



*Кирилл Афанасьевич Осипов*

**Вопросы теории  
жаропрочности металлов  
и сплавов**

*Утверждено к печати  
Институтом металлургии Академии наук СССР*

Редактор издательства *Г. Б. Горшков*  
Технический редактор *Е. В. Макуни*

РИСО АН СССР № 69-78В. Сдано в набор 6/XI 1959 г.  
Подписано к печати 24/III 1960 г. Формат 60×92 $\frac{1}{2}$

18 печ. л. 16,7 уч.-издат. л. Тираж 3500 экз.

Г-00185. Изд. № 4038. Тип. зак № 3755.

*Цена 13 руб. 70 коп.*

Издательство Академии наук СССР  
Москва, Б-62, Подсосенский пер., 21

---

2-я типография Издательства АН СССР  
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

# ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Контора «Академкнига»

ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ КНИГИ:

Вопросы производства железнодорожных цельнокатанных колес. 1959. 214 стр. 12 р. 30 к.

Выплавка ферросплавов в доменной печи на дутье, обогащенном кислородом. 1959. 144 стр. 8 р. 30 к.

Горячие трещины в сварных соединениях, слитках и отливках. 1959. 164 стр. 8 р. 70 к.

Гудцов Н. Т., Банных О. А., Зудин И. Ф. К вопросу о легировании теплоустойчивой стали на основе L-железа. 1959. 68 стр. 2 р. 70 к.

Исследования по жаропрочным сплавам. Том II. 1957. 371 стр. с илл. 20 р. 75 к.

Исследования по жаропрочным сплавам. Том III. 1958. 430 стр. 23 р. 50 к.

Исследования по жаропрочным сплавам. Том IV. 1959. 400 стр. 22 р. 20 к.

Корольков А. М. Усадочные явления в сплавах и образование трещин при затвердении. 1957. 72 стр. 2 р. 45 к.

Павлов М. А. Металлургия чугуна. Часть 1. Введение. Сырые материалы. 1948. 250 стр. 12 р. 80 к.

Паушкин Я. М. Химический состав и свойства реактивных топлив. 1958. 376 стр. 19 р. 30 к.

Тепловые процессы при контактной сварке. Сборник трудов Лаборатории сварки металлов. 1959. 278 стр. 16 р.

Терпигорева А. М. Воспоминания горного инженера. (Научно-популярная серия). 1956. 272 стр. с илл. 6 р. 25 к.

Титан и его сплавы. Вып. 1. Металлургия и металловедение. 1958. 212 стр. 10 р. 60 к.

Титан и его сплавы. Вып. 2. Металлургия титана. 1959. 180 стр. 10 р.

Чернышев А. Б. Избранные труды. (В одном томе). 1956. 368 стр. с илл. 22 р. 20 к.

Шухардин С. В. Георгий Агрикола. 400 лет со дня смерти (1555—1955). (Работы в области горного дела и металлургии). 1955. 208 стр. с илл. 8 р. 20 к.

**КНИГИ ПРОДАЮТСЯ В МАГАЗИНАХ «АКАДЕМКНИГА»:**

Москва, ул. Горького, 6; Москва, 1-й Академический проезд, 55/5;  
Ленинград, Литейный проспект, 57; Свердловск, ул. Белинского, 71-в;  
Киев, ул. Ленина, 42; Харьков, Горяиновский пер., 4/6;  
Алма-Ата, ул. Фурманова, 129; Ташкент, ул. Карла Маркса, 29;  
Баку, ул. Джапаридзе, 13.

**ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КНИГ ПОЧТОЙ**

**ЗАКАЗЫ НАПРАВЛЯТЬ В КОНТОРУ «АКАДЕМКНИГА»:**

Б. Черкасский пер. 2/10 Отдел «Книга — почтой»  
или в ближайший из указанных магазинов.

