

**М.Х. Шоршоров**

**Металловедение сварки стали и сплавов  
титана**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 621  
ББК 34.4  
М11

M11 **М.Х. Шоршоров**  
Металловедение сварки стали и сплавов титана / М.Х. Шоршоров – М.: Книга по Требованию, 2023. – 337 с.

**ISBN 978-5-458-37484-2**

В монографии рассмотрены вопросы теории фазовых превращений в сталях и сплавах титана в неравновесных условиях, характерных для сварки, а также ряд процессов термической и термопластической обработки, осуществляемых при непрерывном изменении температуры. Дан анализ механизма задержанного разрушения закаленной стали и сплавов титана с различным пределом текучести и условий образования холодных трещин в сварных соединениях этих материалов. Систематизированы и предложены новые меры предупреждения трещин путем рационального легирования и применения технологических средств сварки термической и термомеханической обработки. Разработана система критериев расчетного выбора параметров режимов и технологии сварки и последующей термообработки, обеспечивающих оптимальные свойства и структуру сварных соединений. Рассмотрены новые пути повышения прочности сварных соединений и конструкций с помощью термомеханической и механико-термической обработки. Книга обобщает исследования автора, выполненные в Институте металлургии им. А. А. Байкова в течение 1952—1963 гг. Она предназначается для научных работников, занятых теоретическим изучением металловедения, прочности, технологии сварочных процессов, термической и термопластической обработки, а также для широкого круга инженеров—сварщиков и термистов, занятых в химическом, энергетическом и общем машиностроении, судостроении, оборонной и авиационной промышленности.

**ISBN 978-5-458-37484-2**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2023  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2023

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 оригиналe, 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.



## ОТ РЕДАКТОРА

---

Легированные стали повышенной и высокой прочности занимают в народном хозяйстве одно из ведущих мест среди материалов для ответственных сварных конструкций. Титан и его сплавы являются новыми конструкционными материалами. Благодаря исключительно выгодному сочетанию удельной прочности с коррозионной стойкостью и теплоустойчивостью, они с каждым годом находят все новые и новые области применения, с успехом заменяя ряд высокопрочных и пержавеющих сталей, сплавов алюминия, магния и некоторых других цветных металлов. В настоящее время сплавы титана наряду с легированными сталями используются как в новых отраслях техники (ракетостроение, атомная энергетика, реактивная авиация), так и в судостроении, энергетическом, химическом и общем машиностроении. В решениях партии и правительства, направленных на скорейшее создание материально-технической базы коммунизма и укрепление обороноспособности нашей страны, развитию производства высокопрочных сталей и сплавов титана уделяется первостепенное внимание.

Успех в создании и внедрении в промышленность новых марок высокопрочной легированной стали и сплавов титана во многом определяется степенью разработки вопросов металловедения и металлургии сварки этих материалов. Уже сейчас можно утверждать, что ряд требований (чистота, химический состав, структура и свойства основного металла, присадочные материалы), определяемых сварочными процессами, способствовал улучшению технологии металлургического производства и уточнению систем легирования и допустимого содержания примесей. Особенно это относится к сплавам титана, производство которых находится в стадии становления.

Высокий уровень развития сварочных процессов у нас в стране был достигнут в годы советской власти благодаря фундаментальным исследованиям советских ученых в области новых источников энергии, способов и оборудования для сварки, теории тепловых процессов, металлургии, металловедения и прочности, проведенным в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР, ЦНИИТМаш, ИМЕТ им. А. А. Байкова, МВТУ, ЛПИ, МАТИ, ЦКТИ, ЦНИИЧермет и ряде других институтов и заводских лабораторий. К их числу относятся также исследования по теории и технологиям сварки легированной стали повышенной и высокой прочности и сплавов титана.

