержит сталь марок Ст 3 и Ст 4, а, следовательно, искра у них будет одинакова.

Для контроля стали по искре необходимо приобрести навык и заранее просмотреть искру различных образцов – эталонов, сталей известного химического состава. Обычно число марок сталей, употребляемых в данном цехе ограничено, а поэтому их можно рассматривать по искре.

Правильность определения марки стали могут подтвердить дополнительные характеристики. К числу таких характеристик относится излом. Излом можно получить, если пруток надрезать на 1/4 диаметра или толщины, а затем сломать ударом. Например, быстрорежущая сталь (Р18, Р9 и др.) хрупко ломается, а излом получается мелким и немного темноватым. Углеродистые стали (марки Ст 3, стали 10, 20 и др.) имеют излом более светлых и крупный, чем быстрорежущие стали. Если сопоставить данные, полученные по искре, с данными характеристиками излома, то создается большая уверенность в правильности определения марки стали. В некоторых случаях, когда возникают сомнения, можно прибегнуть к пробной закалке. Низкоуглеродистая сталь, содержащая

меньше 0,25% С (марки Ст 3, Ст 4, стали 10, 20), после закалки от температуры 850–900° С с охлаждением в воде остается мягкой и хорошо пилится напильником. Углеродистую сталь от легированной можно отличить по твердости после закалки с охлаждением в масле. Углеродистые стали, содержащие до 1,3% С, после закалки в масле и охлаждения пилят напильником, в то же время легированные стали (марки 9ХС, ХВГ) при охлаждении в масле после нагрева (до 820° С стали марки ХВГ и до 875° С стали марки 9ХС) приобретают высокую твердость и напильник скользит.

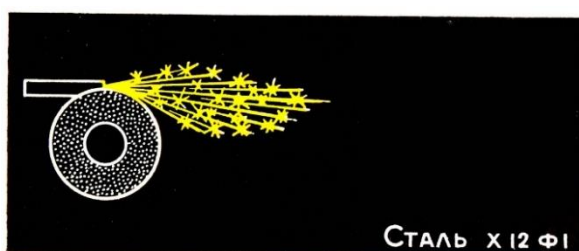
Таким же образом можно отличить стали марок 40 или 50 от стали марок 40Х или 50Х, которые по искре мало отличимые. Сталь марки 40Х после закалки с охлаждением в масле будет иметь относительно высокую твердость и напильник будет скользить или пилить ее слабо, а стали марок 40 и 50 останутся мягкими.

Твердость лучше испытывать по методу Роквелла, сравнивая результаты с известными значениями для разных сталей и режимов (табл. 9.1).

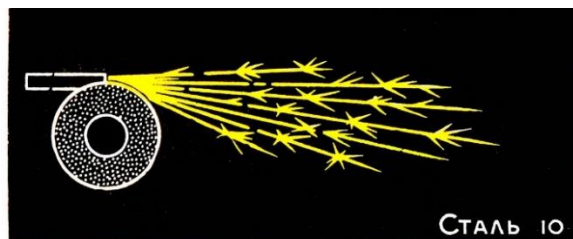
Таблица 9.1

Режим закалки и твердость образцов из легированной и углеродистой сталей при определении марки стали

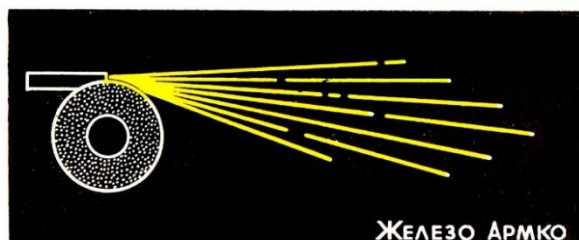
Марка стали	Температура нагрева при закалке, °С	Охлаждающая среда	Твердость образцов после закалки, HRC
X12M, X12Φ1	1100-1130	масло, воздух	60-63
ШХ12, X	835-855	масло, вода	62-65
9ХС	850-870	масло, вода	62-64
ХГ	840-860	масло, вода	62-64
ХВГ	820-850	масло, вода	62-64
65Г	820-860	масло, вода	60-64
У8, У9, У10, У12	780-810	вода	62-64
У8, У9, У10, У12	780-810	масло	45-52
У7	820-830	вода	61-63
У7	820-830	масло	40-50
40Х, 45Х	830-850	масло, вода	52-60
40, 45	830-850	вода	52-60
40, 45	830-850	масло	30-35
38ХМЮА	930-950	масло, вода	52-58
P18, P9K10, P9	1270-1290	воздух, масло	62-64
10	900-920	вода	15-20
20	860-880	вода	30-35
30	840-860	вода	45-50



