

ФИЗИКА И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ¹

Вальтер Розенгайн, Геддингтон

Успехи в какой-либо специальной области техники наиболее быстрым образом могут быть достигнуты только тогда, когда осуществлена гармоническая связь не только между наукой и техникой вообще, но между отдельными близкими друг к другу дисциплинами. В частности, всю физику можно считать одной областью знаний, но наша научно-техническая практика имеет дело только с более узкими отделами, и потому подвергается опасности не заметить или проглядеть то, что лежит вне этой области. Отсюда возникают недоразумения, которые тормозят общее развитие техники и науки. Это особенно легко может случиться тогда, когда две различные области достигают одновременно быстрых успехов. Такой резкий подъем мы видим в области новейшей физики, и можем требовать от металловедения такого же быстрого развития. Это обстоятельство вполне оправдывает связь между физикой и металловедением — тесную связь, которая сама по себе понятна без длинных рассуждений.

В области современной физики особенно быстро развилась теория атома. Быстрота и успешность ее развития дали повод некоторым известным физикам высказываться в том смысле, что „эмпирическое“ изучение металлов и сплавов может иметь очень мало значения, так как, изучив атомы и их взаимодействия, мы можем заранее предсказать

¹ Речь, произнесенная на съезде Германского общества металловедения в Дюссельдорфе 7-го сентября 1929 г.; напечат. в Zeitschr. f. Metallkunde. 22, 74, 1930. В. Розенгайн — директор английского „Института металлов“. *Ред.*

все свойства любого соединения атомов, следовательно, свойства отдельных металлов или их сплавов. Мы надеемся, что эта уверенность в быстрых успехах теории оправдается в ближайшем будущем. Теперь же мы не имеем еще возможности вывести с достаточной точностью даже самые простые свойства металлов, исходя только из атомной теории. Напротив, как это будет указано ниже, эти атомные теории строения металлов сами опираются на то, что полученные при их помощи путем вычислений результаты более или менее совпадают с экспериментальными результатами, часто добытыми с большим трудом. Исключением является, пожалуй, определение плотности, которое в отдельных случаях может быть произведено из расчета по атомным весам и рентгенографически измеренным параметрам кристаллов, и притом с точностью далеко превосходящей точность непосредственного экспериментального измерения. Однако, это только применение новых методов измерения, а не следствие теории атома.

Точка зрения некоторых физиков по отношению к металлосведению определяется не только известной переоценкой будущих успехов теоретической физики, но покоится отчасти и на знакомстве с тем, к чему стремится современное практическое металлосведение и что им уже достигнуто. Существует мнение, что наше практическое исследование металлов состоит главным образом в том, что мы перемешиваем и сплавляем всевозможные металлы во всевозможных пропорциях и измеряем некоторые, важные для практики, свойства их, притом с совершенно недостаточной точностью. Подобное представление является настолько карикатурным, что трудно поверить тому, что существуют физики, которые могут считать эту картину соответствующей действительности. Возможно, что в этом лежит причина того, что до сих пор встречаются многие физические измерения металлов и сплавов, которые совершенно оставляют в стороне современные данные по изучению металлов. Стоит только просмотреть таблицы „физических констант“ металлов и сплавов, чтобы увидеть, что приводимые в них данные очень часто сильно расходятся между собой и в

большинстве случаев только потому, что было совершенно недостаточно установлено состояние и свойства исследуемого вещества. Точно также можно найти целый ряд работ по вопросам изменчивости различных физических свойств металлов, в которых совершенно не принимаются во внимание современные данные относительно холодной обработки, рекристаллизации и т. д.

Если мы теперь рассмотрим ближе связь между физикой, и металлосведением, то окажется, что, отвлекаясь от чрезвычайно важных технических применений металлосведения, исследование металлов преследует две цели, имеющие для физиков очень важное значение. Ибо, прежде всего изучение металлов доставляет физике материал для построения ее великих теорий. Этот материал, с одной стороны, чисто вещественный, — речь идет об изготовлении металлов: чистые металлы или монокристалльные металлы необходимы физикам во многих тонких измерениях. С другой стороны, физик получает точные данные о свойствах металлов и сплавов, на основании которых он может проверить результаты своих теоретических построений. Только специалист по исследованию металлов, который достаточно хорошо знаком со сложными условиями зависимости физических свойств металлических веществ от их точного состава и предварительной обработки, может с успехом предпринять такие измерения. Во всяком случае любой физик, который желает заняться точными измерениями над подобными веществами, должен взять на себя труд или самому познакомиться с этой отраслью, или, по крайней мере, работать в сотрудничестве с инженерами - металлосведами. Благодаря отсутствию такого сотрудничества многие сделанные в этой области исследования оказались почти бесполезными.

