

Н.В. Агеев

Рентгенография металлов и сплавов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
Н11

Н11 **Н.В. Агеев**
Рентгенография металлов и сплавов / Н.В. Агеев – М.: Книга по Требованию,
2014. – 192 с.

ISBN 978-5-458-60503-8

ISBN 978-5-458-60503-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2014

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2014

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ

Быстрое распространение нового рентгеновского метода исследования металлов и сплавов выявило его ценные качества и указало те области знаний, в которых новый метод не имеет себе конкурентов. Применение рентгеновских лучей к изучению металлов оказалось особенно плодотворным, произведя целые революции в наших представлениях и дав возможность значительно углубить наши знания о природе металлических веществ, которые являются основой учения о металлах и сплавах.

Понятен поэтому тот большой интерес, который проявляют металлурги к этому новому орудю физико-химического исследования. Рентгенография включена в настоящее время как обязательный предмет во всех металлургических ВТУЗ'ах для специальностей по термической обработке стали и производству и обработке сплавов. Переход на лабораторно-бригадный метод занятий требует обязательного наличия учебника. До настоящего времени было весьма затруднительно указать студентам-металлургам книгу по рентгенографии, в которой бы они могли найти те сведения, которые им необходимы по их специальности. Желание уничтожить этот пробел и обеспечить возможность вести занятия в Металлургическом Институте по лабораторно-бригадному методу побудило меня составить настоящее руководство.

При составлении главной основой послужила прекрасная книга R. Glocker'a „Materialprüfung mit Röntgenstrahlen“, которая ближе всего удовлетворяет требованиям, предъявляемым металлургами к руководству по рентгенографии. Некоторые главы заимствованы мною с небольшими изменениями из этой книги, так как я не считал нужным вновь разрабатывать то, что вряд ли может быть в настоящее время разработано лучше, чем в книге R. Glocker'a.

Книга мною построена таким образом, что весь материал разбит на три части (задания) или три больших темы:

1. Рентгеновские лучи и кристаллическое строение материи.
2. Методы изучения вещества рентгеновскими лучами.
3. Исследование металлов и сплавов рентгеновскими лучами.

Курс рентгенографии должен сопровождаться обязательными лабораторными занятиями, что учтено при составлении настоящего руководства.

Объем курса, на который рассчитано настоящее руководство, равен 30 — 45 часам.

Руководство это, вероятно, имеет много недостатков, объясняемых, главным образом, спешностью работы, вследствие стремления дать возможно скорее печатное руководство, столь необходимое студентам-металлургам. Указание на все имеющиеся недостатки будут мною с благодарностью приняты, особенно от студентов, которые будут пользоваться книгой.

В заключение я пользуюсь случаем принести благодарность профессору G. Sachs и Г. В. Курдюмову, которые ввели меня в эту интересную область знания и были моими первыми руководителями по усвоению основ рентгенографии. Я также должен выразить мою признательность за просмотр рукописи и указания по ней Е. Ф. Алексеевой, опять-таки Г. В. Курдюмову и Д. Н. Шойхету.

Н. В. Агеев.

12 декабря 1931 г.
г. Ленинград.

I. РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ И КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МАТЕРИИ.

A. ПОЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ.

1. Что такое рентгеновские лучи.

После открытия Рентгеном (W. C. Röntgen) в 1895 г. нового вида лучей, названных им X-лучами, природа их оставалась долгое время неясной. Лишь в 1912 году, после известного опыта Лауэ, Фридриха и Книппинга (Laue, Fridrich и Knipping), показавших преломление этих лучей при прохождении через кристалл, стало возможным говорить об их природе.

Рентгеновские лучи можно считать по своей природе тождественными со световыми. Разница заключается лишь в длине волны обоих видов излучения. Если видимый свет имеет длину волны $0,4 - 0,8 \times 10^{-3}$ мм, а ультрафиолетовая часть спектра расположена при длинах волн $0,1 - 0,4 \times 10^{-3}$ мм, то рентгеновская часть спектра лучистой энергии находится от 2×10^{-7} до $0,06 \times 10^{-7}$ мм. Рентгеновские лучи характеризуются, как и другие виды лучистой энергии, длиной волны (λ) или частотой (ν).