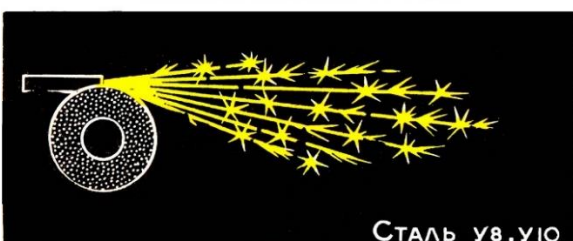
Искры желтые, короткие, густые звездочки, концы нитей острые



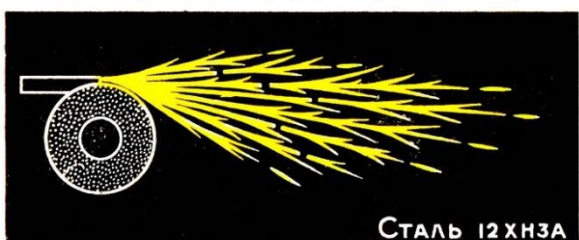
Искры светло-желтые с малым количеством разветвлений, небольшое количество звездочек, кончики нитей острые



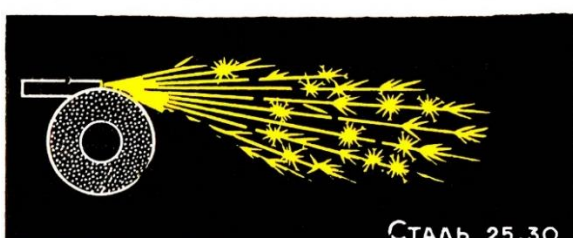
Искры светло-желтые, прямые без разветвлений



Искры светло-желтые, разветвлений и звездочек больше, чем у стали 10



Искры желтые с разветвлениями, на концах искр стрелочки, звездочек нет



Искры светло-желтые, разветвлений много, густые звездочки, концы нитей тонкие



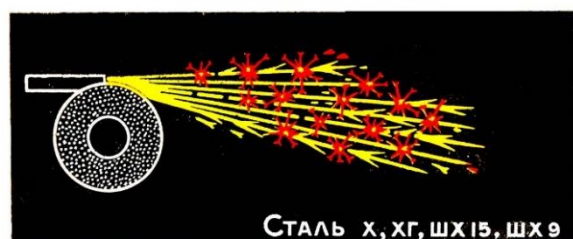
Искры светло-желтые, мелкие, густые звездочки



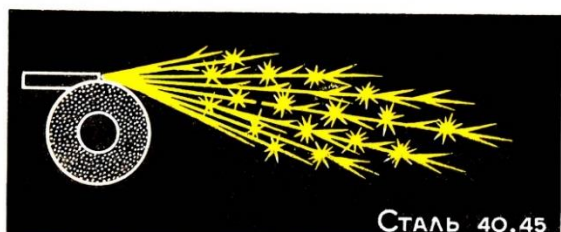
Искры светло-желтые, на концах нитей стрелочки, на разветвлениях выделяется несколько светлых звездочек



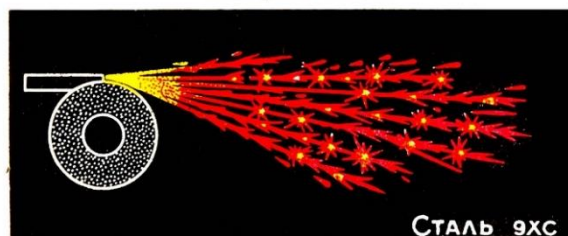
Искры светло-желтые, в центре искр выделяются густые звездочки, на концах нитей небольшое количество стрелочек



Искры желтые, на разветвлениях большое количество мелких светло-красных звездочек



Искры светло-желтые, разветвления сильно развиты, на разветвлениях крупные звездочки, концы нитей острые



Искры темно-желтые со светло-красными разветвлениями и большим количеством звездочек

Рис. 9.1. Характеристика пучка искр сталей различных марок
(окончание на с. 53)

