

Лекция 10

Технология термической обработки

Содержание

1. Термическая обработка:
отжиг , закалка и отпуск сталей
2. Термомеханическая обработка
3. Упрочнение поверхности стальных деталей

Отжиг сталей

- **Отжиг** - это первичная операция термической обработки, при которой стали нагревают до определенных температур, выдерживают при этих температурах и затем медленно охлаждают вместе с печью.
- **Цель и назначение отжига** так же разнообразны, как и выполнение. Отжиг применяют для снятия внутренних напряжений, повышения механических свойств металла, улучшения обрабатываемости режущим инструментом, снижения твердости и для подготовки структуры к дальнейшей термической обработке.
- В зависимости от температуры нагрева и назначения различают следующие виды отжига: полный, неполный, отжиг на зернистый перлит, изотермический, диффузионный и т. д.

Виды отжига

Полный отжиг осуществляется главным образом после горячей механической обработки и литья углеродистых и легированных сталей. Основной целью полного отжига кованых и литых деталей является измельчение зерна, уменьшение твердости металла для улучшения его обрабатываемости и устранение внутренних напряжений. Это достигается нагревом, не превышающим 20-40°C верхней критической точки A_{C3} и медленным охлаждением.

Неполный отжиг. Если до отжига структура стали была удовлетворительная, но сталь обладает повышенной твердостью и в деталях имеются внутренние напряжения, то целесообразнее применять неполный отжиг. Детали при таком отжиге нагревают при температуре, немного превышающей точку A_{C1} . Неполный отжиг изменяет структуру перлита, однако, структура феррита может оставаться неизменной. Внутренние напряжения снимаются полностью, и сталь приобретает пониженную твердость.

Виды отжига

Диффузионный отжиг (гомогенизация). Он производится для устранения или уменьшения химической неоднородности, получаемой при затвердевании стальных слитков (дендритная ликвация). Выравнивание химического состава стали и уничтожение дендритной ликвации осуществляется путем диффузии (перемещения) атомов примесей из мест с высокой концентрацией в места с низкой концентрацией. Поэтому диффузионный отжиг стали, проводят при высоких температурах ($1100-1200^{\circ}\text{C}$), с длительной выдержкой (от 10 до 15 час.) и медленным охлаждением.

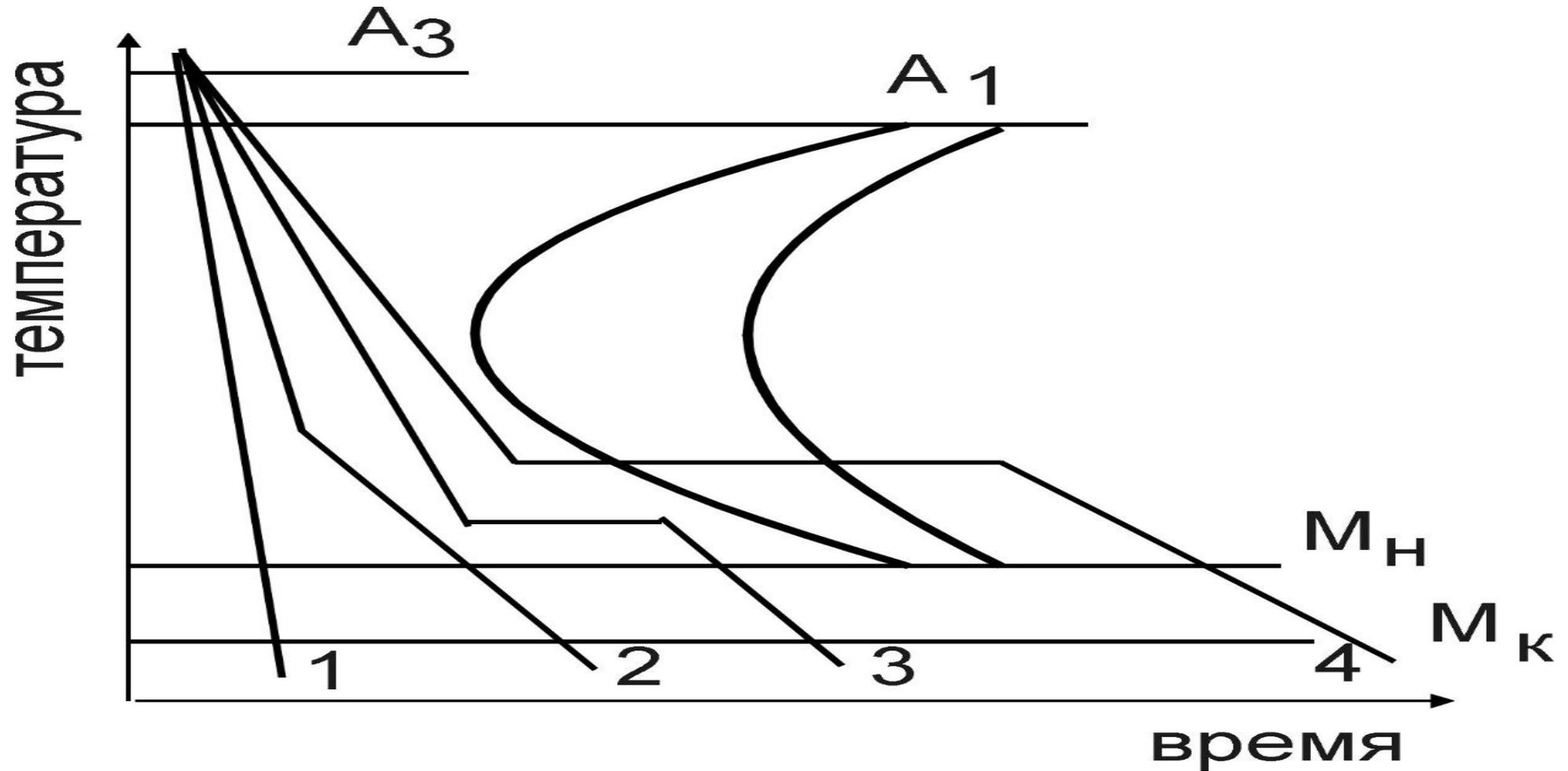
Рекристаллизационный (разупрочняющий) отжиг. При деформации стали в холодном состоянии происходит ее наклеп. Зерна феррита и перлита вытягиваются по направлению деформации, формируется текстура, прочность возрастает, а пластичность резко падает. Рекристаллизационный отжиг обычно производят при температуре $650-680^{\circ}\text{C}$, в результате чего вместо старых вытянутых зерен в исходной структуре образуются новые, равноосные зерна и сталь становится мягкой и пластичной.

Закалка стали

- **Закалкой стали** называют такую операцию термической обработки, при которой стальные детали нагревают до температуры, несколько выше критической, выдерживают при этой температуре и затем быстро охлаждают в воде или масле.
- Основное **назначение закалки** - получение мартенситной структуры с высокими твердостью, прочностью, износостойкостью и другими свойствами. Качество закалки зависит от температуры и скорости нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения.
- Температуру нагрева под закалку для большинства сталей, в том числе и легированных, определяют по положению критических точек A_{c1} и A_{c3} .