Среди этих трудов исследования М. Х. Шоршорова отличаются своим подходом к изучению и регулированию физических процессов в металлах при сварке. Этот подход основан на теории тепловых процессов и на тех расчетных методах, которыми она располагает для анализа изменения температуры, деформаций и напряжений в сварных соединениях в зависимости от способа, параметров режима и технологии сварки. Рассматриваемый комплекс работ М. Х. Шоршорова отличается также систематичностью исследований, разнообразием методических средств, а главное — широтой и глубиной теоретического анализа фазовых превращений в неравновесных условиях и их влияния на прочность металлов при сварке. Эти работы во многом способствовали созданию и развитию нового научного направления в теории сварочных процессов, охватывающего вопросы физического металловедения сварки, разработка которых требует учета одновременного влияния сложных тепловых, механических и химических воздействий на металл.

В монографии рассмотрены следующие основные вопросы.

1. Фазовые превращения и структурные изменения легированной стали и сплавов титана в условиях непрерывного нагрева и охлаждения при сварке с учетом изменений физической и химической неоднородности высокотемпературных фаз, а также факторы и явления, определяющие степень этой неоднородности: характер исходной структуры; взаимодействие мигрирующих границ с примесями и легирующими элементами при собирательной рекристаллизации; перераспределение легирующих элементов и примесей между матрицей и новыми твердыми и жидкими фазами, образующимися при высокотемпературном нагреве; гомогенизация; взаимодействие дислокаций, возникающих вследствие пластической деформации, с легирующими элементами и примесями и т. д.

2. Механизм задержанного разрушения закаленной стали и сплавов титана с различным пределом текучести и образования холодных трещин в сварных соединениях этих материалов (рассматривается с позиций современных представлений теории вакансий и дислокаций); причины, условия возникновения и меры предупреждения этого технологического дефекта, в частности путем термомеханической обработки сварных изделий.

3. Критерии расчетного выбора технологии и режимов сварки, основанные на установлении связи между параметрами термических циклов и изменениями структуры и механических свойств сварных соединений с учетом рационального сочетания режимов термообработки до и после сварки; характеристики свариваемости сталей и сплавов титана различных структурных классов и рекомендации по их легированию; повышение прочности сварных соединений сталей и сплавов титана с помощью термомеханической и механико-термической обработки.

4. Новые методы и аппаратура, применяемые для исследования кинетики фазовых превращений и изменений структуры и свойств металлов при сварке, для оценки сопротивляемости металлов задержанному разрушению и образованию холодных трещин при сварке, а также для определения основных характеристик свариваемости металлов и сплавов.

Новейшие представления в области физического металловедения, теории дислокаций, механики материалов и теории тепловых процессов при сварке позволили автору дать современную физическую трактовку процессов, определяющих структуру и свойства сварных соединений, а также предложить ряд новых методов их исследования и регулирования. Практическая ценность монографии заключается в том, что она обосновывает расчетный выбор технологии сварки сталей и сплавов титана и пролагает новые пути повышения прочности сварных соединений и конструкций из этих материалов.

Монография построена в основном на материалах оригинальных исследований автора, охватывающих большую группу промышленных и опытных перлитных и мартенситных сталей,  $\alpha$ - и  $\alpha + \beta$ -сплавов титана. Исследования проведены в 1952—1963 гг. в Институте металлургии им. А. А. Байкова.

Монография предназначена для научных работников и инженеров, занятых изучением металловедения и технологии сварки, термической обработки и новых процессов повышения прочности металлов и сварных конструкций, основанных на комбинации термической обработки с пластической деформацией. Благодаря разработке ряда общих вопросов теории фазовых превращений в неравновесных условиях и механизма задержанного разрушения металлов книга представляет интерес и для специалистов в области физического металловедения и прочности.