Наконец, можно указать еще на одно обстоятельство, когда изучение металлов оказывает физике не меньшую услугу и может быть полезным и в будущем. Если теперь часто смотрят на современную физику, как на математику и философию, то все-таки, по существу, физика была и остается наукой опытной, и развитие ее, в конце концов,

зависит от развития успехов и ловкости в эксперименте. Это, в свою очередь, в значительной степени обусловлено достижениями техники и, особенно, техники металлов. В большинстве случаев новая аппаратура производится из новых металлических веществ, которые предоставлены металлургией в распоряжение техников и физиков. Если бы при современном положении вещей экспериментальная физика и техника отказались бы при конструировании инструментов и приборов от применения достижений металлургии, это означало бы огромный сдвиг назад. Стоит только вспомнить о низком коэффициенте термического расширения у вольфрама или никкелевой стали, о кобальтовомагниевои стали и т. д. С этой точки зрения металловедение может считаться слугой физики и выполняет свою службу хорошо. Надо только, чтобы его значение не оставалось недооцененным.

Было бы нетрудно указать еще целый ряд вопросов, где соприкасаются физика и металловедение, но недостаток времени заставляет нас укладываться в тесные границы и в более важных вопросах. Было бы очень кстати отметить здесь то, что хотя все металловедение, поскольку оно рассматривает вопрос о составе сплавов, граничит с химией и, в частности, с физической химией, но все же, в целом, его можно считать отделом физики, имеющим дело с физикой металлов. Поэтому будет бесполезно распространяться дальше о том, насколько металловедение и добывание металлов зависит от физики. Точно также само собой понятно, насколько ценно металлу сотрудничеству физиков. Металловед, конечно, не может претендовать на то, что его узкое ограниченное поле деятельности может иметь такое же значение, как вся физика. Но широкий поток знания и исследования питается от многих источников, и между ними металловедение может занять не последнее место.

Оглядываясь на все вышеизложенное, мы можем высказать некоторое удивление по поводу того, что одно из новейших завоеваний науки о металлах, представляющее огромный интерес для чистой физики, примыкает к хими-

ческому отделу металловедения. Это — вопрос о получении металлов в состоянии наивысшей чистоты в химическом отношении. За последние годы все больше и больше подтверждается то, что по свойствам металлов, обычно считающихся „чистыми“, — металлов, которые, однако, содержат несколько сотых долей процента примесей разных веществ, нельзя с уверенностью заключать о свойствах действительно чистых веществ. Это было показано, в особенности, на примере очень чистого цинка, который был получен исследователями Американской цинковой компании в Нью-Джерси (Пирс и др.). В последние годы в лаборатории, которая находится под моим руководством, удалось получить в очень чистом состоянии железо, марганец и хром, и притом в количествах, которые позволяют выполнить детальное изучение их свойств. Для очень чистого железа мы нашли, что точки превращения его испытывают совершенно неожиданное смещение, что, возможно, стоит в связи с представлением американца Йенсена (Jensen) о возможности отсутствия в совершенно чистом железе аллотропических превращений. В качестве примера значения получения чистых металлов с точки зрения физики особенно интересным является случай хрома. Изучая действия очень сильных магнитных полей (около 1 миллиона гаусс), Капица в Кембридже исследовал недавно целый ряд наиболее чистых металлов. При этом обнаружилось, что поведение металлов, в особенности изменение электрического сопротивления их в сильном магнитном поле, представляет собой очень острый метод определения чистоты металлических проб. К нашей большой радости оказалось, что не только наш образец хрома далеко превосходит по чистоте все прочие имевшиеся у него образцы, но что, благодаря возможности провести опыт с таким чистым металлом, Капица имел возможность подвергнуть острой проверке свои теоретические соображения.