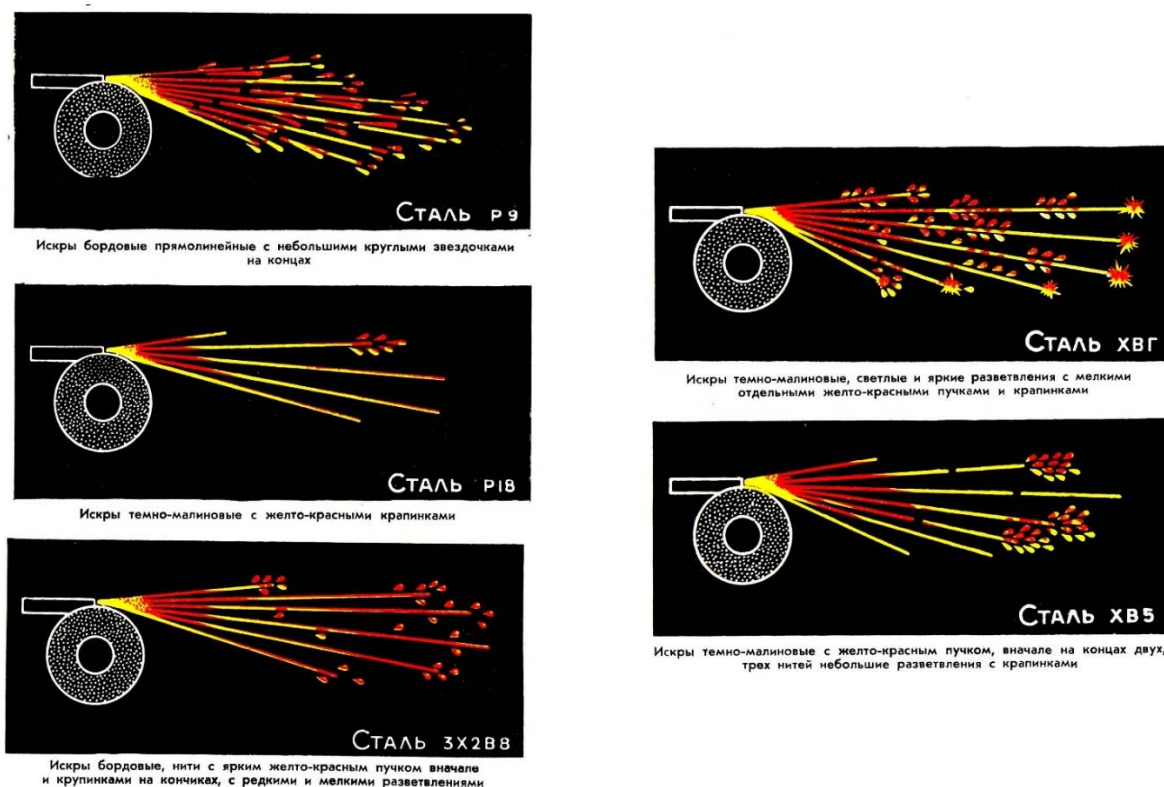


Рис. 9.1. Окончание

Следует учитывать, что на поверхности прутков может располагаться обезуглероженный слой, которые следует удалить. Также надо воспользоваться документацией, сопровождающей сталь, в ней указывается химический состав стали и размер поперечного сечения прутка. Поэтому достаточно проверить один из параметров сечения, чтобы рассортировать перепутанные стали. Можно разделить стали по маркам исходя из внешнего вида: горячекатаная сталь всегда покрыта окалиной, а холодноотянутая имеет светлую поверхность без окалины.

Если пробу на искру произвести квалифицированно и учесть все дополнительные показатели (вид излома, твердость после закалки и т.д.), то во многих случаях можно успешно рассортировать стали по маркам. Целесообразность той или иной пробы должна определяться конкретной задачей и наличием на заводе других методов анализа. Спектральный анализ и проба на искру должны дополнять друг друга.

Марку стали по искре определяют на рабочем месте, имеющем точильных станок. Работать можно при неярком постоянном освещении, на станок не должен попадать прямой солнечный цвет. На рабочем месте должен иметься набор эталонов сталей всех марок, применяемых на заводе. Эталоны особенно нужны начинающему, их применение может значительно облегчить работу и предотвратить возможность ошибок. При проверке необходимо снять слой окалины с образца.

При определении марки стали по искре важен не только цвет искры, но форма и длина нитей, форма и густота разветвлений, количество, форма и размер звездочек, форма кончика нитей, на которых при испытании некоторых марок сталей образуются стрелочки. На рис. 9.1 приведены характеристики искр каждого вида, показанных на эскизах.

Заключение

Спектральные методы анализа состава металлов и сплавов находят самое широкое применение как в научных, так и в заводских лабораториях благодаря своей скорости и достаточно высокой точности. Несколько более сложны как в проведении анализа, так и в интерпретации его результата, но не менее востребованы и применяются методы рентгеновской дифрактометрии. Магнитные методы фазового анализа не являются универсальным и точным инструментом определения состава, однако они обладают преимуществами свойственными неразрушающим методам контроля. Это позволяет использовать их для автоматизации сплошного контроля на предприятии при условии настройки на каждое изделие по отдельности.