Охлаждение при закалке

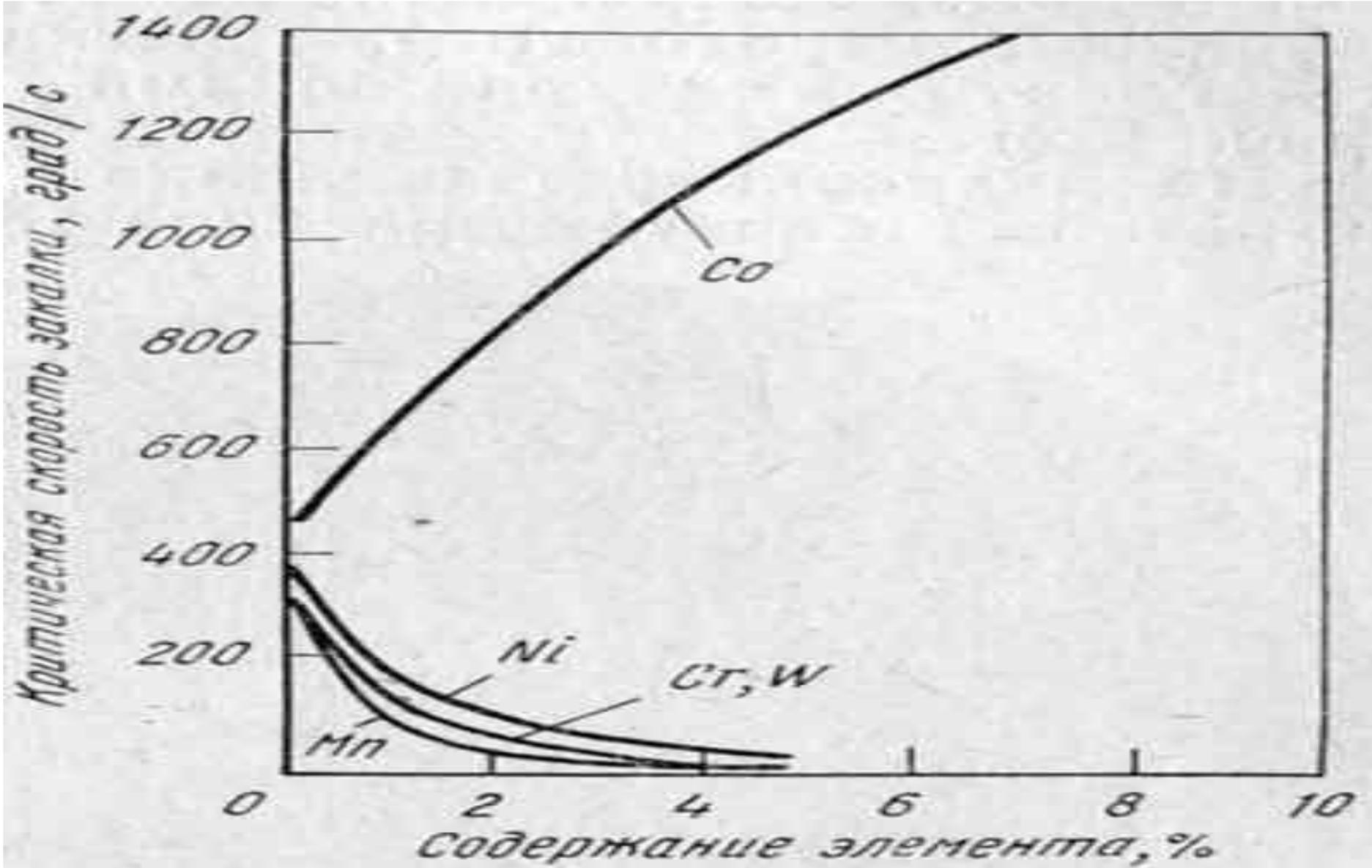
1 – в одной среде, 2 – в двух средах, 3 – ступенчатое охлаждение, 4 – изотермическая закалка



Поверхность изделия охлаждается быстрее, чем сердцевина. Скорость охлаждения на поверхности ($V_{\text{п}}$) может быть больше критической ($V_{\text{кр}}$), а в центре ($V_{\text{ц}}$) – меньше критической ($V_{\text{кр}}$). В этом случае аустенит в поверхностных слоях превратится в мартенсит, а в центре изделие испытает перлитное превращение, т.е. деталь не прокалится насквозь.



Влияние легирующих элементов на критическую скорость закали



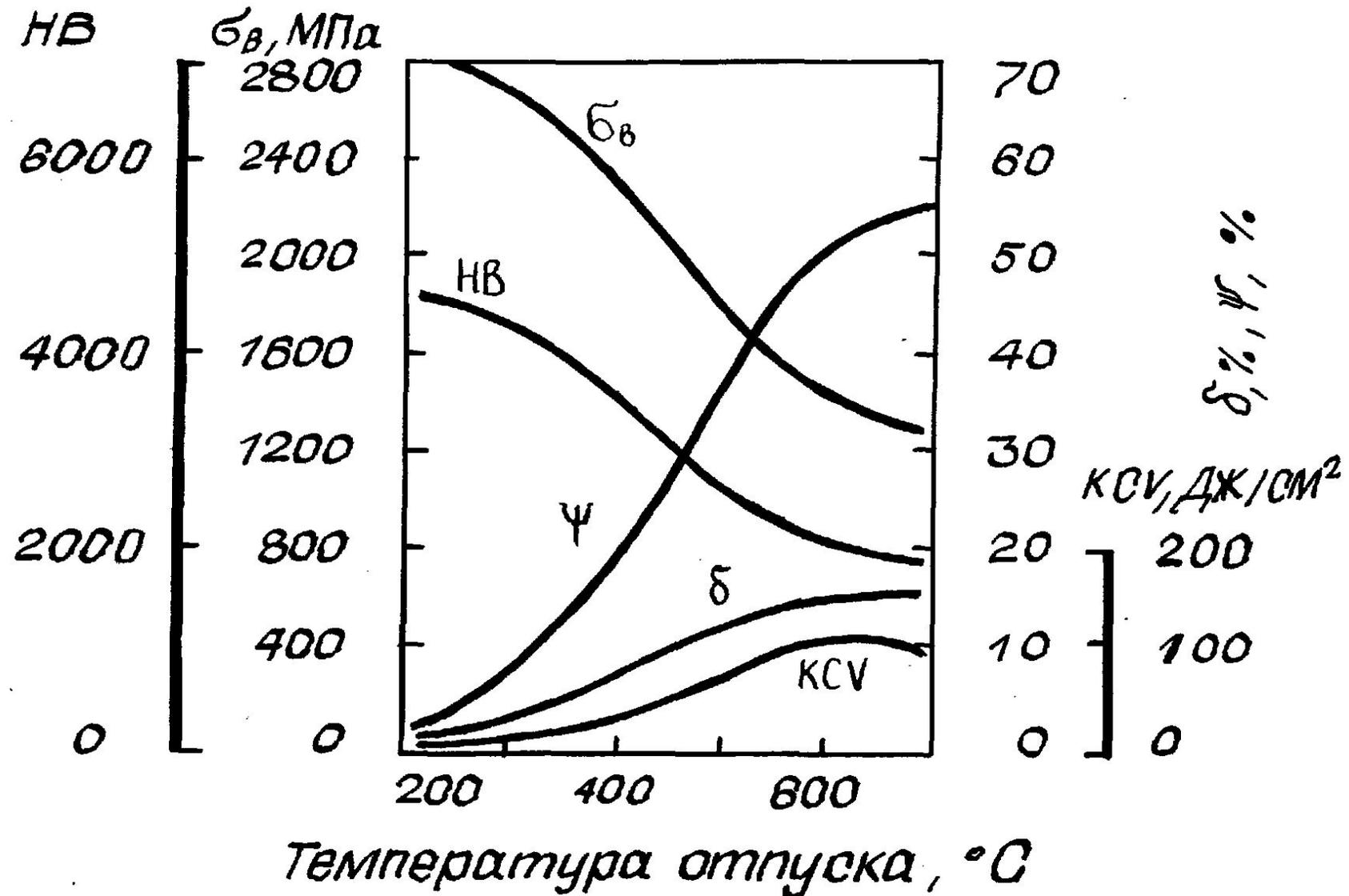
Отпуск стали

- **Отпуском** называют такую операцию термической обработки, при которой закаленную сталь нагревают до температуры ниже критической точки A_{c1} , после чего ее охлаждают.
- В любой закаленной на мартенсит стали появляются не только высокая твердость и прочность, но и большие внутренние напряжения. Поэтому закаленная сталь очень хрупка и легко разрушается от ударных и изгибающих нагрузок. Для снятия внутренних напряжений и повышения вязкости закаленную сталь подвергают **отпуску**.
- При отпуске закаленной стали сильно напряженный мартенсит, имеющий тетрагональную кристаллическую решетку, постепенно распадается на феррито-цементитную смесь и структура из неустойчивого состояния переходит в более равновесное, в результате чего внутренние напряжения уменьшаются. Эти превращения сопровождаются понижением твердости, повышением пластичности и ударной вязкости. Чем выше температура отпуска, тем полнее идет процесс распада мартенсита.