Во избежание излишнего подчеркивания моей точки зрения, я перейду теперь к вопросам, где мы имеем дело с более тесным взаимодействием физики и металловедения, в частности, к очень важному вопросу о „внутреннем стро-

ении металлов и сплавов". Здесь следует вспомнить о том, что металловеды уже в 1898 — 99 гг. пришли к выводу, что металлы состоят из агрегатов кристаллов, и что механизм скольжения, которому металлы обязаны своей способностью подвергаться обработке тоже, был открыт в 1899 г. Наши знания кристаллического строения металлов чрезвычайно углубились за последние десятилетия, благодаря применению методов рентгеновского анализа. Много содействовало этому получение больших монокристаллов; в этих вопросах действительно осуществилось взаимное сотрудничество физиков и металловедов. Следует подчеркнуть, что результаты новых и мощных методов исследования значительно расширили и углубили результаты, полученные старыми и более трудными методами, во всех почти случаях. Новые исследования открывают возможность новых точек зрения на имеющийся уже материал, и эту возможность я так высоко ценю, что позволяю себе здесь коснуться этих вопросов несколько подробнее.

Изучение кристаллических решеток металлов и сплавов преследовало главным образом цель — установить строение различных видов кристаллов, которые представляют собою фазы серий сплавов. Исследования такого рода дали очень много в смысле изучения некоторых серий сплавов. Но они, повидимому, дали повод думать, что рентгенометрические исследования сами по себе вполне достаточны для изучения строения системы. Против этого я мог бы возразить, что присутствие очень малых количеств второй и третьей фазы на рентгенограмме может быть только очень мало заметно или вовсе не заметно. Определение границ растворимости, т. е. образования смешанных кристаллов с наибольшим параметром решетки, тоже кажется несколько смелым, так как при этом надо допустить, что расширение и сужение решетки даже вблизи предела растворимости остается пропорциональным концентрации, а это, на мой взгляд, довольно-таки мало вероятно. Эти замечания, конечно, не имеют в виду уменьшить значение рентгенографических методов исследования, но только указывают на необходимость одновременного применения, вместе с но

выми методами исследования, старых, многократно проверенных.

Еще более важное применение, чем то, которое рентгенографические методы исследования находят и могут еще найти в учении о сплавах, они получают при рассмотрении основной задачи металловедения, которая в то же время является одной из важнейших задач физики, — в вопросе о точном соответствии между строением металла и сплава и их физическими свойствами. Из этой проблемы, которая охватывает все вопросы — прочности, способности к обработке, упрочнения при обработке и т. д., — я выберу только отдельные вопросы и теории, которые можно считать общими проблемами для физики металловедения. Между ними быть может особенно интересен вопрос о внутреннем строении „смешанных кристаллов“ и соприкасающийся с ним вопрос о „интерметаллических соединениях“.

Уже в 1922/23 г. я указал на то, что в смешанных кристаллах „растворенные“ атомы занимают места отдельных атомов основного вещества, а несколько позже Оуэном и Престоном это предположение было подтверждено экспериментально на целом ряде сплавов, образующих смешанные кристаллы. Затем несколько других исследователей, среди них Бэн (Bain) в Америке, пришли к тому же заключению и получили новые доказательства в его пользу. С другой стороны, Вестгрэн (Westgren) и его сотрудники показали, что в смешанных кристаллах железа и углерода едва ли возможно замещение атомов железа атомами углерода. Это, однако, представляет собой особый случай, который, хотя он имеет весьма важное значение, при общем рассмотрении может быть временно выделен и оставлен в стороне.

В тех случаях, когда смешанные кристаллы образуются путем замещения, это замещение не может пройти без каких-либо изменений. И, действительно, как я указал еще в 1923 г., одним из основных изменений является искажение кристаллической решетки, которое может произойти потому, что силовое поле постороннего атома не в точности равно полю атома основного вещества. Но возникновением

этих искажений решетки (рис. 1а, 1б и 2) мы легко можем объяснить многие типичные для смешанных кристаллов особенности, например, понижение температуры плавления, температурный интервал между началом и концом плавления или затвердевания, медленное увеличение твердости и сопротивления разрыву в ряде смешанных кристаллов с постепенно возрастающей концентрацией, и ту повышенную твердость, с которой связано начало перехода в смешанный кристалл. Даже труднейший вопрос об электропроводности находит некоторое объяснение с этой точки зрения. Однако