Рассмотрено применение методов металлографии, хорошо знакомых при изучении микроструктурного состояния металлов и сплавов, для получения информации о фазовом и химическом составе образцов. Их возможности ограничены в диапазоне фаз, элементов и точности их определения. Однако, получаемые результаты позволяют получить отправную точку для последующих более точных методов или они сами могут применяться в качестве уточняющего метода.

Знание маркировки сталей и цветных сплавов позволяет ориентироваться в широкой номенклатуре марок материалов, что способствует, например, быстрой интерпретации результатов спектрального анализа. При достаточном опыте наблюдения искровых пучков и небольшом количестве используемых марок сталей в совокупности со знанием их характерных свойств можно достаточно достоверно и быстро производить сортировку заготовок на производстве.

В пособии приводятся только основные сведения о рассматриваемых методах, более полную информацию можно получить из источников, указанных в списке рекомендуемой литературы.

Рекомендуемая литература

К главам 1, 2, 3

1. Мазурицкий М.И., Дуймакаев Ш.И., Шполянский А.Я. Методы спектроскопии и элементарного анализа вещества. Ростов н/Д: ДГТУ, 2015. 115 с.
2. Пашкова Е.В., Волосова Е.В., Шипуля А.Н. Спектральные методы анализа. М.: СтГАУ – «Агрус», 2017. 56 с.
3. Звеков А.А., Невоструев В.А., Каленский А.В. Спектральные методы исследования в химии. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2015. 124 с.
4. Атлас спектральных линий для стилоскопа. Львов: Львовэнергоремонт, 1969. 37 с.
5. РД ЭО 0505-03 Инструкция по стилоскопированию металла.
6. Васильева В.И. и др. Спектральные методы анализа. Практическое руководство. Санкт-Петербург: Лань, 2014. 416 с.

К главе 4

1. Рентгеновская дифрактометрия / М.Г. Исаенкова, Ю.А. Перлович, В.И. Скрытний, Н.А. Соколов, В.Н. Яльцев. М.: МИФИ, 2007. 60 с.
2. Русаков А. А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977. 479 с.
3. Асланов Л. А. Инструментальные методы рентгеноструктурного анализа. М.: Изд-во МГУ, 1983. 289 с.
4. Хейкер Д. М., Зевин Л. С. Рентгеновская дифрактометрия. М.: Физматгиз, 1963. 380 с.

К главе 5

1. Неразрушающий контроль: Справочник: Т.6: Кн. 1. Магнитные методы контроля / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. 848 с.
2. Апаев Б.А. Фазовый магнитный анализ сплавов. М.: Metallurgia, 1976. 280 с.

К главам 6, 7

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.: Metallurgia, 1983. 480 с.

К главам 8, 9

1. Гуляев А.П. Metalловедение. М.: Metallurgia, 1986. 544 с.
2. Лахтин Ю.М. Metalловедение и термическая обработка металлов. М.: Metallurgia, 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.
5. Ситанов И. Я. Определение марки стали по искре. М.: Машиностроение, 1968. 16 с.

Оглавление

Предисловие.....	3
Введение.....	4
1. ОСНОВЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ АТОМОВ.....	7
2. ВИЗУАЛЬНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ СТИЛОСКОПИРОВАНИЯ.....	14
3. ОПТИКО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ.....	19
4. РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИФРАКТОМЕТРИЯ.....	23
5. МАГНИТНЫЙ ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ.....	26
6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕРЕОЛОГИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА МИКРОСТРУКТУРЫ.....	34
7. ЭКСПРЕССНЫЙ МЕТОД МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В ОТОЖЖЕННЫХ СТАЛЯХ.....	39
8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА СПЛАВА С ПОМОЩЬЮ РАСШИФРОВКИ ЕГО МАРКИ.....	41
9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАРКИ СТАЛИ ПО ИСКРЕ.....	50
Заключение.....	54
Рекомендуемая литература.....	55

Учебное издание

Долгачев Юрий Вячеславович
Пустовойт Виктор Николаевич

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Редактор Е.В. Хейгетян
Компьютерная обработка: Е.В. Хейгетян

В печать 02.05.2023.
Формат 60×84/16. Объем 3,6 усл. п. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 740. Цена свободная

Издательский центр ДГТУ
Адрес университета и полиграфического предприятия:
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1