Рентгеновские лучи возникают при ударе быстро летящих электронов об атомы, благодаря изменениям, происходящим во внутренних электронных слоях последнего. При ударе об атом летящий электрон выбрасывает один из электронов, находящийся на одной из внутренних электронных орбит атома. Освободившееся место не остается пустым: на эту орбиту перемещается какой-либо из „выше“ лежащих электронов, причем согласно третьему постулату Бора (Niels Bohr), происходит излучение энергии, величина которой выразится равенством.

$$h\nu = J_1 - J_2, \quad (1)$$

где $J_1 - J_2$ разность энергии электрона на двух орбитах, h — постоянная Планка (Planck) и ν — частота возникающего рентгеновского луча.

Так как различные электронные слои обозначаются буквами K, L, M, N, O , то теми же буквами обозначаются и группы лучей рентгеновского спектра. Слой K — ближайший к ядру атома, за ним идет слой L и т. д. При удалении одного из электронов слоя K начинается переход от различных, выше лежащих уровней энергии электронов в слой K . Возникающее при этом рентгеновское излучение обозначается буквой K . Если электрон выброшен был из слоя L , то рентгеновские лучи, возникающие в результате перехода электронов от выше лежащих слоев в слой L , будут обозначаться через L . Электронные слои делятся на подгруппы; так, слой K состоит всего из одной подгруппы и имеет один уровень энергии; слой L — из трех подгрупп и имеет соответственно три уровня энергии; слой M имеет пять подгрупп и столько же уровней энергии.

Совершенно ясно, что разность энергий $J_1 - J_2$ (уравнение 1) для слоя L будет зависеть от того, к какому из указанных трех уровней энергии будет принадлежать выброшенный электрон; то же относится и к другим слоям имеющим несколько уровней энергии (M, N).

Рациональным обозначением рентгеновских лучей будет указание тех двух уровней энергии, между которыми происходит обмен электронами. Уровни энергии или подгруппы обычно обозначаются цифрами, поставленными у обозначения слоя. K имеет один уровень энергии и значков у этой буквы не ставится, слой L имеет три уровня энергии, обозначаемые L_{11}, L_{21}, L_{22} . Обозначение рентгеновского луча $L_{11} \rightarrow K$ или $L_{11} K$ будет значить, что данный рентгеновский луч образовался в результате перехода электрона с уровня L_{11} на уровень K . Следовательно, возникший луч принадлежит к группе K . Подобные же обозначения применяются во всех случаях перехода электрона с одного уровня энергии на другой.

В виду того, что практически наибольшее значение имеет группа K , приведем употребляющиеся обычно обозначения для ее лучей (или спектральных линий). Группа эта имеет четыре главных луча, обозначения которых:

Рациональное обозначение: $L_{21} K; L_{22} K; M_{22} K; N_{22} K$.

Обознач. Зигбана (Siegbahn): $\alpha_2; \beta_1; \beta_2$.

Дублетами называются такие пары линий рентгеновского спектра, для которых разность частот (или длин волн) колебаний имеет постоянное значение. Дублеты могут быть, вообще говоря, двух родов.

Дублеты первого рода возникают, когда электроны попадают с одного и того же уровня энергии (например, групп M или N) на два разных уровня ниже лежащих групп (например, L_{21} и L_{22}). В этом случае разность частот или длин волн не зависит от начального уровня энергии, т.е. полу-

чающиеся два рентгеновских луча будут иметь постоянную разность частот колебаний. В группе K , как имеющей один уровень энергии, дублетов первого рода быть не может.

Дублеты второго рода получаются при попадании электронов с различных уровней энергии на один и тот же. В этом случае разность частот не зависит от уровня, на который попадает перемещающийся электрон и остается постоянной для данных двух лучей. Примером такого рода дублета являются линии α_1 и α_2 (обозначения Зигбана) уровня K (см. выше).