Член-корреспондент АН СССР Н. Н. РЫКАЛИН

## ВВЕДЕНИЕ

---

Основные проблемы повышения конструктивной прочности сварных изделий из перлитных и мартенситных сталей и  $\alpha$ - и  $\alpha+\beta$ -сплавов титана связаны с высокой склонностью этих материалов к образованию холодных трещин при сварке и задержанному разрушению, а также с понижением пластичности и прочности соединений в сравнении с основным металлом. В ряде случаев известные методы упрочнения за счет легирования и термической обработки не позволяют удовлетворительно решать эту проблему без специальных методов регулирования структуры и свойств сварных соединений в процессе сварки. Указанные стали и сплавы титана обладают повышенной реакцией на термический цикл сварки, в результате чего в околосшовной зоне, шве и других участках сварных соединений происходят неблагоприятные изменения структуры и свойств. К основным явлениям, лимитирующим повышение конструктивной прочности сварных изделий из этих материалов, следует отнести: развитие химической и физической неоднородности в сварных швах (внутрикристаллическая неоднородность, полигонизация), в околосшовной зоне (рост зерна, перегрев) и на границе сплавления, образование хрупких закалочных структур в шве и околосшовной зоне, разупрочнение основного металла в участках высокого отпуска или рекристаллизации обработки и т. д.

В настоящее время исследователи и практики в области сварки располагают более широкими возможностями воздействия на металл сварных швов, чем на основной металл в зоне термического влияния и особенно в околосшовном ее участке. К этим мерам улучшения свойств сварных швов относятся: использование присадочного металла, отличающегося от основного металла химическим составом или малым содержанием вредных примесей; применение защитных газов или специальных модифицирующих галоидных бескислородных флюсов, сварка без присадочного металла и т. д. Известные меры воздействия на основной металл в околосшовной зоне и других участках зоны термического влияния (регулирование скорости охлаждения, длительности пребывания металла выше определенной критической температуры и т. п. путем изменения погонной энергии источников теплоты, применения специальных видов технологии многослойной сварки и подогрева, термообработки до и после сварки) не всегда приводят к положительным результатам. В большинстве случаев это обусловлено недостаточной исследованностью кинетики фазовых превращений и структурных изменений в специфических условиях термического цикла сварки, а в ряде случаев неудачной композицией основного металла и неправильным выбором присадочных материалов.

Структурные изменения перлитных и мартенситных сталей и  $\alpha$ - и  $\alpha+\beta$ -сплавов титана в твердом состоянии имеют много общих черт благодаря наличию полиморфных превращений. Близким является также и подход к регулированию структуры и свойств при сварке и термообра-

ботке. Однако имеется и ряд существенных отличий, определяющих неодинаковое поведение этих материалов в процессе обработки давлением, сварки, термической обработки и в эксплуатации. Наиболее существенными особенностями сплавов титана являются невозможность исправления грубой перегретой структуры путем фазовой перекристаллизации из-за малого объемного эффекта полиморфного превращения; высокая активность по отношению к атмосферным газам; способность образовывать гидриды; повышенная склонность к локальной внутритерпной деформации из-за отсутствия множественного скольжения у сплавов с  $\alpha$ -структурой, имеющей плотноупакованную гексагональную решетку; замедленный эвтектоидный распад; относительно низкая теплопроводность; невысокий модуль упругости; малая разница между величинами пределов текучести и прочности и т. д. Из-за этих, а также некоторых других особенностей обеспечение высоких механических свойств сварных соединений ряда сплавов титана часто представляет собой более сложную задачу, чем при сварке перлитных сталей. Однако некоторые высокопрочные сплавы титана имеют ряд преимуществ в сравнении с мартенситными сталью с повышенным содержанием углерода, которые вследствие образования более хрупких закалочных структур обладают повышенной склонностью к растрескиванию.

Уже из этого краткого анализа видно, что постановка параллельного исследования особенностей поведения этих материалов при сварке представляет определенный научный и практический интерес. Целесообразность такого подхода обусловлена еще и тем, что стали и сплавы титана во многих случаях предназначаются для одинаковых объектов. Решение же вопроса о применении того или иного материала зависит не только от более высоких эксплуатационных показателей, но часто и от технологических преимуществ при производстве сварных конструкций.