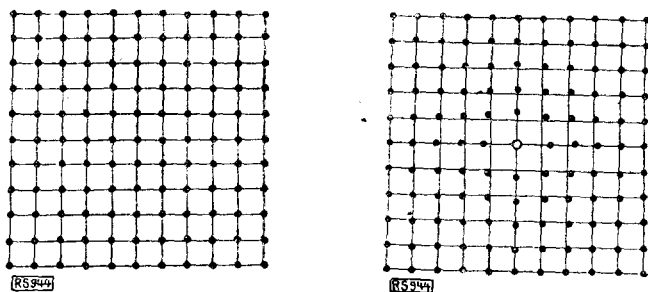


Рис. 1а и 1б. Схематическое изображение «нормальной» и «искаженной» решетки простейшей формы. «Искажение» изображено здесь как вызванное посторонним атомом в середине расширение решетки.

более подробно входить в эти вопросы мы не можем, так как это завело бы нас слишком далеко, и я ограничусь здесь только двумя пунктами.

Если теперь физики уже не удовлетворяются моделью атома, предложенной Резерфордом и Бором, и вслед за де-Бройлем и Шредингером пользуются волновой механикой, которая может быть выражена только в математических формулах и почти не допускает наглядного физического толкования, то представление об атоме, как о некотором образе, состоящем из положительного ядра, окруженного электронами, все же может быть сохранено в качестве первого приближения. Если мы для наглядности будем говорить об электронах или электронных орбитах, то мы можем считать, что в нарушенной кристал-

лестической решетке существует некоторое состояние равновесия, которое обеспечивает для каждого атома, по крайней мере статистически, симметричное поле. Электронные орбиты тоже нужно представлять в состоянии устойчивой симметрии.

Окраска вещества зависит в известной степени от электронов и их орбит, потому что ими определяется, какие световые волны поглощаются и какие будут отражены. В симметричном, невозмущенном состоянии, каждый атом дает нормальное отражение и поглощение лучей. У большинства металлов наблюдается только очень слабое избирательное поглощение, так что они кажутся „белыми“ или „бесцветными“. В отдельных случаях (медь и золото) появляется яркая окраска. Что же должно случиться с окраской металла в сплаве или, сначала, в смешанных кристаллах? Как уже было сказано выше, должно произойти искажение решетки, сопровождающееся асимметричным внедрением некоторого числа атомов и, в то же время, небольшое, но существенное изменение самого атома, т. е. электронных орбит, а, следовательно, и изменение окраски. Это изменение, повидимому, всегда идет в направлении обесцвечивания, что и объясняет, почему сплавы „белых“ металлов никогда не бывают цветными. Впрочем, обесцвечивание при сплавлении объясняется не только разрежением цветных атомов. Добавление 10 или по крайней мере 15% Ni к меди обесцвечивает последнюю почти совершенно, в то время как 40% Zn (еще недостаточно для этого). Если мы обратимся к представлению о решетке и деформации атомов, то все эти явления становятся понятными. Сравним три металла — цинк, алюминий и олово — по их действию на окраску меди. Мы найдем при этом приблизительно пропорциональность между пределом растворимости (предел сме-

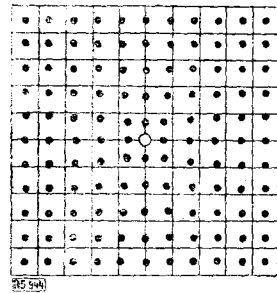


Рис. 2. Схематическое изображение искажения решетки путем введения постороннего атома (как на рис. 1b), только искажение здесь состоит в сокращении решетки.

шения кристаллов) α -смешанных кристаллов и способностью обесцвечивания. Предел смешения кристаллов зависит по большей части от степени искажения, вызываемого каждым введенным атомом растворенного металла, и оно же вызывает, по предлагаемому здесь объяснению, изменение цветности. Все три названные металла имеют общее свойство раздвигать решетку меди. Напротив, металлы в роде никкеля, сокращающие решетку и повышающие точку плавления, производят, повидимому, сравнительно сильное обесцвечивание, — однако и здесь имеется зависимость от степени нарушения решетки, как показывает сравнение никкеля с кобальтом.