**Заказ будет выполнен наложенным платежом**

А К А Д Е М И Я   Н А У К   С С С Р

---

ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ ИМ. А. А. БАЙКОВА

К. А. ОСИПОВ

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ  
ЖАРОПРОЧНОСТИ  
МЕТАЛЛОВ  
И СПЛАВОВ

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

*Москва 1960*

В книге рассмотрены следующие важнейшие вопросы теории жаропрочности металлических фаз и их сочетаний: роль межатомной связи и искажений кристаллической решетки, роль структуры сплавов, связь между характеристиками прочности и пластичности и явлением плавления, основные закономерности температурной зависимости механических свойств металлических фаз, соотношение между диффузией и жаропрочностью, поведение многофазных сплавов под нагрузкой, факторы жаропрочности химических соединений металлов. Рассмотрены также некоторые принципы легирования сплавов, построенных на основе твердых растворов металлов. Кратко изложены существующие представления о диаграммах «состав — жаропрочность» металлических систем. По затронутым вопросам изложена история развития основных представлений, проанализированы опубликованные в отечественной и иностранной научной литературе экспериментальные данные и теоретические исследования, сделаны выводы.

---

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

*член-корреспондент АН СССР*

*И. А. ОДИНГ*

---

## ВВЕДЕНИЕ

Под жаропрочностью металлов и сплавов понимается их свойство в твердом состоянии при высоких температурах сопротивляться во времени пластическому деформированию и разрушению при действии на них приложенных напряжений.

В понятие «приложенные напряжения» здесь не включаются напряжения, возникающие в материале при действии на него агрессивной среды или циклических изменений температуры. Их исключение из определения жаропрочности обусловлено недостаточным развитием исследований по изучению влияния таких напряжений на характеристики жаропрочности. Однако и при достаточном развитии подобных исследований можно условиться рассматривать эти напряжения в проблемах жаростойкости и стойкости материала при циклических изменениях температуры.

Жаропрочность металлических фаз и их сочетаний представляет собой свойство, которое по своей физической сущности не отличается коренным образом от их прочности и пластичности при комнатной и более низких температурах. Поэтому подразделение механических свойств на низкотемпературные и высокотемпературные условно.

Вопросы теории жаропрочности металлов и сплавов следует рассматривать на основе тех достижений, которые уже сделаны физикой твердого тела в познании природы прочности и пластичности, в познании механизмов пластического деформирования и разрушения кристаллических тел в широком интервале температур, включая как комнатную, так и низкие температуры. Достижения физики твердого тела в этой области должны составлять одну из важнейших сторон теории жаропрочности, и, в свою очередь, обогащаться достижениями этой теории.

Другой стороной теории жаропрочности является изучение зависимости механических свойств сплавов от их состава и особенностей фазового и структурного состояния. Эта сторона

теории развивается в настоящее время на основе, главным образом, основных принципов физико-химического анализа металлических систем и играет исключительно большую роль при разработке новых высокожаропрочных сплавов. Начало развития этой стороны теории жаропрочности было положено в трудах академика Н. С. Курнакова и его сотрудников.

Теория жаропрочности должна включать в себя обе указанные стороны, и ее задача состоит в изучении прочности и пластичности металлов и сплавов в зависимости от следующих важнейших факторов: приложенных напряжений, температуры, состава и особенностей фазового, структурного и энергетического состояния. Построение и анализ диаграмм «состав — жаропрочность» для каких-либо заданных условий действия напряжения и температуры — это только одна из задач теории жаропрочности.

В книге наибольшее внимание уделяется тем вопросам теории, которые имеют более близкое отношение к физической природе прочности и пластичности кристаллических тел, к механизму их пластического деформирования и разрушения, к принципам легирования сплавов и которые, по мнению автора, являются важнейшими в настоящее время. При этом мы не ставили перед собой задачи с исчерпывающей полнотой освещать историю того или иного вопроса.

Вопросы теории и практики жаростойкости металлов и сплавов имеют непосредственное отношение к вопросам теории жаропрочности. Однако к настоящему времени еще недостаточно изучено влияние изменения поверхностного состояния материала, возникающего под влиянием агрессивной среды, на его механические свойства.