При написании монографии автор ставил перед собой задачу разработать и рассмотреть следующие основные вопросы теории и практики металловедения сварки сталей и сплавов титана:

1) особенности и закономерности фазовых превращений в сталях и сплавах титана различных систем легирования при нагреве и охлаждении в условиях термических циклов сварки; оценка степени влияния роста зерна, незавершенности процессов гомогенизации и воздействия пластической деформации при сварке на устойчивость высокотемпературных фаз и кинетику их превращений;

2) механизм задержанного разрушения сварных соединений закаливающихся сталей и сплавов титана с различным пределом текучести; оценка сопротивляемости этих материалов образованию холодных трещин при сварке в зависимости от химического состава и структурного состояния;

3) влияние параметров термических циклов сварки на структуру и свойства различных участков сварных соединений сталей и сплавов титана;

4) установление системы критериев (по допустимым значениям параметров термических циклов), позволяющих вести расчеты технологии и режимов однопроходной и многослойной сварки сталей и сплавов титана на основе уравнений теории распространения теплоты при сварке; определение этих критериев для сталей и сплавов титана различных структурных классов и систем легирования; разработка и систематизация методов предупреждения образования холодных трещин и регулирования структуры и механических свойств соединений в процессе сварки и путем рационального сочетания режимов термообработки до и после сварки; разработка новых путей повышения прочности и надежности сварных соединений с помощью термомеханической и механико-термической обработки.

При сварке плавлением превращения в основном металле протекают в сложной и непрерывно изменяющейся обстановке, которая существенно

отличается от термообработки. Наиболее важными процессами, определяющими характер и кинетику превращения в твердом состоянии, являются непрерывный нагрев и последующее охлаждение металла, а также развитие в нем деформаций и напряжений. В то же время фазовые превращения сами оказывают существенное влияние на кинетику развития деформаций и напряжений. Без достаточно полного представления об основных закономерностях этих процессов нельзя анализировать ни кинетику превращений, ни их влияние на технологическую и эксплуатационную прочность сварных соединений. Поэтому перед изложением особенностей фазовых превращений в характерных для сварки неравновесных условиях необходимо было кратко рассмотреть основные виды превращений в сталях и сплавах титана в твердом состоянии в изотермических условиях и дать анализ обстановки, в которой они протекают при сварке, т. е. обсудить закономерности связи между изменением температуры и развитием деформаций и напряжений.

Монография состоит из семи глав. В гл. I рассмотрены основные положения теории фазовых превращений в металлах и сплавах в твердом состоянии, а также закономерности превращений железа, титана и их сплавов в изотермических условиях. В гл. II показаны условия их протекания в зоне термического влияния при сварке плавлением. В гл. III описаны новые методы и аппаратура для изучения кинетики фазовых превращений и изменений структуры и свойств металлов в неравновесных условиях при сварке и термомеханической обработке, а также для исследования задержанного разрушения и образования холодных трещин. В гл. IV приведены результаты исследования превращений при непрерывном нагреве, кинетики роста зерна и гомогенизации аустенита и  $\beta$ -фазы сплавов титана при сварке. В гл. V рассмотрены основные закономерности фазовых превращений в условиях непрерывного охлаждения при сварке. В гл. VI изложен механизм задержанного разрушения сталей и сплавов титана, установлены критерии оценки этого явления и показано влияние легирующих элементов, параметров термического цикла и жесткости сварных соединений на сопротивляемость этих материалов образованию холодных трещин при сварке. В гл. VII приведены характеристики свариваемости сталей и сплавов титана различных структурных классов и систем легирования, сформулированы критерии выбора технологии и режимов их сварки и показаны пути регулирования структуры и свойств сварных соединений как в процессе сварки, так и при последующей термической, термомеханической или механико-термической обработке.