Все сказанное до сих пор относится к так называемым характеристическим лучам, или спектру, зависящему от строения атома вещества, о которое происходит удар летящих электронов. Но кроме характеристического излучения, при ударе потока электронов возникает излучение другого рода, дающего сплошной спектр и, кроме того, происходит образование вторичного потока электронов. Более подробно об указанных вторичных излучениях будет сказано дальше. Качество излучения, как уже было указано, определяется длиной волны. В следующей таблице, в двух горизонтальных рядах приведены равноценные термины для обозначения качества излучения:

Лучи длинной волны — слабо проникающие, мягкие, легко поглощаемые.

Лучи короткой волны — сильно проникающие, жесткие, трудно поглощаемые.

Лучи группы K будут наиболее жесткие (короткая длина волны), тогда как остальных групп более мягкие, т.е. с большей длиной волны.

2. Получение рентгеновских лучей.

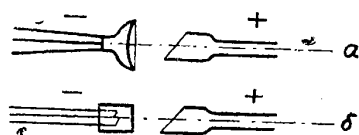
Рентгеновские лучи получают обычно в так называемых рентгеновских трубках, в которых пучок катодных лучей (быстролетящих электронов) ударяется о поверхность металлического антикатада, чем и вызывается появление рентгеновского излучения.

Получить поток катодных лучей и, следовательно, вызвать рентгеновское излучение можно, пользуясь двумя различными способами: во-первых, ионизацией разряженного газа и, во-вторых, электронным испусканием накалинной проволоки в высоком вакууме.

Рентгеновские трубки настоящего времени используют оба указанные принципа. При этом соответственно трубки называются или ионными, или электронными.

а) Газовая ионная трубка — изображена на фиг. 1-а. В стеклянном сосуде, из которого выкачан воздух до разря-

жения 0,001 мм ртутного столба, находятся два электрода: устроенный в виде вогнутого рефлектора катод, соединенный с отрицательным полюсом высокого напряжения, и расположенная наклонно пластинка, соединенная с положительным полюсом, носящая название антикатада. Под влиянием высокого напряжения приложенного к электродам трубки ионизация газовых молекул увеличивается, благодаря ударам ионов о нейтральные молекулы. Ионы, заряженные положительно, направляются к катоду и, ударяясь об атомы вещества катода, выбивают электроны, которые летят в направлении антикатада и ударом о него вызывают возникновение рентгеновских лучей. При ударе летящих электронов



Фиг. 1. Схемы ионной (а) и электронной трубок (б).

(катодные лучи) об антикатод большая часть их кинетической энергии переходит в теплоту, и лишь незначительная часть (около 0,001) в энергию рентгеновского излучения, т.е. рентгеновская трубка — прибор весьма несовершенный.

б) Электронная рентгеновская трубка откатана до возможного при современном состоянии техники вакуума, т.е. около 10^{-7} мм ртутного столба. Такой вакуум совершенно не пропускает тока и является совершенным изолятором даже при напряжениях на электродах в 200 000 вольт и выше. Для получения рентгеновских лучей в такой трубке Кулидж (Coolidge 1913 г.) использовал явление, открытое Ричардсоном (Richardson) — испускание электронов накалившимся телом.

Схема устройства электронной трубки представлена на фиг. 1-б. Катод состоит из вольфрамовой спирали, нагреваемой электрическим током. Поток электронов, ударяясь об антикатод, вызывает появление рентгеновских лучей. Для получения резкого изображения при фотографировании необходимо иметь рентгеновский пучок, исходящий из одной точки поверхности антикатада. Получение точечного фокуса в ионных трубках достигается устройством катода в виде вогнутого рефлектора, направляющего поток электронов, исходящих перпендикулярно его поверхности, в одну точку антикатада (фиг. 1-а). В электронных трубках катод может быть устроен лишь в виде проволоки или спирали, поэтому для достижения указанной цели — фокусировки — служит направляющий цилиндр, который, находясь под одним напряжением с катодом (фиг. 1-б), поглощает электроны, направляющиеся в стороны от направления катод-антикатод. Усовершенствование конструкции направляющих устройств за последние годы дает возможность в настоящее

время получить и с электронными трубками такой же резкий фокус, как с ионными.