Вопросы, связанные с изучением внутреннего трения в металлах и сплавах, являются составной частью теории жаропрочности. Однако они затрагиваются автором только частично, так как глубокий анализ их и полное изложение содержится в ряде капитальных работ, в том числе в сборнике «Упругость и неупругость металлов» (М., ИЛ, 1954).

Проблема жаропрочности различных материалов возникла в связи с запросами быстро развивающейся новой техники: энергетические теплосиловые установки, газовые турбины, атомные установки.

В СССР эта проблема успешно решается благодаря хорошо координированной работе многих крупных научных учреждений, лабораторий высших учебных заведений и лабораторий крупных заводов. Советские ученые выполнили ценные экспериментальные исследования в области изучения высокотемпературных механических свойств различных материалов и внесли большой вклад в решение основных вопросов

теории жаропрочности. Темпы экспериментальных и теоретических исследований непрерывно возрастают, их качество все время улучшается. К настоящему времени уже разработаны и внедрены в народное хозяйство ряд составов высокожаропрочных металлических сплавов и других материалов.

Результаты некоторых экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в СССР по жаропрочности, опубликованы в научной литературе.

Опубликован также ряд работ иностранных ученых, посвященных экспериментальному и теоретическому исследованию высокотемпературных механических свойств металлов и сплавов. Многие из этих работ представляют несомненный интерес, особенно те из них, в которых рассматриваются термодинамические характеристики металлических систем, принципы легирования и вопросы теории дислокаций. Следует, однако, отметить, что в работах иностранных ученых пока еще не сделано сколько-нибудь существенного вклада в разработку количественной теории легирования жаропрочных и других металлических сплавов. Успех в этом направлении придет, возможно, в результате дальнейшего развития идей, заложенных в работах Коттрелла, Сузуки, Фишера и Флина, посвященных количественному расчету критического напряжения сдвига в простейших металлических системах и появившихся в 1952—1958 гг. В работах некоторых зарубежных ученых, посвященных рассмотрению механизма ползучести металлов при высоких температурах, часто утверждается, что представления о диффузионном механизме пластического деформирования впервые изложил Набарро (1948 г.), затем Херинг (1950 г.). В связи с этим отметим, что советские ученые Лашко и Францевич еще в 1936 г. опубликовали уравнение высокотемпературной ползучести металлов, полученное ими в предположении диффузионного механизма ползучести. Этот вопрос частично рассматривался также Кантором в 1938 г. В этой связи более интересным, однако, является не вопрос о приоритете, а экспериментальная проверка идеи о диффузионном механизме ползучести. Уравнение Херинга, согласно которому скорость высокотемпературной ползучести металла прямо пропорциональна коэффициенту объемной самодиффузии, не получило экспериментального подтверждения в работах Харпера и Дорна. Кроме этого, для некоторых металлов (например, олова) наблюдалось значительное расхождение значений энергии активации высокотемпературной ползучести и самодиффузии. Эти факты способствуют интенсивному развитию дислокационных представлений о высокотемпературной ползучести, развиваемых в работах многих зарубежных ученых. В описании дислокационного механизма высокотемпературной ползучести уже

сделаны значительные успехи, однако о деталях этого механизма все еще нет единого мнения.

Выводы теории дислокаций, в особенности касающиеся высокотемпературных механических свойств металлов и сплавов, хотя еще и далеки от полного своего развития, но заслуживают самого пристального внимания, тем более, что уже экспериментально доказано существование дислокаций в кристаллах. В то же время не следует закрывать дорогу и другим оригинальным идеям и теориям, направленным на глубокое понимание механических свойств металлов и сплавов в различных условиях их применения.

---

## Глава I

### О ДИАГРАММАХ «СОСТАВ — ЖАРОПРОЧНОСТЬ» МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Отличительной чертой исследований многих советских ученых, работающих в области изыскания новых высокожаропрочных сплавов, является широкое использование методов физико-химического анализа вещества, одна из основных задач которого, как известно, состоит в построении и теоретическом анализе равновесных диаграмм «состав — свойство» или, более точно, диаграмм «фактор равновесия — свойство».