Главное внимание в монографии удалено процессам в зоне термического влияния не только в связи с тем, что они недостаточно рассмотрены в работах других авторов, но в основном потому, что наиболее резкие изменения структуры и свойств сплавов при сварке в однородных сочетаниях происходят именно в этой зоне сварных соединений. Однако исследования свариваемости сталей и сплавов титана лишь в зоне термического влияния не могли бы претендовать на полноту без одновременного анализа процессов в шве и на границе сплавления. Поэтому эти вопросы также рассмотрены в настоящей работе, хотя и в более ограниченном объеме.

Включенные в монографию исследования выполнены под руководством автора в лаборатории теории сварочных процессов Института металлургии им. А. А. Байкова. Автор благодарит своего учителя, члена-корреспондента АН СССР Н. Н. Рыкалина за постоянное внимание и поддержку, которые он оказывал при постановке и проведении рассматриваемого комплекса работ, а также сотрудников В. В. Белова, Г. Е. Капилову, Г. Н. Клебанова, А. С. Котелкина, В. Н. Матханова, В. Н. Мещерякова, Г. В. Назарова, А. М. Сенина, Б. А. Смирнова и И. Ф. Суркову, которые участвовали в создании аппаратуры и проведении экспериментальной части исследований.

## ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ И СПЛАВАХ ТИТАНА В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

### § 1. Основные виды превращений в сталях и сплавах титана в твердом состоянии

Железо и титан относятся к металлам переходных групп и претерпевают полиморфное превращение. Железо имеет две модификации:  $\gamma$ -Fe с гранецентрированной кубической решеткой (параметр  $a=3,565 \text{ \AA}$  при  $910^\circ$ ), устойчивая в равновесных условиях при температурах от  $910$  до  $1401^\circ$ , и  $\alpha$ -Fe с объемноцентрированной кубической решеткой ( $a=2,862 \text{ \AA}$  при  $910^\circ$ ), устойчивая при температурах ниже  $910^\circ$  и в интервале  $1401$ — $1539^\circ$ , т. е. до температуры плавления [1, 2].

У титана также имеются две модификации: высокотемпературная  $\beta$ -Ti с объемноцентрированной кубической решеткой ( $a=3,29 \text{ \AA}$  при  $900^\circ$ ) и низкотемпературная  $\alpha$ -Ti с плотно упакованной гексагональной ( $a=2,950 \text{ \AA}$ ,  $c=4,683 \text{ \AA}$ ,  $c/a=1,587$  при  $25^\circ$ ). Температура полиморфного превращения титана в равновесных условиях составляет  $882^\circ$  [3].

Величина гистерезиса, т. е. разность между критическими точками превращений при быстром нагреве и охлаждении (до  $10\,000 \text{ град/сек}$ ), у железа составляет всего  $5$ — $10^\circ$ , а у титана — около  $30^\circ$ . При охлаждении смещение критических точек значительно более резкое, чем при нагреве. Наличие гистерезиса связано с трудностью образования зародыша новой фазы.

В железе превращение  $\gamma$ -Fe  $\rightarrow$   $\alpha$ -Fe происходит с увеличением удельного объема на  $3\%$  [2], а в титане  $\beta$ -Ti  $\rightarrow$   $\alpha$ -Ti — с уменьшением объема примерно на  $0,13\%$ . Средний коэффициент линейного расширения  $\alpha$ -Ti в интервале  $0$ — $100^\circ$  составляет  $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$  и на  $27\%$  меньше, чем у  $\alpha$ -Fe ( $11,7 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ). Объемный эффект полиморфного превращения титана рассчитан нами при температуре превращения по данным работы [3] с учетом коэффициента линейного расширения  $\alpha$ -фазы титана, который был принят равным  $10 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ , т. е. средним в интервале температур  $25$ — $900^\circ$ . Расчеты по параметрам решеток и по удельным объемам дают примерно одинаковые результаты.