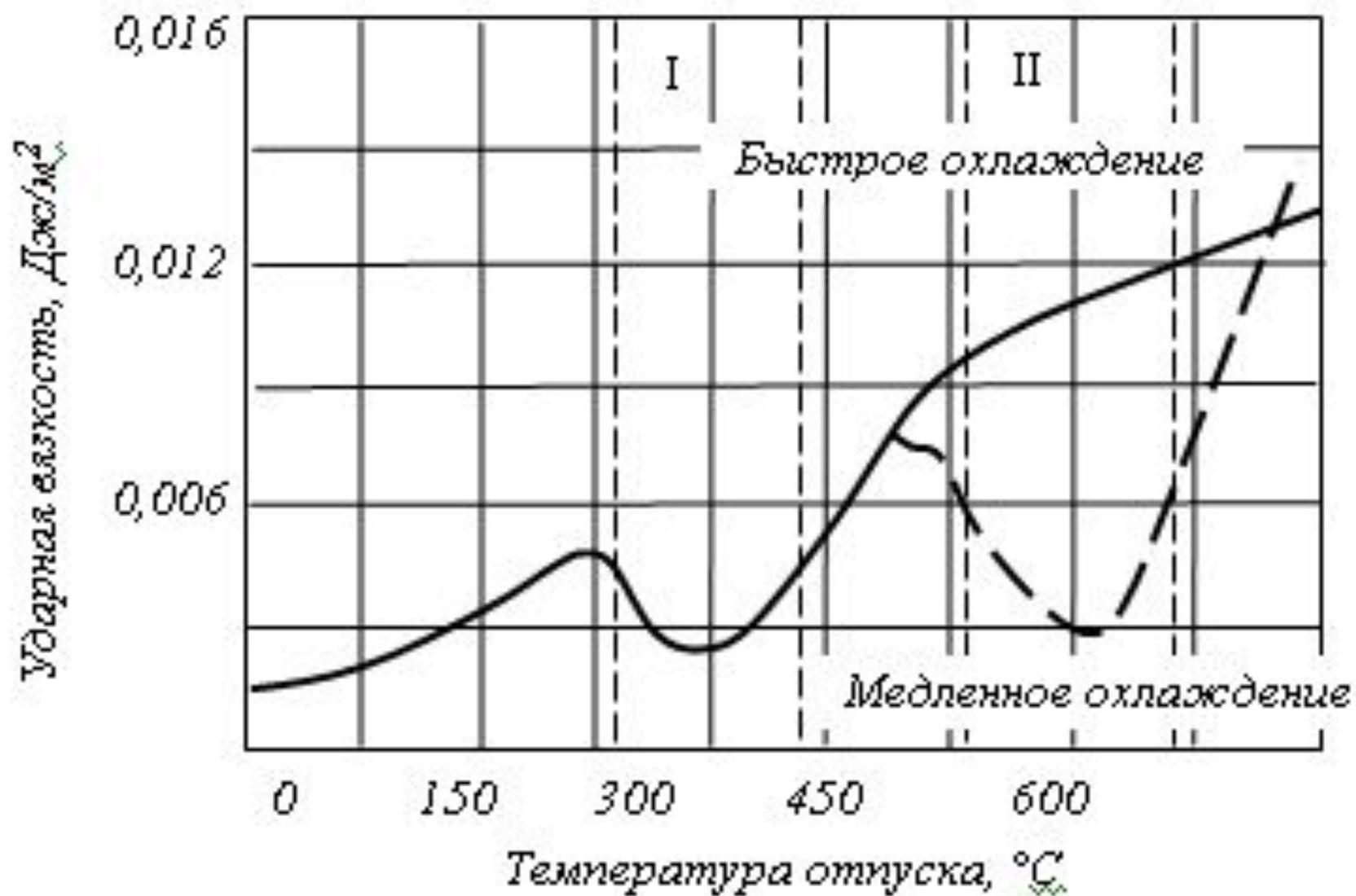
Виды отпуска

- **Низкий отпуск** производится при температуре 150- 200°С. Такой вид отпуска понижает внутренние напряжения при сохранении высокой твердости (58 – 62 HRC) деталей. Низкий отпуск применяют для режущего и измерительного инструмента и деталей из углеродистых и низколегированных сталей: шарикоподшипниковых колец, шариков и роликов, зубчатых колес. У8, 9ХС.
- **Средний отпуск** производят при температуре 350-450°С. В этом интервале температур мартенсит превращается в мелкую феррито-цементитную смесь - троостит. Среднеуглеродистая сталь приобретает твердость около 35-47 HRC, упругость и повышенную сопротивляемость действию переменных и ударных нагрузок. 65Г, 60С2, 50ХФА.
- **Высокий отпуск** осуществляется при температуре 500- 650°С. В результате такого отпуска стальные детали получают высокий комплекс механических свойств. 40Х, 40ХН, 30ХГСА, 40ХНМА.
- При высоком отпуске мартенсит распадается и образуется сорбит, который, как известно, обладает высокой прочностью и хорошей вязкостью. Термическую обработку состоящую из закалки и высокого

Влияние температуры отпуска на механические свойства



Отпускная хрупкость

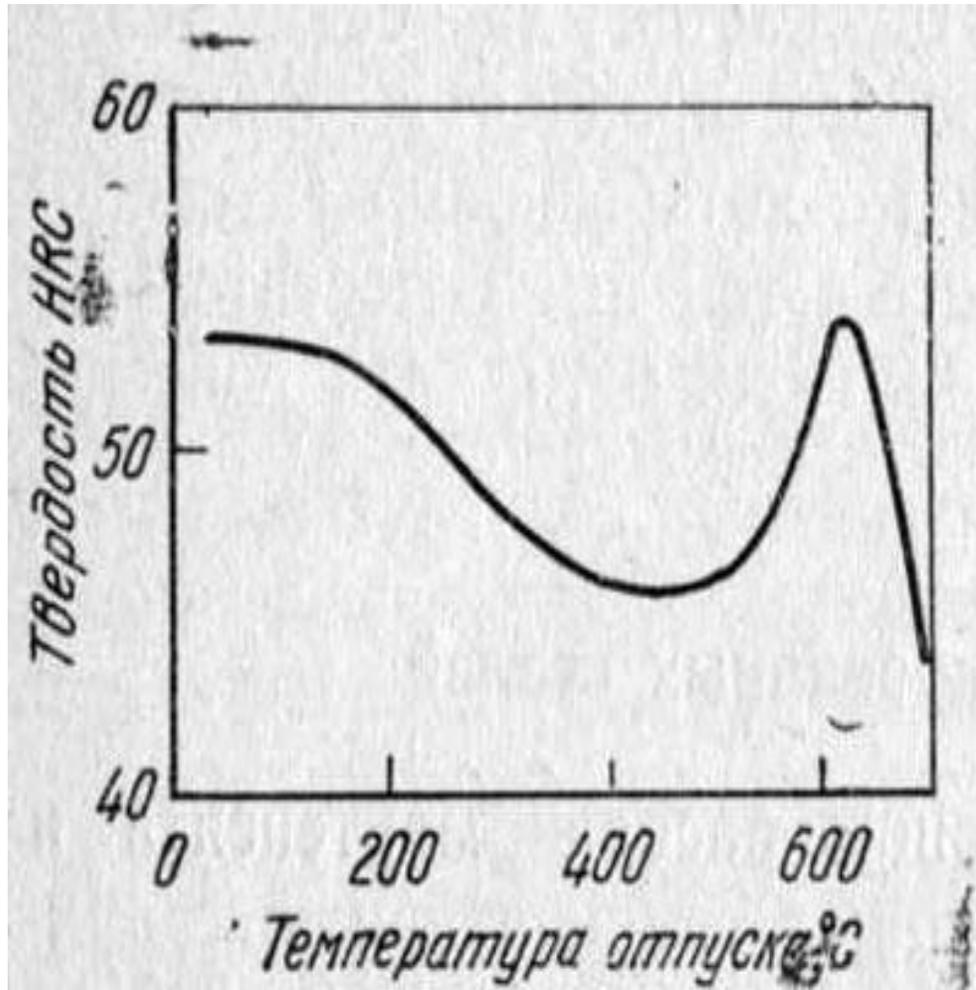


Отпускная хрупкость

Отпускная хрупкость 1-го рода — необратима, снижение пластичности легированной стали после отпуска при 300-400 °С проявляется независимо от состава стали и скорости охлаждения и обусловлена неравномерностью распада мартенсита. Распад при этих температурах идет наиболее полно на границах зерен с образованием карбидов, в результате чего появляется резкое различие между прочностью приграничных слоев зерна и телом самого зерна, что и приводит к хрупкому разрушению.

Отпускная хрупкость 2-го рода — обратима, снижает пластичность закаленной легированной стали после отпуска при 500-600 °С и замедленного охлаждения. После повторного отпуска при этих температурах и быстрого охлаждения отпускная хрупкость 2-го рода устраняется. Природа отпускной хрупкости 2-го рода обычно связана с тем, что при высоком отпуске по границам зерна происходит ускоренное карбидообразование. Это приводит к обеднению карбидообразующими элементами приграничных слоев зерна. При последующем медленном охлаждении происходит обогащение этих приграничных слоев фосфором. В итоге сталь охрупчивается из-за ослабления межзеренной прочности. Повышение чистоты стали и легирование молибденом или вольфрамом является эффективным средством устранения склонности к отпускной хрупкости 2-го рода.