В результате таких исследований для многих двойных и более сложных металлических систем были построены диаграммы «состав — жаропрочность».

Анализ и сопоставление многих частных диаграмм «состав — жаропрочность» позволили А. А. Бочвару [1, 2], М. В. Захарову [3, 5] и И. И. Корнилову с сотрудниками [6—13] высказать ряд принципиальных положений, касающихся построения диаграмм «состав — жаропрочность», наметить небольшое число общих типов таких диаграмм и указать на необходимость дальнейшего развития тех основных закономерностей, которые в физико-химическом анализе широко известны как законы или правила Н. С. Курнакова и которые впервые были сформулированы для невысоких температур [14, стр. 482].

Однако по вопросу о типах диаграмм «состав — жаропрочность» и применимости законов Н. С. Курнакова для широкого интервала температур в работах А. А. Бочвара и М. В. Захарова, с одной стороны, и И. И. Корнилова, с другой, были даны разные ответы, иногда исключаящие друг друга. При этом наиболее резкие расхождения во взглядах были в начальной стадии работ этих авторов по жаропрочности. В дальнейшем, по мере накопления экспериментальных данных и развития теоретических исследований, взгляды указанных авторов во многом сблизились.

Мы здесь не будем излагать взгляды различных исследователей по вопросу о типах диаграмм «состав — жаропрочность» и приводить те или иные из предложенных типов таких диаграмм, так как это сделано с достаточной полнотой М. В. Захаровым [5]. Вместо этого кратко изложим здесь те стороны учения о диаграммах «состав — свойство», которые являются наиболее важными в проблеме жаропрочности.

Важные для нас теоретические положения учения о диаграммах «состав — свойство» приведем из трудов по физико-химическому анализу [14, 15, 16].

В основе учения о диаграммах «состав — свойство» или, точнее, диаграмм «фактор равновесия — свойство» лежат принципы непрерывности и соответствия.

Принцип непрерывности в трудах Н. С. Курнакова формулируется следующим образом: «В функциях

$$f(T, P, x_1, \dots, x_n, \eta) = 0, f_1(T_1, P_1, x_1, \dots, x_n, \rho) = 0 \text{ и т. д.,}$$

определяющих состояния равновесий системы, между переменными значениями факторов равновесия: температурой  $T$ , давлением  $P$ , концентрациями компонентов  $x_1, \dots, x_n$  и измеряемыми величинами свойств фаз, например, внутренним трением  $\eta$ , электросопротивлением  $\rho$  и т. д., существуют непрерывные соотношения. Так, например, последовательным изменениям состава твердых и жидких растворов отвечают непрерывные изменения их свойств — удельного веса, электропроводности, упругости паров и т. д.» [14, стр. 42]. Или иначе: «при непрерывном изменении состава системы (или других факторов равновесия) непрерывно изменяются и ее свойства; кривые, отражающие эти взаимоотношения, тоже являются непрерывными» [14, стр. 189].

В. Я. Аносов и С. А. Погодин несколько уточняют эти формулировки и принцип непрерывности излагают так: «при непрерывном изменении параметров, определяющих состояние системы, свойства отдельных фаз ее изменяются непрерывно, в то время как свойства системы, взятой в целом, изменяются тоже непрерывно, но при условии, что не возникают новые фазы и не исчезают старые» [16, стр. 516].

Из этих формулировок видно, что свойства отдельных фаз, составляющих систему, и свойства системы, взятой в целом, являются сложной функцией многих физических и химических факторов (температуры, давления, концентрации компонентов и других), определяющих состояние системы. В проблеме жаропрочности можно говорить о приложенных напряжениях различного вида и при этом учитывать схему напряженного состояния. Важно подчеркнуть, что учение о равновесных диа-

граммах «состав — свойство» не делает различий между физическими и химическими изменениями состояний [14, стр. 24, 37].

Из этих формулировок вытекает также, что вид диаграмм «состав — свойство» зависит не только от концентрации компонентов системы и температуры, но и ряда других факторов равновесия, как, например, от приложенных напряжений, и что изменение вида диаграмм в той или иной степени обязательно должно происходить при изменении разнообразных факторов равновесия.