Основными видами фазовых превращений в перлитных и мартенситных сталях и  $\alpha$ - и  $\alpha$ + $\beta$ -сплавах титана являются:

- 1) полиморфное превращение, в частности превращение мартенситного типа;
- 2) эвтектоидный распад и обратное ему образование твердого раствора из эвтектоидной смеси;
- 3) распад пересыщенных твердых растворов (старение, отпуск мартенсита) и обратное ему растворение в твердом состоянии.

Превращения первых двух видов в процессе сварки либо полностью завершаются, либо получают существенное развитие. Что касается пре-

вращений третьего вида, то в большинстве случаев из-за недостатка времени при сварке реализуются преимущественно их начальные стадии. Наиболее резкие изменения структуры и свойств основного металла при сварке сталей происходят вследствие превращений первого и второго видов, а при сварке сплавов титана — первого вида.

Кроме фазовых превращений, в сталях и сплавах титана протекают процессы возврата, полигонизации, рекристаллизации и роста зерна (собирательная рекристаллизация), также приводящие к существенным изменениям структуры и свойств.

При сварке сложных сплавов эти фазовые и структурные превращения могут развиваться не только в разных, но также и в одних и тех же участках сварного соединения. В ряде случаев температурные интервалы этих превращений накладываются друг на друга, вследствие чего при изучении их кинетики нередко возникают трудности.

По своему механизму перечисленные выше превращения разделяются на диффузионные и бездиффузионные. Из числа фазовых превращений к диффузионным относятся превращения второго и третьего видов, т. е. эвтектоидный распад, распад пересыщенных твердых растворов и обратные им превращения. Полиморфные превращения могут протекать как по диффузионной («нормальной»), так и по бездиффузионной (мартенситной) кинетике. Однако между полиморфными превращениями, характеризующимися «нормальной» кинетикой, и диффузионными превращениями второго и третьего видов имеются существенные различия. При полиморфных превращениях величина смещений атомов не превышает межатомного расстояния, а при превращениях второго и третьего видов она его значительно превышает.

При мартенситных превращениях величина смещения атомов также не превышает межатомных расстояний, но в ряде случаев оказывается явно большей, чем при полиморфных превращениях с «нормальной» кинетикой. Поэтому основное различие в полиморфных превращениях этих двух типов заключается не в величине, а в характере перемещения атомов от решетки исходной фазы к решетке новой фазы. Когда полиморфное превращение протекает по «нормальной» кинетике, рост новой фазы идет путем перемещения одиночных атомов по схеме «атом за атом». Диффузионный характер этого процесса подтверждается тем, что энергия его активации близка к энергии активации самодиффузии или диффузии металлического компонента сплава. При мартенситном превращении происходит коллективное (групповое) направленное перемещение атомов. Энергия активации этого процесса в десятки раз меньше энергии активации диффузии.

Таким образом, ни отсутствие изменения химического состава фаз [4], ни величина смещения атомов не являются достаточными признаками бездиффузионных превращений [1, 5, 6].

Несмотря на различия в величине и характере перемещения атомов перечисленные выше три вида фазовых превращений, а также процессы рекристаллизации протекают путем образования и роста зародышей. Поэтому с точки зрения термодинамики движущими силами этих процессов являются одни и те же энергетические факторы.

Учитывая особую роль полиморфных и эвтектоидных превращений в формировании структуры и свойств доэвтектоидных сталей и  $\alpha$ - и  $\alpha + \beta$ -сплавов титана при сварке, кратко рассмотрим в этой главе основные закономерности этих превращений и их кинетику в изотермических условиях на примере железа, титана и сплавов на их основе с различным типом диаграммы состояния. Особенности фазовых превращений, а также рекристаллизационных процессов в условиях непрерывного нагрева и охлаждения будут подробно изложены в последующих главах.