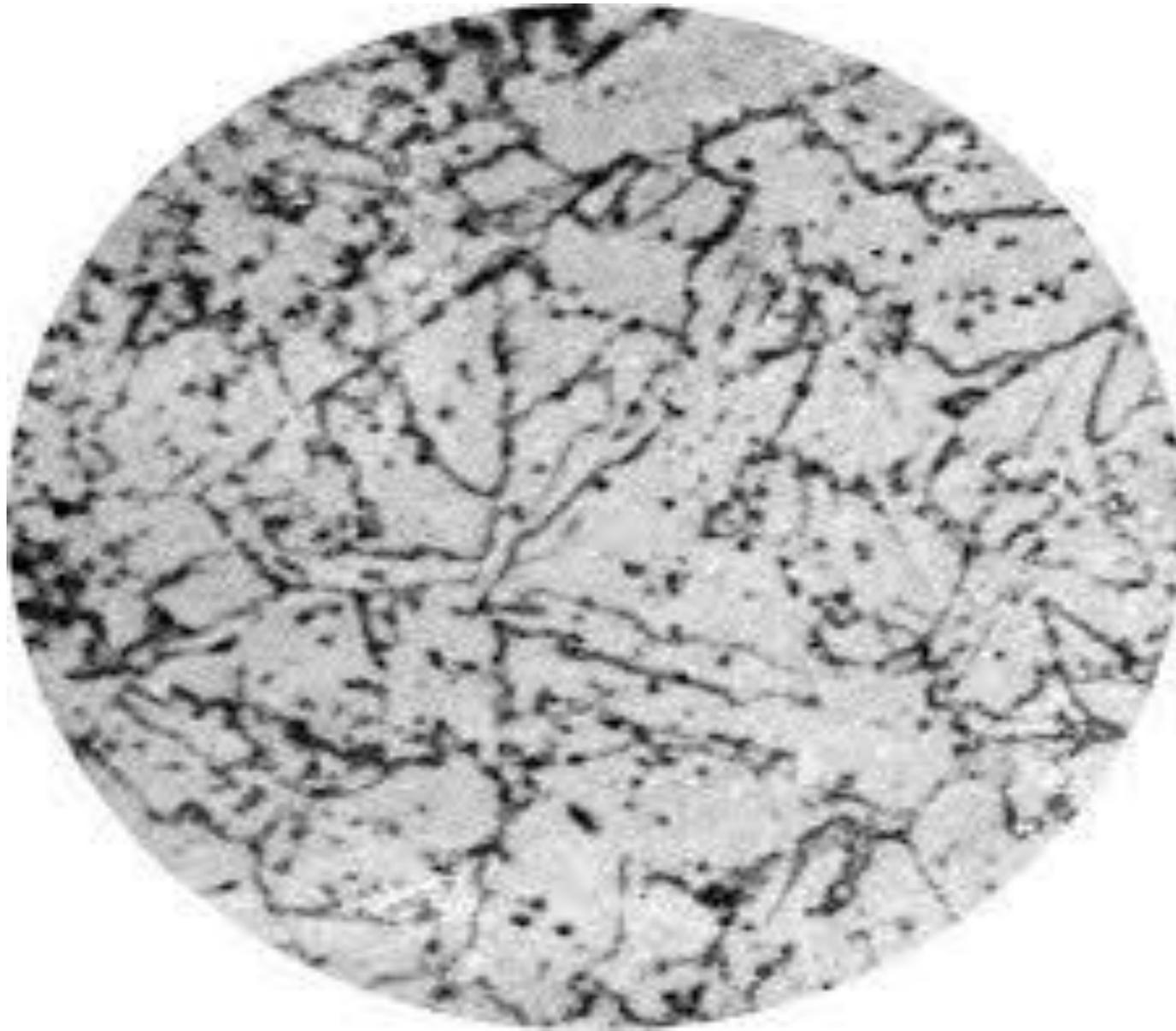
Вторичное твердение стали



В сталях с добавками Ti, Mo, V или W при повышении температуры отпуска после обычного разупрочнения, вызванного распадом мартенсита и коагуляцией частиц цементита, твердость возрастает. Это явление, обнаруживаемое после отпуска при температурах 500 — 600 °C, называют вторичным твердением.

Причина вторичного твердения — замена растворяющихся сравнительно грубых частиц цементита значительно более дисперсными выделениями специального карбида (TiC , V_4C_3 , Mo_2C или W_2C). Частицы этих карбидов, предпочтительно выделяясь на дислокациях, упрочняют отпущенную сталь. (17Г2СФ, 15Г2ФЮ, 08ГДНФ).

Микроструктура стали 15ХМФ (феррит+карбиды)