Из принципа непрерывности вытекает необходимость изменения законов Н. С. Курнакова, — в той их форме, в которой впервые они были сформулированы для комнатной температуры, — с изменением температуры, величины и вида приложенных напряжений и других факторов равновесия.

Характерно, что уже сам Н. С. Курнаков указывал на изменяемость диаграмм «состав — свойство» с изменением такого условия равновесия, как температура. Так, например, применительно к непрерывным твердым растворам двух компонентов он говорил: «повышение температуры должно делать изотермы (твердости, электропроводности), более плоскими» и «при тех же условиях максимум твердости будет перемещаться по направлению более твердой составляющей сплава» [14, стр. 121—122].

Принцип соответствия гласит: «каждому химическому индивиду или фазе переменного состава в системе отвечает определенный геометрический образ на диаграмме» [14, стр. 190]. Иначе можно сказать: «каждому комплексу фаз, находящихся в данной системе в равновесии, соответствует на диаграмме определенный геометрический образ» [16, стр. 517]. Под диаграммой в этих формулировках понимается диаграмма «состав — свойство».

Принцип непрерывности и принцип соответствия применимы ко всем диаграммам «состав — свойство», в том числе и к диаграммам «состав — жаропрочность».

В соответствии с этими двумя принципами физико-химического анализа на диаграмму «состав — жаропрочность» не следует смотреть, как на неизменяемый геометрический образ, не зависящий от условий, в которых изучается жаропрочность.

К диаграммам «состав — жаропрочность» полностью применимы следующие слова Н. С. Курнакова:

«Химическая диаграмма состав — свойство является замкнутым «комплексом» точек, линий и поверхностей... Различным изменениям физико-химических «состояний» или химическим «превращениям» равновесной системы соответствуют определенные «положения» геометрических элементов, характеризующих комплекс.

Все детали процесса химического взаимодействия — например, появление новых фаз и определенных соединений, образование жидких и твердых растворов — находят себе точное и определенное отражение в том геометрическом комплексе линий, поверхностей и точек, которые образуют химическую диаграмму» [14, стр. 83] или, что то же самое, диаграмму «состав — свойство».

А. А. Бочвар [1, 2] проанализировал вопрос о возможных видах диаграмм «состав — жаропрочность» и о применимости правил Н. С. Курнакова для широкого интервала температур и пришел к выводу, что «правила Курнакова должны рассматриваться как частные правила, справедливые для таких низких температур, когда практически единственным механизмом деформирования является сдвиговый механизм и когда ни рекристаллизация, ни взаимное растворение фаз не восстанавливают потерянной пластичности» и что «гораздо правильнее теперь ставить вопрос о более сложных зависимостях свойство — состав — строение — температура и разбирать частные случаи этой многомерной зависимости».

Вывод Бочвара о частном характере известных правил Курнакова и необходимости изучать многомерную зависимость свойств сплавов находится в полном соответствии с принципом непрерывности и принципом соответствия, которые составляют основу всего учения о диаграммах «состав — свойство». Этот вывод находится в соответствии с основным содержанием учения Курнакова и его взглядами на диаграмму «состав — свойство».

На необходимость расширять работы по исследованию влияния температуры и времени на диаграммы «состав — свойство» указывал Н. В. Агеев [14, стр. 524] еще задолго до широкого развития исследований по жаропрочности.

В связи с затронутым вопросом о мерности диаграммы «состав — жаропрочность» следует отметить то положение физико-химического анализа, что число измерений диаграммы «состав — свойство» определяется числом независимых компонентов равновесной системы и числом переменных, определяющих ее состояние, например: температура, приложенные напряжения и измеряемые свойства — твердость, длительная прочность, скорость ползучести.

В заключение отметим, что известные в настоящее время многочисленные экспериментальные данные по твердости, длительной прочности и ползучести сплавов различных простых и сложных металлических систем, полученные при самых разнообразных условиях пластического деформирования, полностью подтверждают правильность основных принципов физико-химического анализа.