## § 2. Особенности фазовых превращений железа, титана и их сплавов с позиций общей термодинамической теории и представлений о несовершенствах кристаллического строения твердых металлов

В настоящее время при анализе кинетики фазовых превращений в твердом состоянии исходят из принципа структурного и размерного соответствия С. Т. Конобеевского и П. Д. Данкова [7] и представлений о когерентном и некогерентном образовании и росте зародышей новой фазы, разработанных Г. В. Курдюмовым [8—11], Ч. С. Барретом [12], А. Х. Коттреллом [6] и развитых другими авторами [4, 13—17]. В сравнении с кристаллизацией жидкости основными особенностями фазового превращения в анизотропной твердой среде являются: 1) определенная связь между кристаллографическими ориентировками исходной фазы и зародышей новой фазы; 2) возникновение внутренних напряжений и деформаций при образовании и росте зародышей новой фазы; 3) значительно меньшая диффузионная подвижность атомов; 4) наличие несовершенств в строении реальных кристаллов и поликристаллов (в виде точечных и линейных дефектов, границ блоков, двойников, плоскостей сдвига и границ зерен), а также наличие химической неоднородности (в сплавах).

Из термодинамики известно, что условием равновесия фаз в однокомпонентной системе является равенство их свободных энергий ( $F_1 = F_2$ ), что может иметь место только при определенной температуре  $T_0$ . При охлаждении ниже  $T_0$  фаза 1 перейдет в фазу 2, а при нагреве выше  $T_0$ , наоборот, фаза 2 — в фазу 1, поскольку в каждом из этих случаев система будет стремиться уменьшить свободную энергию.

В бинарных сплавах температура  $T_0$ , характеризующая равенство свободных энергий фаз, изменяется в зависимости от концентрации компонентов так, как это показано на рис. 1. Однако  $T_0$  здесь не соответствует условиям равновесия, так как в сплавах равновесие фаз наблюдается не при равенстве их свободных энергий, а при равенстве производных свободных энергий по концентрациям фаз  $(\partial F / \partial C_i)_{P,T=\text{const}}$ , что выражается наличием общих касательных к кривым свободной энергии фаз при равновесных концентрациях.

По термодинамической теории образования зародышей, разработанной Гиббсом [18], Тамманом [19], Френкелем [20] и др., отдельные зародыши новой фазы, возникающие в исходной фазе вследствие тепловых флуктуаций (флуктуаций энергии колеблющихся атомов) и флуктуаций состава (в сплавах), могут стать устойчивыми только после достижения определенных критических размеров. Для образования и роста зародыша свободная энергия  $F$  системы должна возрасти на величину

$$\Delta F = \Delta F_V + \Delta F_S + \Delta F_E,$$

где  $\Delta F_V = V_2(F_2 - F_1)$  — затрата энергии на переход некоторого объема исходной фазы 1 в новую фазу 2 (здесь  $V_2$  — объем новой фазы;  $F_2 - F_1$  — разность свободных энергий новой и старой фаз, отнесенная к единице объема);

$\Delta F_S = S\lambda$  — затрата энергии на создание поверхности раздела фаз (здесь  $S$  — поверхность зародыша новой фазы;  $\lambda$  — поверхностное натяжение на межфазной границе или ее свободная энергия, отнесенные к единице поверхности);

$\Delta F_E = V_2 E$  — затрата энергии на преодоление энергии упругой и пластической деформаций, возникающих вследствие искажения кристаллических решеток на межфазной границе и разницы в удельных

объемах фаз (здесь  $E$  — энергия упругой и пластической деформаций, отнесенная к единице объема зародыша новой фазы).

Приведенное уравнение выражает общую свободную энергию фазового превращения.

В однокомпонентной системе число флюктуаций, приводящих к образованию частиц новой фазы, резко возрастает вблизи  $T_0$ . Эти флюктуации непрерывно возникают и разрушаются. Поэтому образование частиц