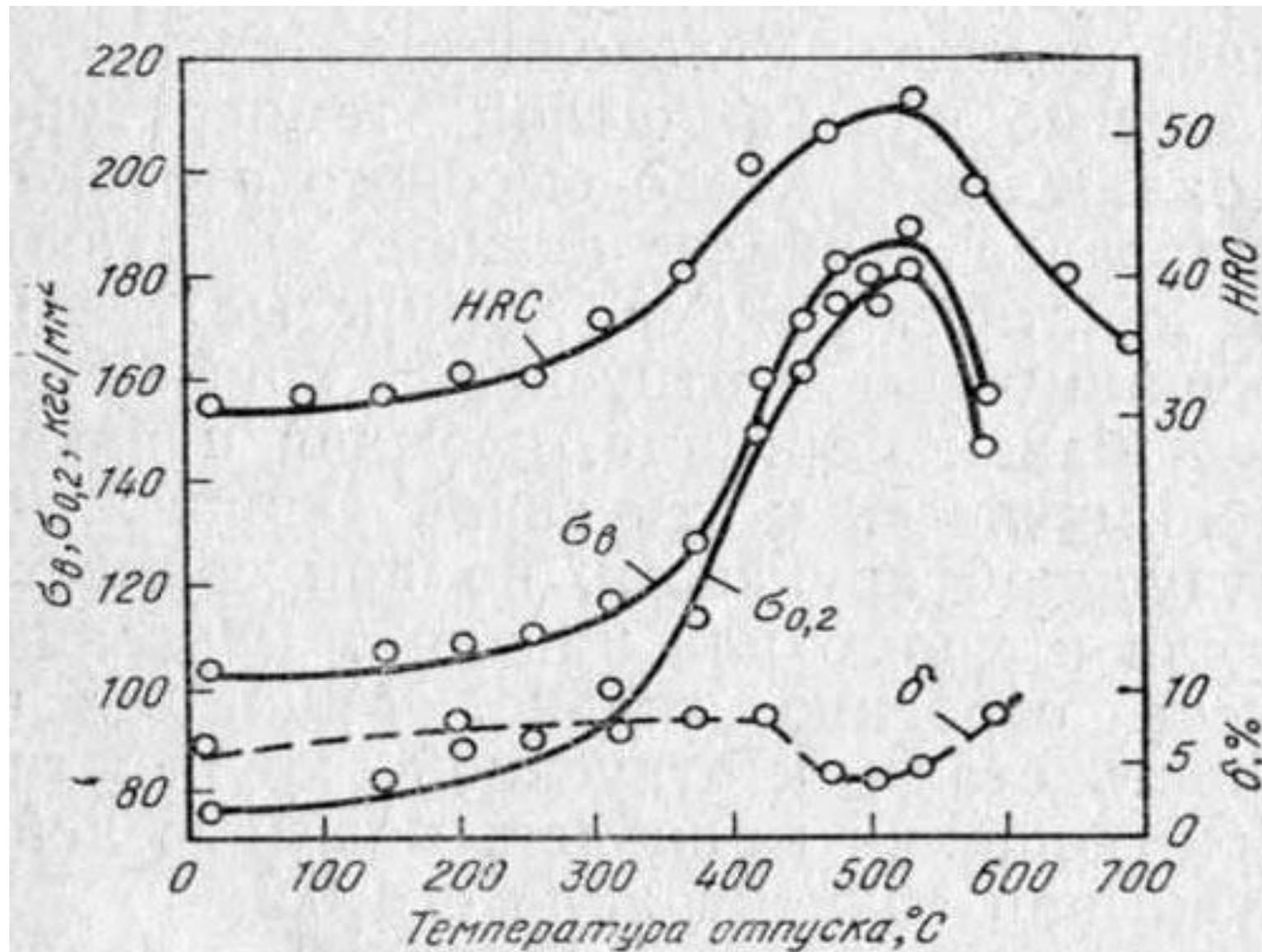


Мартенситно-стареющие стали

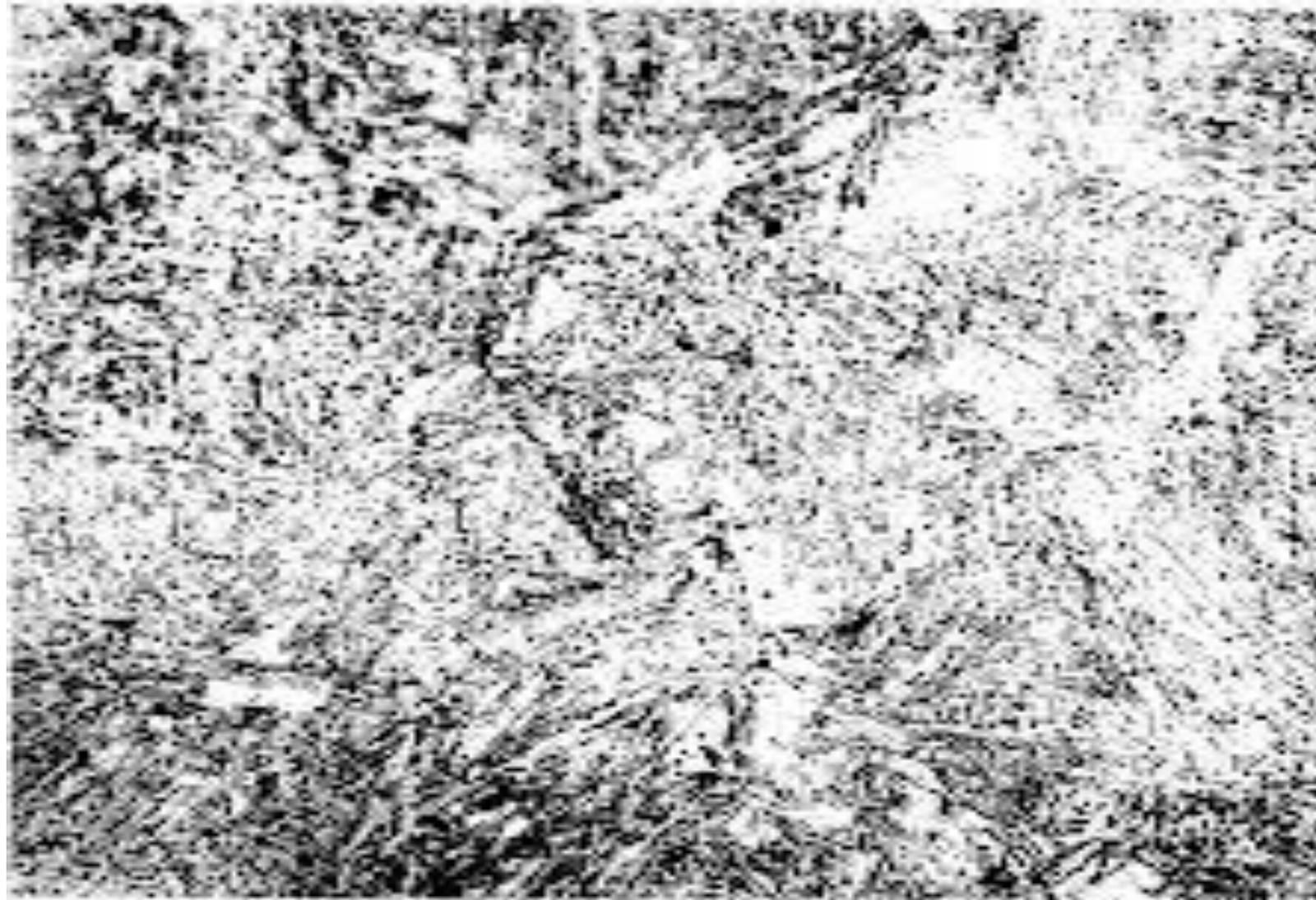
Закаленные мартенситно-стареющие стали имеют структуру мартенсита замещения. Легирующие элементы, вызывающие старение, незначительно влияют на свойства мартенсита, поэтому прочность, пластичность и вязкость закаленных сталей разных составов весьма близки и находятся, как правило, в следующих пределах: $\sigma_B = 900-1200$ МПа; $\sigma_{0,2} = 800-1100$ МПа; $\delta = 15-20\%$; $\psi = 50-80\%$; $KCV = 1,5-3$ МДж/м².

Старение мартенситно-стареющих сталей приводит к повышению их прочности, но одновременно снижает вязкость и пластичность. Наиболее высокое упрочнение достигается для всех сталей при старении в интервале температур 480—520 °С; при этом в зависимости от состава сталей временное сопротивление может повышаться до 1800 МПа. При более высокой температуре старения развиваются процессы, ведущие к разупрочнению: коагуляция частиц упрочняющих фаз и образование устойчивого аустенита вследствие обратного $\alpha \rightarrow \gamma$ — превращения. Примеры марок мартенситно-стареющих сталей: [H12K12M10TЮ](#),
[Шк12М7В7](#), [Шк15М10](#)

Свойства мартенситно-стареющей стали H18K7M5T



Микроструктура мартенситно-стареющей стали (мартенсит + Ni₃Mo)



Фиг. 2

Термомеханическая обработка

- **Термомеханическая обработка** металлов (ТМО) - это совокупность операций деформации, нагрева и охлаждения (в различной последовательности), в результате которой формирование окончательной структуры металла, а следовательно, и его свойств происходит в условиях повышенной плотности и оптимального распределения несовершенств строения (дислокаций, границ и т.д.), созданных пластической деформацией. Таким образом, особенностью этого способа изменения свойств металлических сплавов является сочетание операций обработки металлов давлением и термической обработки.

Технологические схемы ТМО

График низкотемпературной термомеханической обработки

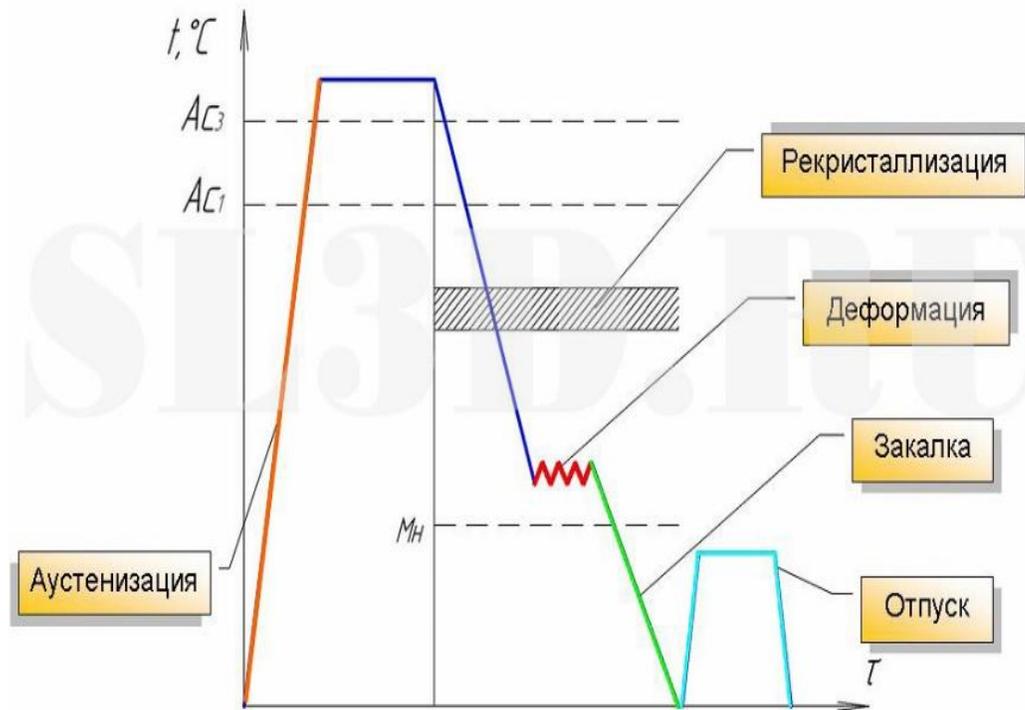


Рисунок 2

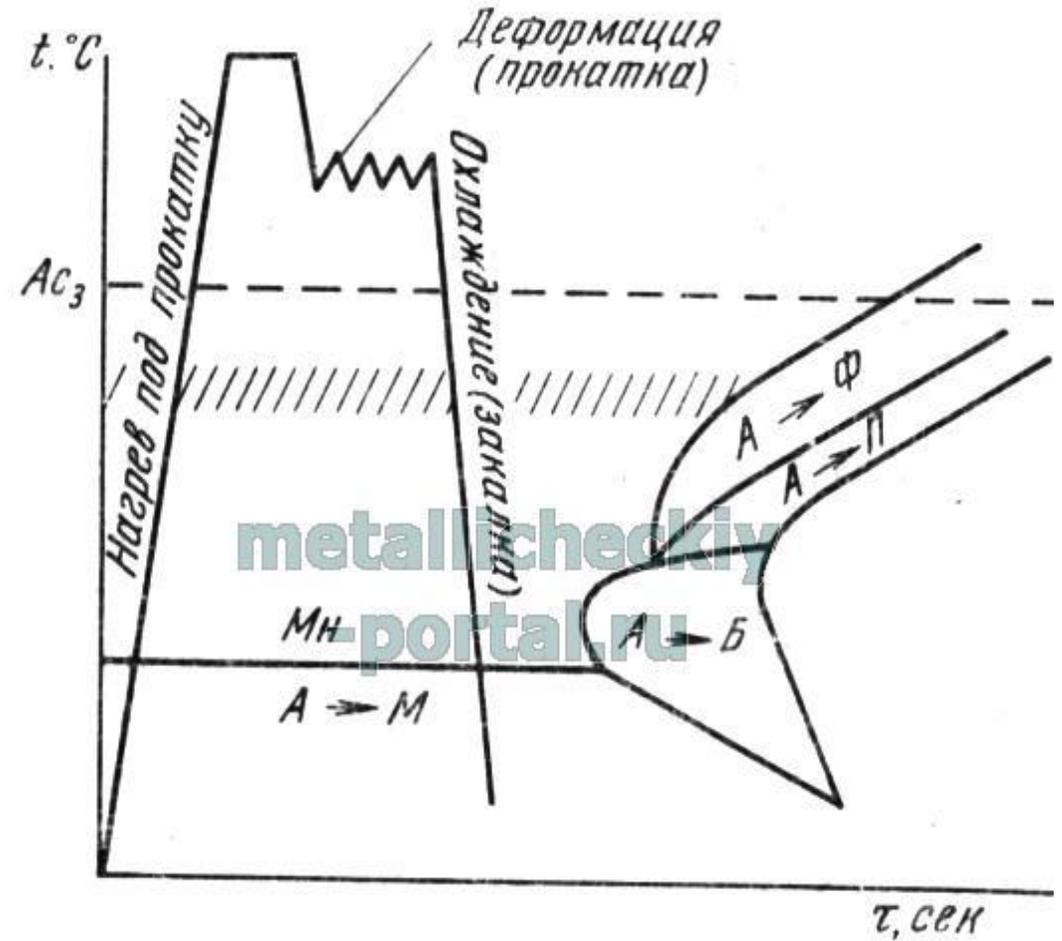


Рис. 7. Технологическая схема ВТМО. Заштрихован интервал температур интенсивной рекристаллизации