Приводимая здесь теория искажения дает объяснение еще одному весьма интересному явлению окраски, наблюдаемому у сплавов. Если в ряде сплавов достигнут предел образования смешанных кристаллов — для данного рода смешанных кристаллов, — то с точки зрения теории искажения это означает, что достигнута наивысшая степень искажения решетки или что, по крайней мере, возможно некоторое другое расположение атомов, имеющее более низкий потенциал, нежели сильнее всего измененная решетка смешанных кристаллов. При этом происходит образование новой фазы, и, за исключением тех случаев, когда образуется химическое соединение, с особенно низким потенциалом, образование новой фазы нужно представлять себе так, что основной металл получает новую форму решетки. Эта форма такова, что если бы решетка была построена только из атомов основного металла, она имела бы более высокий потенциал, чем решетка нормальной формы. Однако, на самом деле, ввиду присутствия сравнительно большого числа посторонних атомов, в силу того, что новая форма расположения посторонних атомов лучше приспособлена к этим включениям эта решетка дает более низкий потенциал. Следовательно, в новой фазе сначала — т. е. при концентрации, при которой она первоначально образуется — нарушение решетки меньше, чем в насыщенных смешанных кристаллах прежней фазы.

Если такие соображения правильны, то мы должны

ожидать, что в ряде сплавов при переходе от насыщенных смешанных кристаллов к соседней фазе должен наблюдаться обратный ход изменения окраски, появляющийся при увеличении концентрации смешанных кристаллов. В самом деле, такое обращение цветности отчетливо видно в сплавах меди с цинком. С увеличением содержания цинка окраска меди переходит через светлый золотистый оттенок к зеленовато-желтому, появляющемуся при достижении насыщения α -смешанными кристаллами. С наступлением β -фазы окраска заметно становится краснее, т. е. зелено-желтый цвет становится золотистым с тем, чтобы при дальнейшем увеличении концентрации цинка снова стать более желтым. Только при появлении γ -фазы сплав становится совершенно бледным.

Для того чтобы привести доказательства правильности этого объяснения описанного, в высшей степени замечательного, явления, следовало бы предпринять точное измерение цветности сплавов, и не только сплавов меди и цинка, но и других, более или менее сильно окрашенных металлов. Это, однако, является чрезвычайно трудной задачей, потому что при этом необходимо работать с поверхностями, совершенно свободными от окислов, и такими, которые не имеют никаких механических нарушений, т. е. сделать их пригодными для оптических измерений. Здесь возникает задача, решение которой всецело зависит от совместной работы физиков и металлургов.

Высказанный выше взгляд, что вторая фаза в последовательности сплавов представляет собой просто аллотропическую форму основного металла — форму, назначение которой „удобнее“ разместить большее число посторонних атомов, приводит нас к труднейшему вопросу о действительной природе промежуточных фаз и к вопросу о так называемых интерметаллических соединениях.

В отдельных случаях вопрос разрешается просто определением параметров решетки, потому что там, где имеются кристаллы, в которых расстояния атомов друг от друга значительно меньше нормального атомного радиуса, нельзя не сделать вывода, что имеется налицо химическое соеди-

нение, т. е. более тесное взаимодействие атомов, чем в обычной решетке, которую я назову „решеткой сцепления“.

В подобных случаях мы имеем еще следующий критерий: такие фазы не образуют вовсе со своими компонентами смешанных кристаллов или образуют их мало. Этот результат от года к году выявляется все отчетливее, по мере того, как граница растворимости определяется все более точно. Если в этих соединениях взаимоотношения атомов на самом деле другие, более тесные, чем в решетке сцепления, то мы должны ожидать, что здесь мы уже не можем заменить такой тесно связанный атом атомом другой компоненты. Образование смешанных кристаллов в бинарных системах, поэтому, было бы совершенно невозможно. Однако, надо помнить, что этот вывод, собственно говоря, может быть применен только к монокристаллам. В агрегатах кристаллов всегда возможно наличие небольшого процента другой компоненты, так как не исключена возможность, что искажение решетки, которое всегда начинается вблизи границ отдельных кристалликов, представляет собой удобный случай для внедрения посторонних атомов.