## Глава II

### МЕЖАТОМНАЯ СВЯЗЬ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛАХ И ПРОБЛЕМА ЖАРОПРОЧНОСТИ

#### § 1. РОЛЬ МЕЖАТОМНОЙ СВЯЗИ

В ряде работ был уже сделан вывод, что механические свойства вещества, так же как химические и термические, имеют непосредственную связь с важнейшими термодинамическими функциями его состояния: внутренней и свободной энергией, термодинамическим потенциалом, энтропией, теплосодержанием. Еще Д. В. Гиббс отмечал, что для познания механических свойств вещества необходимо изучать соотношения между энергией  $U$ , энтропией  $S$ , объемом  $V$ , массой компонентов  $m_1, \dots, m_n$ , температурой  $T$ , давлением  $P$  и химическими потенциалами компонентов  $\mu_1, \dots, \mu_n$ ; вместо энергии можно рассматривать другие термодинамические функции, вместо давления — напряжение. Так он писал: «От  $n + 3$  независимых соотношений между переменными  $U, S, V, m_1, \dots, m_n, T, P, \mu_1, \dots, \mu_n$  зависит очень большой класс свойств рассматриваемого соединения, мы можем сказать — все его термические, механические и химические свойства, поскольку рассматриваются активные тенденции, в случае которых форма массы не имеет значения» [17].

В работах М. В. Ломоносова содержится утверждение, что сопротивление твердых тел удару «различается соответственно сцеплению между частицами» [18, стр. 491] и что «в твердых телах упругость обусловлена главным образом сцеплением частей» [18, б, стр. 493]. При этом Ломоносов говорил, что «сцепление и притяжение одно и то же» и что сцепление «оказывает сопротивление силе, разрывающей связь» [18, а; стр. 261, 267].

Н. С. Курнаков и С. Ф. Жемчужный [15, а; 19] указывали на «группу свойств, зависящих от внутреннего сцепления вещества. Сюда следует отнести твердость, предел упругости,

различные модули упругих деформаций, коэффициенты сжимаемости, временного сопротивления разрыву и другие, так называемые, механические свойства» [19]. Появлению этой развернутой формулировки предшествовало установление факта, что порядок расположения металлов по прочности химической связи соответствует их расположению по величинам модуля упругости и твердости [20].

В первых работах по теоретической прочности кристаллических тел [21, 22] были использованы определенные представления о характере и прочности сил межатомной связи. То же было сделано и в ряде последующих работ [23—29].

Н. Могт и Х. Джонс еще в 1936 г. утверждали во введении к своей работе [30], что «проблеме прочности должна предшествовать проблема химической связи». Подобная мысль развивалась и Н. В. Агеевым [31].

В ряде более поздних работ, посвященных проблеме высокотемпературных механических свойств металлов и сплавов, внимание исследователей также привлекается к необходимости использовать силы межатомной связи. Так, например, в работе [32] отмечалось, что теория жаропрочности «не может развиваться независимо от современного состояния знаний о природе химической связи в металлических сплавах и представлять собой что-то принципиально отличное от более общей теории строения металлов. Именно природа химической связи определяет кристаллическое строение, свойства и поведение фаз металлических систем при любом изменении внешних условий». Отмечалось также, что «вблизи температур кристаллизации... одни и те же силы связи ответственны как за механическую прочность, так и за сопротивляемость сплавов плавлению» [32, 33]. В работах Н. Т. Гудцова, Г. В. Курдюмова, Н. В. Агеева, И. А. Одингга, И. И. Корнилова и С. Т. Кишкина утверждается, что прочность межатомной связи в кристаллах фаз, составляющих сплав, является решающим фактором его сопротивляемости деформированию и разрушению при высоких температурах; при этом подчеркивается также важная роль тонкой субмикроскопической неоднородности сплава. На важную роль прочности межатомной связи в проблеме жаропрочности указывается в работах А. А. Бочвара [34].