Контролируемая прокатка

Контролируемая прокатка — это высокотемпературная обработка низколегированной стали, технология которой основана на определенном сочетании основных параметров горячей деформации: температуры нагрева и конца прокатки; суммарной степени, кратности деформации и ее величины при различных температурах и скорости охлаждения между проходами. В процессе прокатки с контролируемым режимом деформации структурные изменения в деформируемом металле протекают в три стадии. На первой стадии ($>950^{\circ}\text{C}$) в процессе деформации происходит рекристаллизация; на второй стадии ($<950^{\circ}\text{C}$) сталь упрочняется вследствие измельчения структуры и повышения плотности дислокаций; на третьей стадии ($800\text{—}700^{\circ}\text{C}$) происходит выделение дисперсных избыточных фаз, обусловленное легированием стали карбидо- и нитридообразующими элементами (Mo, Nb, V, Ti).

Упрочнение поверхности стальных деталей. Закалка поверхности.

Поверхностная закалка стали преследует следующие основные цели: повышение твердости поверхности изделий из стали, увеличение износостойкости и повышение предела выносливости деталей. Сердцевина детали остается вязкой и хорошо выдерживает ударные нагрузки.

Методы поверхностной закалки стали:

- закалка с индукционным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ);
- поверхностная закалка стали с электроконтактным нагревом;
- поверхностная газопламенная закалка;
- поверхностная закалка стали в электролите.

Общей чертой для всех способов поверхностной закалки стали является то, что поверхностный слой детали нагревают до температуры выше критической точки A_{c3} , а затем быстро охлаждают и получают структуру мартенсита. Наибольшее распространение получила поверхностная закалка стали с индукционным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ). После поверхностной закалки проводят низкий отпуск.

Упрочнение поверхности стальных деталей. Химико-термическая обработка

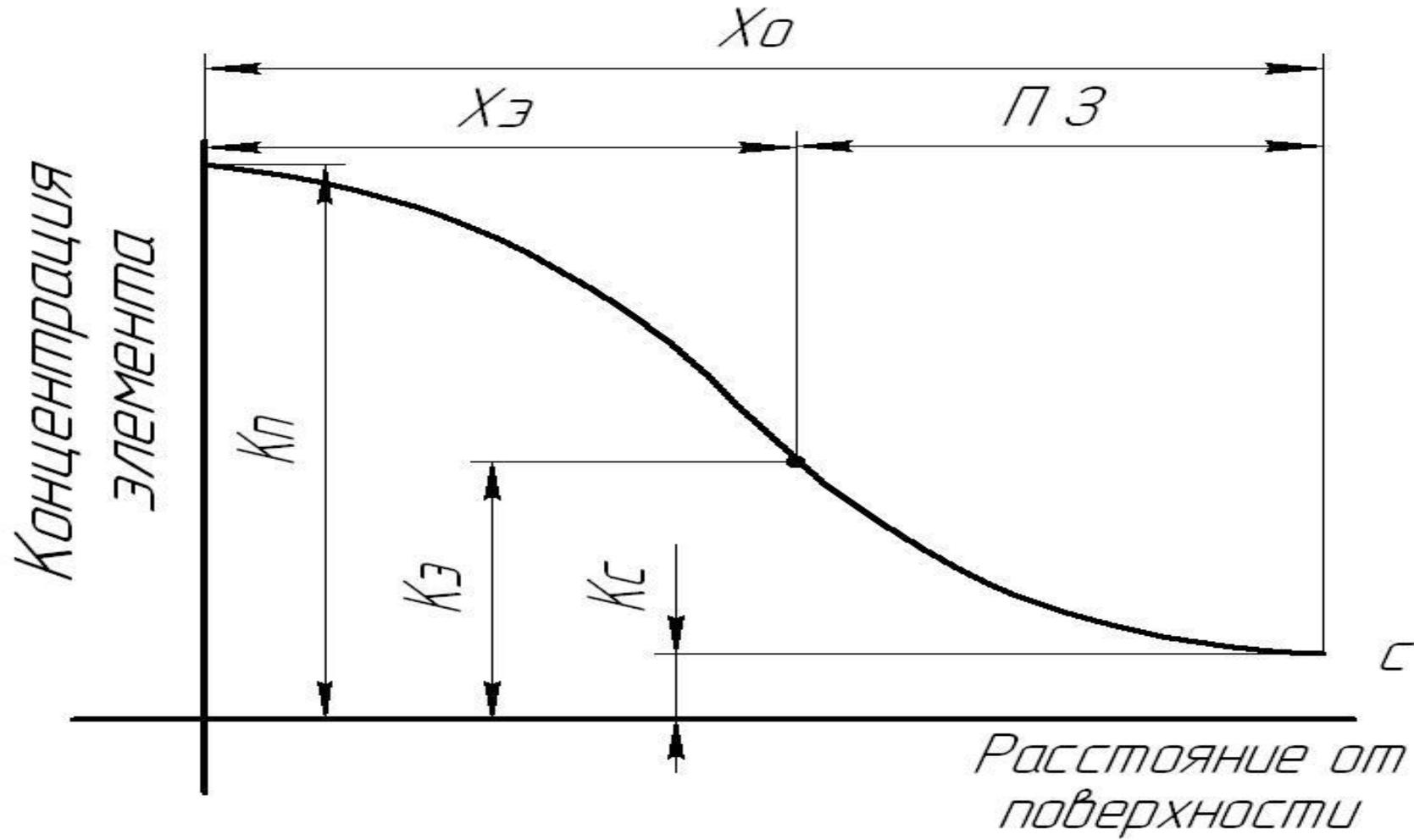
- **Химико-термическая обработка (ХТО) стали** — совокупность операций термической обработки с насыщением поверхности изделия различными элементами (углерод, азот, алюминий, кремний, хром и др.) при высоких температурах.
- Поверхностное насыщение стали металлами (хром, алюминий, кремний и др.), образующими с железом твердые растворы замещения, более энергоемко и длительнее, чем насыщение азотом и углеродом, образующими с железом твердые растворы внедрения.
- Химико-термическая обработка повышает твердость и износостойкость. Химико-термическая обработка, создавая на поверхности изделий благоприятные остаточные напряжения сжатия, увеличивает надежность и