Электронные трубки имеют целый ряд преимуществ перед ионными, поэтому в настоящее время они все больше и больше вытесняют последние. Получающиеся рентгеновские лучи тем более жестки, чем больше скорость v ударяющих в антикатод электронов, скорость же последних зависит от приложенного к трубке напряжения V , т.-е.

$$\frac{1}{2} m v^2 = e V, \quad (2)$$

где e — заряд, m — масса электрона.

В следующей таблице дана скорость электронов при различных напряжениях:

V вольт	1 ;	25 ;	100 ;	10 000
v км/сек. . . .	600 ;	3 000 ;	6 000 ;	60 000.

Из таблицы видно, какие большие скорости приобретают электроны при сравнительно небольших напряжениях. Так как скорости электронов вполне определяются напряжением V , то принято выражать скорость электронов в вольтах, т.-е. напряжением.

Кроме того, общая интенсивность излучения рентгеновской трубки пропорциональна числу ударяющихся в одну секунду в антикатод электронов, т.-е. пропорциональна силе тока, проходящего через трубку.

В электронных трубках интенсивность и качество излучения поддаются независимой регулировке при помощи напряжения и силы тока. Изменение силы тока трубки производится изменением силы тока накала катода; чем выше температура, тем больше электронов излучается проволокой. Регулировка напряжения достигается изменением первичного напряжения трансформатора — последовательно включенным реостатом или автотрансформатором.

В ионных трубках соотношения гораздо более сложные. При определенном напряжении сила тока в газовой трубке будет зависеть от величины разряда.

Для регулировки трубки необходимо иметь возможность менять степень вакуума или путем связанной с трубкой насосной установки, или же путем регенераторов, позволяющих впускать в трубку воздух в небольших порциях.

Рассмотрим здесь же, как изменяется качество излучения с изменением напряжения, приложенного к электронной трубке. На фиг. 2 представлены кривые, полученные Ульреем (Ulrey) для распределения энергии сплошного спектра рентгеновской трубки Кулиджа с вольфрамовым антикатодом при напряжениях от 20 до 50 kV. Ордината представляет отно-

сительную величину интенсивности излучения, а абсцисса — длину волны.

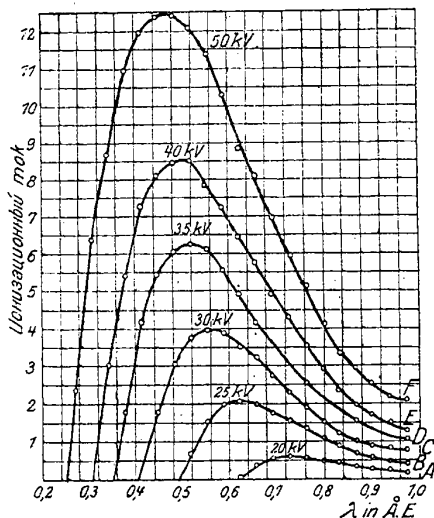
Со стороны коротких волн кривые фиг. 2 начинаются резкой границей, причем эта граница наиболее короткой длины волны связана с приложенным к трубке напряжением зависимостью Эйнштейна (Einstein),

$$eV = h\nu, \quad (3)$$

где e — заряд электрона, V — приложенное напряжение, h — постоянная Планка и ν — частота получающихся рентгеновских лучей. Частота связана с длиной волны соотношением $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где

c — скорость света, λ — длина волны излучения. Подставив в уравнение (3) указанное выражение, получим $eV = \frac{hc}{\lambda}$;

заменяя известные величины h , c и e их численным выражением, будем иметь



Фиг. 2. Распределение энергии в спектре вольфрама.

$$V = \frac{12,34}{\lambda_{min}}, \quad (4)$$

где V выражено в kV, а λ — в Å.

Повышение напряжения выше 50 kV для вольфрамового антикатада вызывает появление максимумов интенсивности при некоторых определенных длинах волн благодаря появлению характеристического излучения, т.е. спектральных линий данного элемента.

3. Конструкция рентгеновских трубок и вспомогательных устройств.

В зависимости от назначения рентгеновской трубки изменяются и предъявляемые к ней требования. С точки зрения практического применения рентгеновских лучей наиболее важными требованиями будут простота конструкции, легкость регулировки и простота обращения.

В этом отношении, как уже было сказано, наиболее удобными будут трубки электронные.