Можно привести, с другой стороны, целый ряд твердо установленных случаев, когда образование смешанных кристаллов связано с отчетливо выраженным соединением. К этим случаям относятся, в частности, вещества, называемые γ -фазами, которые изучались различными исследователями, в особенности Вестгреном и его сотрудниками и Берналем (лаборатория имени Дэви-Фарадея в Лондоне). В этих случаях мы сталкиваемся с фактом чрезвычайной сложности структуры, так как в отдельных случаях структурная единица решетки состоит более чем из 50 атомов. Следовательно, атомные взаимодействия обеих компонент в таких случаях совсем не так просты, как можно было бы ожидать по обычным законам химических соединений. Можно утверждать, что в сплавах меди с оловом вместо 4 атомов меди на один атом олова приходится 3 атома меди на 8 атомов олова. Приходится поставить вопрос, имеем ли мы здесь дело с особым видом химического соединения, с

чем-то средним между „нормальным“ соединением и смешанным кристаллом, или же надо искать для этого факта других объяснений. Я могу в последующем указать одно объяснение этого явления, на правильности которого я пока не настаиваю, но которое заслуживает внимания, потому что рассматривает вопрос с новой точки зрения и, поэтому, может привести к дальнейшему развитию идей и экспериментов.

Моя сотрудница Мэри Гайлер (M. Gayler) получила недавно по моему методу, как упоминалось уже об этом в другом месте, металлический марганец в химически очень чистом виде. Приготовленный таким образом металл служил не только для изучения чистых сплавов железа с марганцем, но также для точного определения решетки этих элементов в двух аллотропических модификациях. Обе модификации α - и β -марганец имеют довольно сложную структуру решетки. Строение решетки α -марганца определено Брэдлеем в Манчестере и позднее еще более точно моим сотрудником Престоном. На рис. 3 и 4 представлены модели решетки α - и β -марганца. Я особенно обращаю внимание на тот очевидный факт, что эти решетки по числу атомов в их структурной единице и по расположению в них атомов очень похожи на вышеупомянутую γ -фазу. Поэтому, относительно α -марганца встает вопрос — как происходит, что атомы этого металла не только располагаются очень сложным образом, но что самое расположение их чрезвычайно похоже на строение сплавов меди с оловом? Решение этого вопроса для элемента марганца гораздо труднее, чем для медно-оловянных соединений, потому что в последнем случае мы можем принять во внимание различие атомов и их взаимную несогласованность. В случае марганца мы не можем объяснить его строения допущением особой „формы“ атома (напр. эллипсоидальной). Можно было бы предположить, что в кристаллах σ -марганца присутствуют два резко отличающиеся сорта атомов, но такое предположение не легко согласовать с отчетливо выраженной точкой превращения марганца.

Изучение моделей решетки марганцов приводит к мы-

сли, которая намечает некоторое объяснение всех этих вопросов. Модель производит такое впечатление, как если бы в этой структуре имелись резко ограниченные атомные группы, которые с помощью отдельных атомов связывались бы в заполненное кубическими ячейками целое. Такое строение можно объяснить просто и не привлекая к объяснению атомов другого сорта, предположив, что марганец — и в таком же смысле сплавы меди с оловом, в твердом состоянии — образует довольно сильно ассоциированную мо-

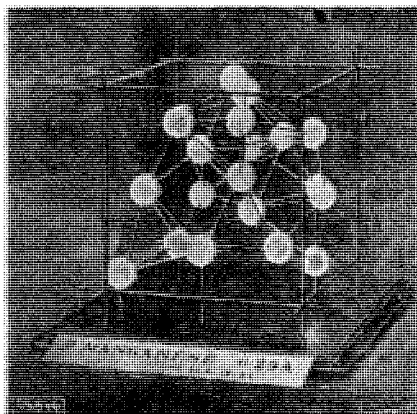


Рис. 3. Модель ячейки решетки α -марганца (по Престону).

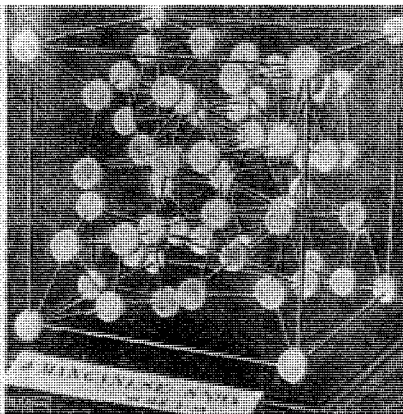


Рис. 4. Модель ячейки решетки β -марганца (по Престону).