Физико-химические процессы, происходящие при ХТО

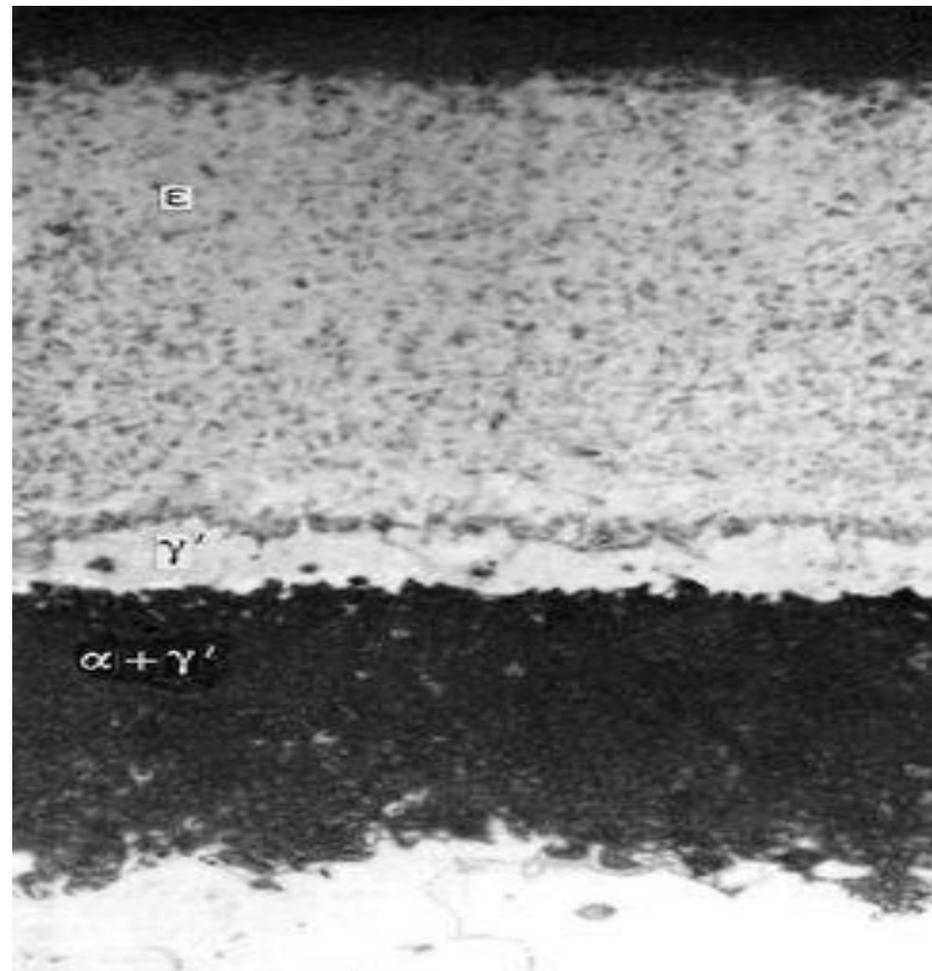
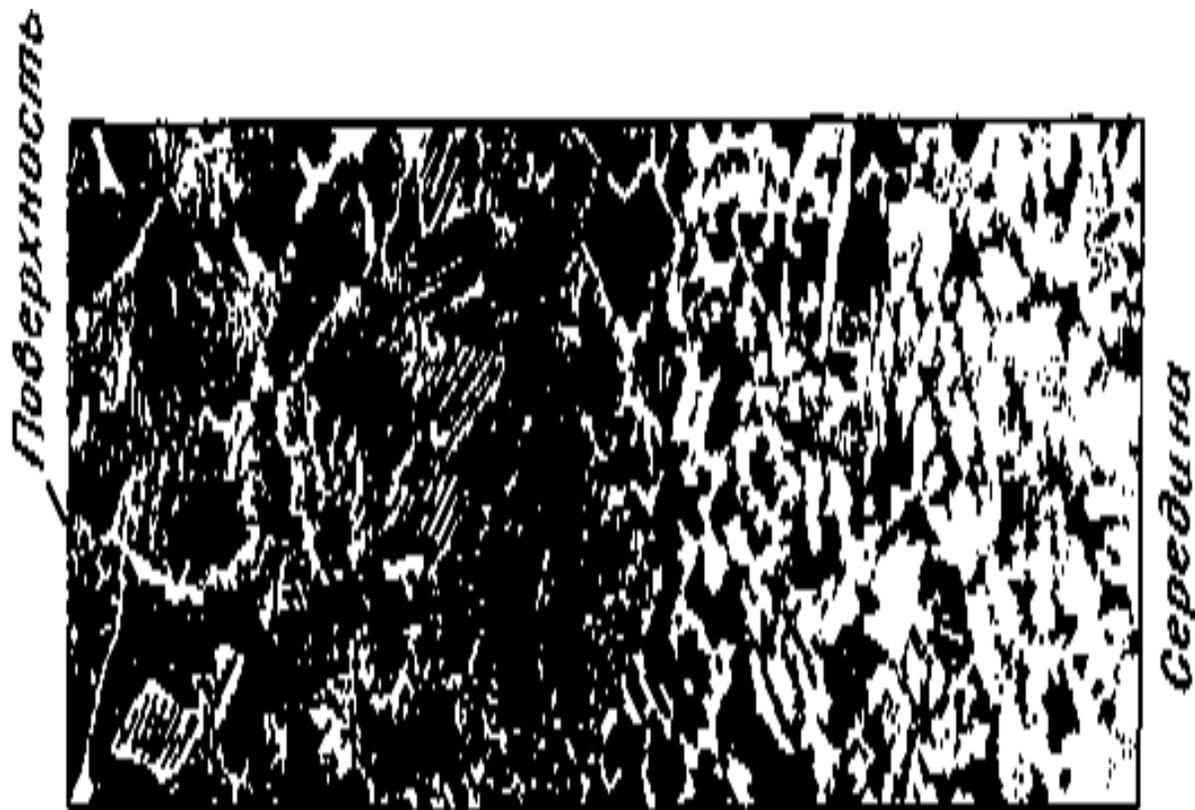
- Химико-термическая обработка осуществляется помещением стали в среду, в которой происходит насыщение ее поверхностного слоя и складывается из трех этапов: диссоциации, адсорбции и диффузии.
- **Диссоциация** происходит в газовой среде и состоит из разложения молекул тех или иных соединений и образования активных атомов
- **Адсорбция** - это поглощение поверхностью стали свободных, главным образом активных, атомов из газовой смеси или раствора.
- **Диффузия** заключается в проникновении адсорбированных атомов с поверхности металла в глубь его. Она происходит в результате теплового движения атомов, без воздействия внешних сил. Диффузия характеризуется коэффициентом диффузии D .
- Коэффициент диффузии D в основном зависит от температуры и