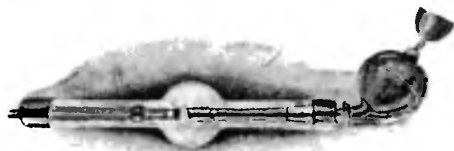
На фиг. 3 изображена современная электронная трубка с плоским антикатодом в таком виде, как она выпускается немецкой фирмой Мюллер (C. H. F. Müller). Так как обычное стекло поглощает наиболее мягкие рентгеновские лучи, то с четырех сторон, в местах выхода рентгеновских лучей, впаяны так называемые линдеманновские окошки, сделанные из литий — баритового стекла. С такой трубкой можно одновременно производить четыре снимка.



Фиг. 3. Электронная трубка.

В виду перехода большей части кинетической энергии электронов в теплоту, необходимо производить охлаждение антикатада. На фиг. 3 у изображенной трубки видно устройство для подвода и отвода воды, охлаждающей антикатод. Охлаждение антикатада может производиться несколькими различными способами. Во-первых, стоячей водой, нагревающейся до кипения и циркулирующей в замкнутом сосуде (шар на фиг. 4).

Более энергичное охлаждение производится проточной водой. Если один из полюсов трансформатора заземлен, то



Фиг. 4. Трубка с охлаждением кипящей водой.

воду для охлаждения можно подводить прямо от водопровода. При неслишком большом напряжении (до 100 kV) возможно подводить воду прямо от водопровода, пропуская ее по пути через стеклянные спирали большой длины. Для трубок, работающих при большом напряжении, необходимо применение охлаждения при помощи изолированных подвешенных охлаждающих насосов.

На фиг. 5 представлен такого рода насос; вода собирается в специальном баке и охлаждается при помощи вентилятора. Производительность такого насоса — 5 литров в минуту.

Для менее интенсивного охлаждения достаточно устройства двух сосудов, расположенных на различной высоте, причем смена их производится через короткие интервалы от руки.

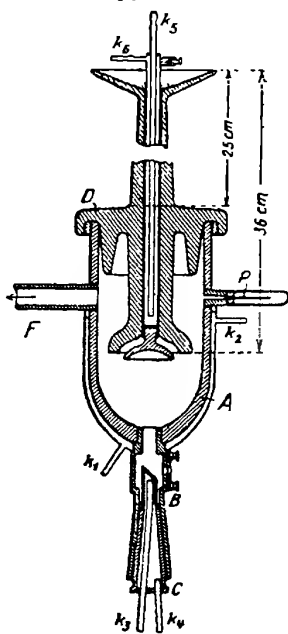
Из ионных трубок большим распространением пользуется металлическая трубка Хаддингса (Hadding). Схематический разрез этой трубки представлен на фиг. 6. Трубка эта состоит из массивного металлического тела A , на которое сверху насажен изолятор D , несущий катод трубки.

Антикатод трубки C находится внизу в специальной камере, с которой он соединен при помощи шлифа. Охлаждение катода, антикатада и корпуса трубки производится при помощи отводов $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$.

Так как антикатод этой трубки заземлен, то и корпус трубки находится под потенциалом земли и, следовательно, охлаждение этих двух частей трубки возможно водой непосредственно от водопровода. Охлаждение же катода должно производиться одним из вышеописанных способов при помощи изолированных устройств. Для прохода рентгеновских лучей, против антикатада C устроено окошко B диаметром 5 мм, закрытое алюминиевой фольгой толщиной



Фиг. 5. Насос для охлаждения антикатада.



Фиг. 6. Трубка Хаддингса.

в 0,001 мм, прикрепленной при помощи лака. Для откачки трубки устроен в корпусе ее отвод F , соединенный с ртутным насосом и далее — с форвакуумным. Для поддержания постоянного разряжения в трубке во время работы необходимо включить регулировочный вентиль между высоковакуумным и форвакуумным насосами или же соединить рентгеновскую трубку при помощи капилляра и крана с большим стеклянным сосудом, откачанным приблизительно до 1 мм ртутного столба. Открывание крана позволяет в этом случае регулировку вакуума трубки. К достоинствам этой трубки надо