лекулу. Это предположение не включает в себе ничего особенно невероятного.

В обыкновенных пространственно- или плоско-центрированных решетках, которые мы имеем у меди, железа и т. д., невозможно выделить „молекулу“. Однако мы все же должны думать, что эти металлы в жидком состоянии состоят из ассоциированных групп атомов, т. е. из молекул. Измерения поверхностного натяжения подтверждают это соображение. Если теперь эти молекулы обладают таким свойством, что они могут без всякого нарушения уложиться — и притом плотно — в пространственную решетку, то это и происходит при затвердевании без всяких осложне-

ний, и процесс кристаллизации сводится к процессу ассоциаций, в большом масштабе. То же может произойти и с молекулами соединений, при том же основном условии, чтобы уже имеющиеся молекулы могли легко уложиться в плотную решетку. Очевидно, однако, что имеется очень мало форм, которые могли бы таким образом пространственно упаковываться, и здесь возникает вопрос — как будет обстоять дело при кристаллизации соединения или состоящего из молекул металла, если форма молекул и их размеры таковы, что упаковка их в правильную плотную решетку невозможна? Здесь могут представиться две возможности: вероятно, обе они и осуществляются. Одна из возможностей состоит в том, что при образовании кристалла молекулы распадаются и атомы просто наново образуют решетку. В таких случаях мы бы не могли, вообще говоря, каким-либо способом — за исключением быть может теплоты кристаллизации — обнаружить описанный процесс. Такие случаи могут наблюдаться только тогда, когда связи в молекулах не очень прочны, так что при образовании решетки получается более низкий потенциал. Там же, где соединение прочно, появляется вторая возможность. Она состоит в том, что готовые молекулы с отдельными диссоциированными атомами образуют сложный образ, в котором молекулы с помощью „свободных“ атомов вступают в решетчатую структуру. Эта решетка устроена таким образом, что „свободные“ атомы целиком заполняют пустоты, которые остаются при упаковке одних только молекул. Вся структура в целом приближается к решетке, с наиболее плотной упаковкой, хотя и с очень значительными искажениями ее. Таким путем я объясняю сложную структуру марганца и ее поразительное сходство со структурой медно-оловянных и многих других соединений.

Затем я хочу обратить ваше внимание на два другие обстоятельства. Во-первых, такое объяснение делает весьма понятным образование смешанных кристаллов в соединениях такого рода. В этих, как и в прочих соединениях, замещаются не те атомы, которые тесно связаны в молекуле, а как раз „свободные“, служащие связью. Отсюда может

быть определен и согласован с экспериментальными данными верхний предел смещения. К сожалению, здесь отсутствуют точные количественные соотношения. Во всяком случае в такой решетке можно ожидать более высокой растворимости обеих компонент, чем в правильной плотно упакованной структуре простых соединений. Это же предположение применимо и к объяснению кажущегося отклонения соединений такого рода от закона кратных отношений.

Наконец, можно ко всему этому еще прибавить, что описанный здесь способ образования кристаллов не является чем-то необычным потому, что в области неорганических кристаллов мы встречаем большое число таких, для кристаллизации которых требуется присутствие воды. Так называемая кристаллизационная вода, по этому представлению, служит в кристалле для той же цели — сделать возможной упаковку в плотную решетку молекул сложной или неудобной формы. В этом смысле атомы, названные выше „свободными“, можно назвать „кристаллизационным металлом“ в точном соответствии с „кристаллизационной водой“, как она например встречается в медном купоросе. В обоих случаях должно было быть наличие несвязанной жидкой среды, как фактора, помогающего образованию решетки с возможно низким потенциалом. Если, углубившись в эти вопросы, которые мне кажутся особенно важными и интересными, я вызвал подозрение, что слишком далеко уклонился от границ вопроса о физике и металловедении, то по крайней мере этим самым я подчеркнул то обстоятельство, что только при ближайшем рассмотрении таких вопросов возможно глубокое взаимное проникновение физики и металловедения.

Развитые выше соображения о внутреннем строении различных сортов кристаллов приводят к заключению, что важнейшие задачи металловедения являются в то же время глубочайшими вопросами физики. Поэтому, оба они — физик и металловед — должны искать решения задачи совместно, если хотят получить его быстро и с наибольшей достоверностью.