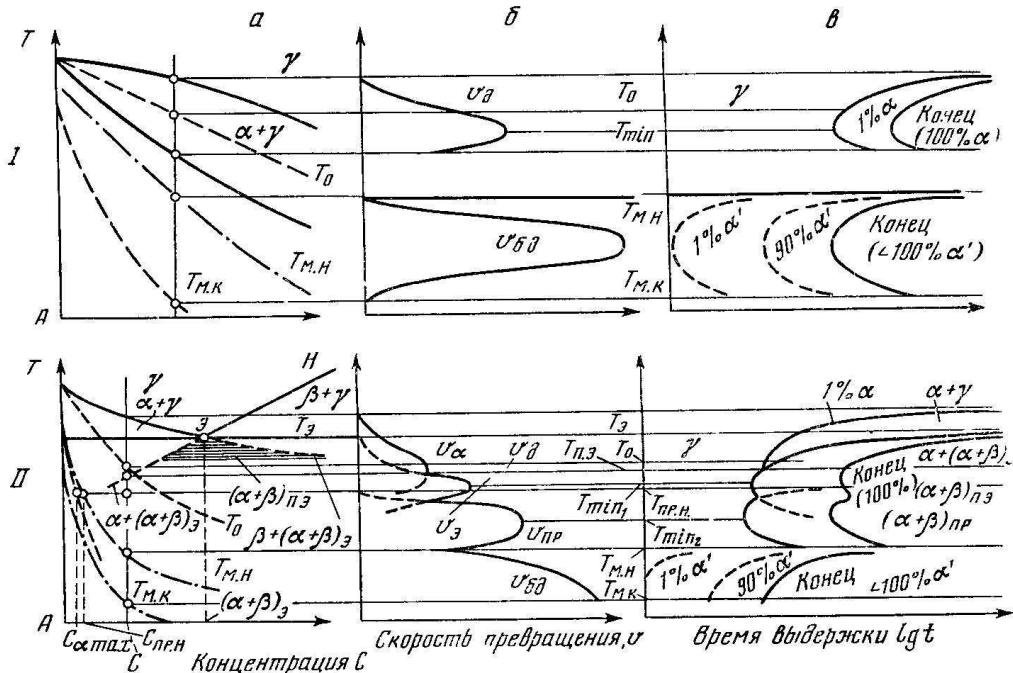


Рис. 1. Превращения в двойных сплавах, богатых компонентом А:

I — сплавы типа твердых растворов с неограниченной растворимостью; II — сплавы с эвтектоидным превращением; а — диаграммы состояний; б — скорости превращения; в — кинетика превращений в изотермических условиях

$T_{\text{м.и}}$  — температура начала мартенситного превращения;  $T_{\text{м.к}}$  — температура конца мартенситного превращения;  $T_{\text{пр.и}}$  — температура начала промежуточного превращения;  $T_{\text{п.э}}$  — температура перлитного, эвтектоидного превращения;  $v$  — средняя объемная скорость превращений;  $v_x = v_\alpha$  (или  $v_\beta$ ) — скорости диффузионных превращений;  $v_{\text{пр}}$  — скорость промежуточного (типа бейнитного) превращения;  $v_{\text{бд}}$  — скорость бедиффузионного (мартенситного) превращения

новой фазы в условиях равновесия принципиально возможно уже при  $T_0$ . Но из-за отсутствия движущей силы превращения, которой является отрицательная величина разности  $\Delta F_F$ , эти частицы оказываются неспособными к росту и исчезают (растворяются). Поэтому при  $T > T_0$  возможность протекания превращения исключена. При переохлаждении исходной фазы 1 ниже  $T_0$  первый член уравнения становится отрицательным. Для образования зародыша повышение свободной энергии требуется только на начальной стадии роста зародыша, так как при достижении некоторого (критического) его размера затрата энергии на образование межфазной поверхности и упругую и пластическую деформации полностью компенсируется за счет перехода части атомов исходной фазы 1 в новую фазу 2, имеющую меньший уровень свободной энергии. Дальнейший рост новой фазы сопровождается уже снижением свободной энергии системы.

В сплавах благодаря наличию широкого «спектра» не только тепловых флюктуаций, но и флюктуаций состава устойчивые зародыши могут образовываться и выше  $T_0$ , но ниже верхней границы двухфазной области