В теории дислокаций признается, как бесспорное и очевидное положение, что прочность межатомной связи играет большую роль в процессах пластического течения и разрушения кристаллических тел. В уравнениях этой теории применяются модули упругости кристаллов и учитываются искажения кристаллической решетки, возникающие от растворенных атомов, и в то же время утверждается, что упрочнение от легирования

возникает в результате взаимодействия полей напряжения, окружающих дислокацию и растворенные атомы; сила этого взаимодействия прямо пропорциональна произведению модуля сдвига на деформацию кристаллической решетки, вызванную растворенными атомами. При этом большая роль в упрочнении признается за скоплениями растворенных атомов. Деформационное упрочнение металлов и сплавов приписывается взаимодействию дислокаций.

## § 2. ПРИРОДА ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Здесь нет необходимости подробно излагать достигнутые к настоящему времени результаты по изучению природы химической связи в твердых телах различных классов. Они хорошо освещены в работах [31, 35—38]. Укажем только кратко на основные итоги этого изучения.

В настоящее время классифицируется пять типов химической связи: ионная, ковалентная, металлическая, молекулярная (связь Ван-дер-Ваальса) и водородная.

Межатомные силы в кристаллических телах имеют почти полностью электростатическое происхождение. Существенные различия в характере и прочности связи, которые наблюдаются среди различных классов кристаллических веществ, обусловлены, главным образом, различным состоянием их электронов в кристаллической решетке.

В проблеме жаропрочности наибольший интерес могут представлять кристаллические тела с ковалентной и металлической связью; первая из них отличается обычно наибольшей энергией связи.

Ковалентная связь между двумя ионами возникает в результате их взаимодействия с двумя электронами, по одному от каждого атома. Эти два электрона находятся в совместном владении двух атомов и имеют противоположные спины. Ковалентная связь характеризуется высокой электронной плотностью между ионами в направлении связи и направленными свойствами; электронные облака заметно локализованы в определенных направлениях. Предполагается, что ковалентная связь может играть существенную роль в некоторых металлических сплавах, особенно в металлических соединениях.

Металлическая связь обеспечивается, в основном, взаимодействием ионов и коллективизированных наружных, или валентных, электронов атомов; ионы можно рассматривать погруженными в среду, образованную коллективизированными электронами. Для металлического типа химической связи характерно неподчинение правилу насыщения валентности. Металлическая связь во многом близка ковалентной связи, и

поэтому принципиального различия между ними проводить не следует.

В элементах степень проявления ковалентной и металлической связи зависит от их местоположения в периодической системе. Соответственно этому изменяется и энергия связи в них.

### § 3. МЕЖАТОМНАЯ СВЯЗЬ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ

Энергия связи является частью внутренней энергии системы. В металлах энергия связи представляет собой общую потенциальную энергию как результирующую главным образом электростатических сил притяжения между противоположно заряженными частицами (ионы и электроны) и сил отталкивания между одноименно заряженными частицами (электроны). Она может быть определена как работа расчленения металлического кристалла при температуре абсолютного нуля на газ положительных ионов и электронов; следовательно, в металлах энергия связи является суммой энергии сублимации и энергии ионизации, рассчитанной на грамм-атом.

Общая потенциальная энергия взаимодействия составляющих частиц (ионы и электроны) является функцией межатомного расстояния и для твердого состояния может быть выражена полуэмпирическим выражением вида:

$$U = -\frac{A}{V^{1/3}} + \frac{B}{V^{2/3}} \quad (1)$$

или

$$U = -\frac{C}{r} + \frac{D}{r^2}, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  — константы,  $V$  и  $r$  — атомные объем и радиус.

В этих уравнениях первые члены справа соответствуют потенциальной энергии электростатического притяжения между положительными ионами и электронами, вторые члены — кинетической энергии электронов, обуславливающей силы отталкивания в кристалле; по величине вторые члены меньше первых.

Сила связи  $F$  характеризует чувствительность общей потенциальной энергии  $U$  системы атомов к изменению межатомного расстояния; количественно она представляет производную энергии по межатомному расстоянию, т. е.  $F = \frac{dU}{dr}$ . Эта производная является функцией межатомного расстояния  $r$ . Знак минус перед