Схема диффузионного слоя

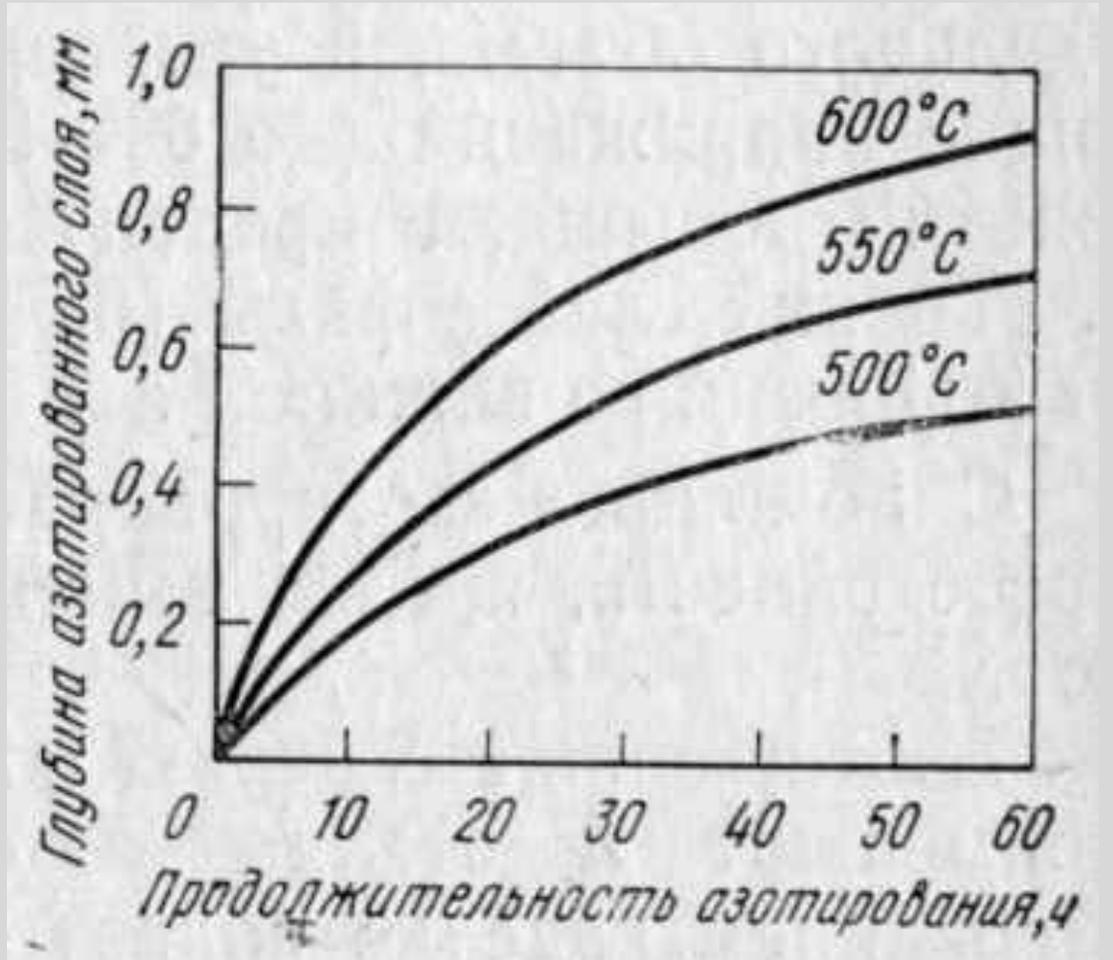
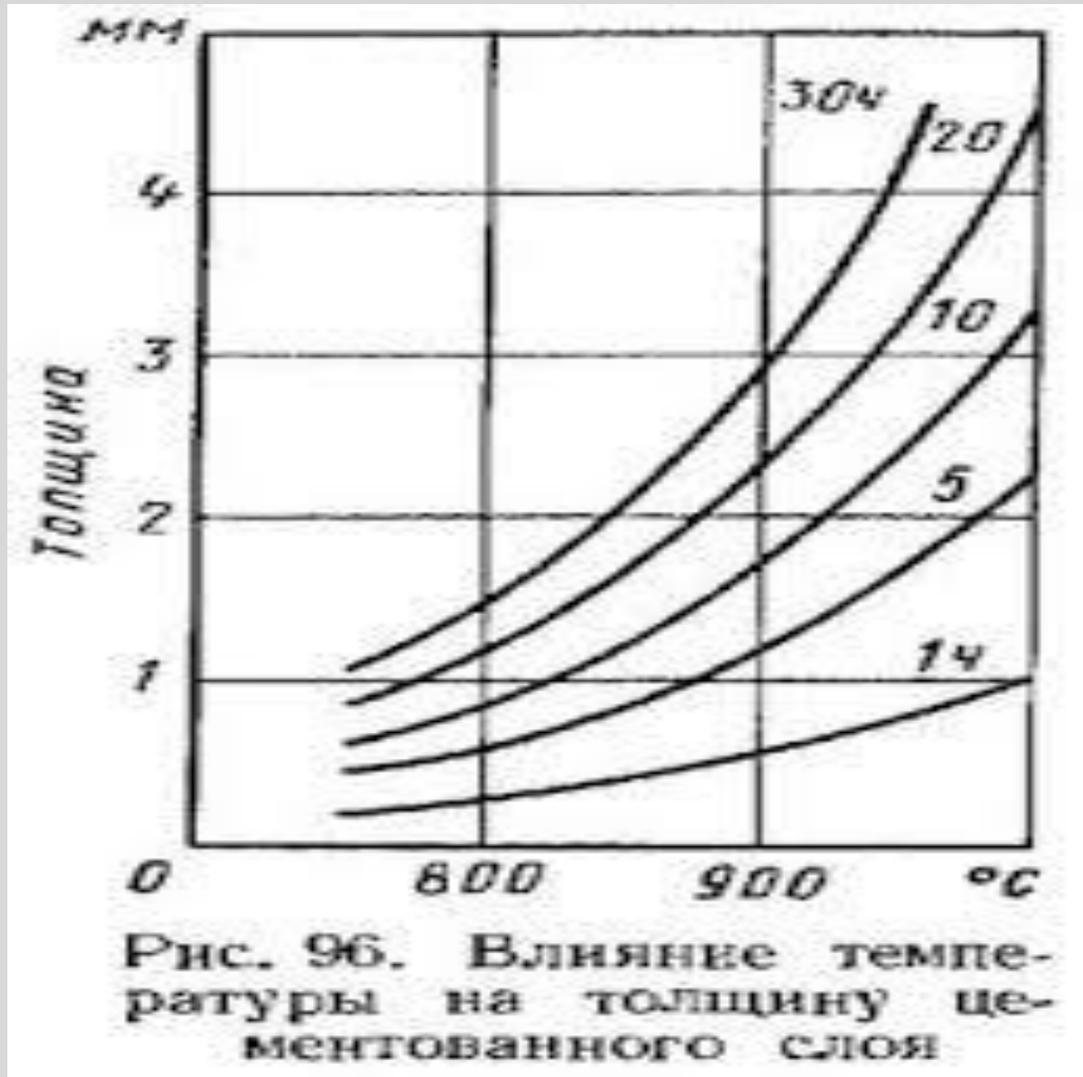
$X_{\text{э}}$ - Эффективная толщина, X_0 - Общая толщина, ПЗ – переходная зона, $K_{\text{п}}$ - концентрация у поверхности, $K_{\text{э}}$ - концентрация элемента, установленная для эффект. толщины.



Микроструктура науглероженного и азотированного слоя (α - тв. раствор N в Fe, ϵ – тв. раствор на основе Fe_2N , γ' – тв. раствор на основе Fe_4N .)



Влияние температуры и времени на толщину диффузионного слоя



Диффузионная металлизация

Диффузионной металлизацией называют процесс поверхностного насыщения стали металлами. Насыщение алюминием называется алитированием, хромом - хромированием, кремнием - силицированием, титаном - титанированием и т. д. В результате насыщения поверхности указанными металлами повышается определенный комплекс свойств (износостойкость и твердость, коррозионная стойкость, жаростойкость и др.). Как и при насыщении углеродом и азотом, существуют различные способы осуществления диффузионной металлизации: насыщение из расплава солей (AlCl_3 , CrCl_2 , SiCl_4), погружение в расплавленный металл, газовая диффузионная металлизация.

Виды диффузионной металлизации

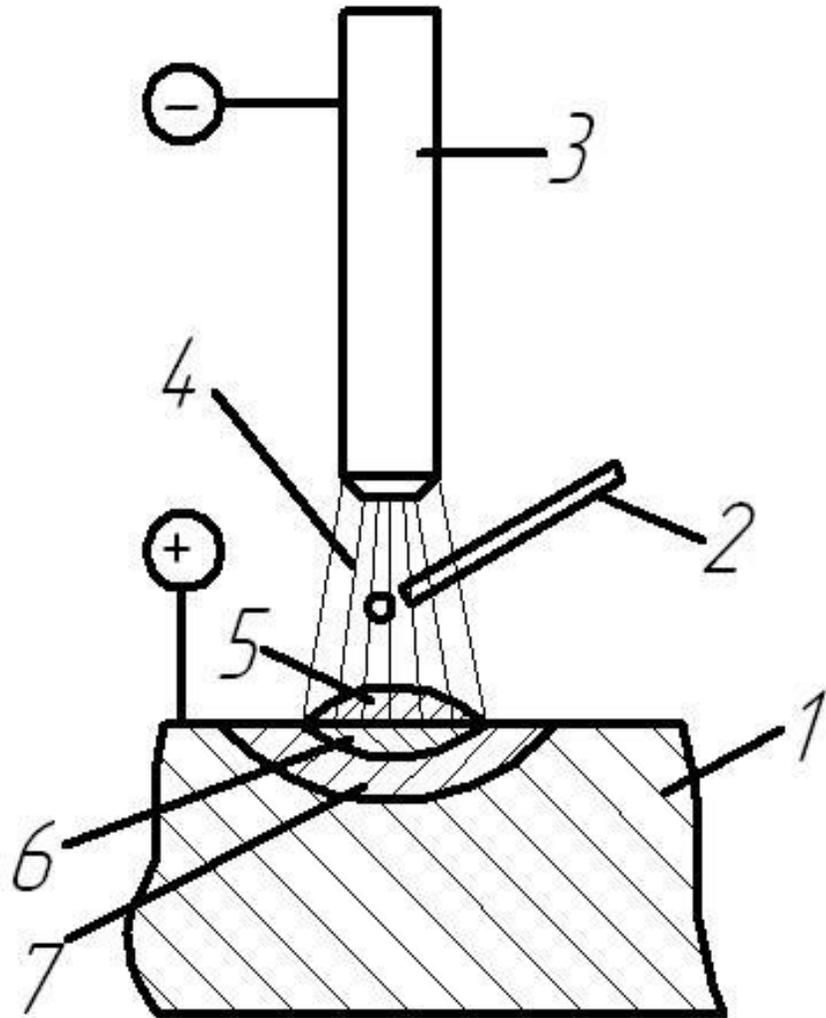
- **Силицирование** – диффузионного насыщения поверхности кремнием, с целью повышения коррозионной стойкости, жаростойкости, твердости сталей и сплавов. Кремний при растворении в железе обладает наибольшим твердорастворным упрочняющим эффектом.
- **Хромирование** – насыщение поверхности стальных изделий хромом. Хромирование производят в вакуумных камерах при температуре 1420°C . За 18-24 часа выдержки получают хромированный слой толщиной 2,0-2,5 мм с концентрацией Cr в поверхности до 70%. Твердость слоя составляет 1200-1300 HV. Хромирование используют для упрочнения деталей, работающих на износ в агрессивных средах.
- **Алитирование** – процесс диффузионного насыщения поверхности изделий алюминием с целью повышения жаростойкости и коррозионной стойкости. При алитировании на поверхности образуется слой FeAl толщиной 0,2-0,5 мм. В результате алитирования сталь приобретает высокое сопротивление окислению при высоких температурах.
- **Борирование** – насыщение поверхности металлов бором с целью повышения твердости и износостойкости. При борировании стали упрочнения достигается за счет образования боридов FeB и Fe_2B толщиной 100 – 200 мкм и твердостью NV 1800 – 2000.

Борированный слой



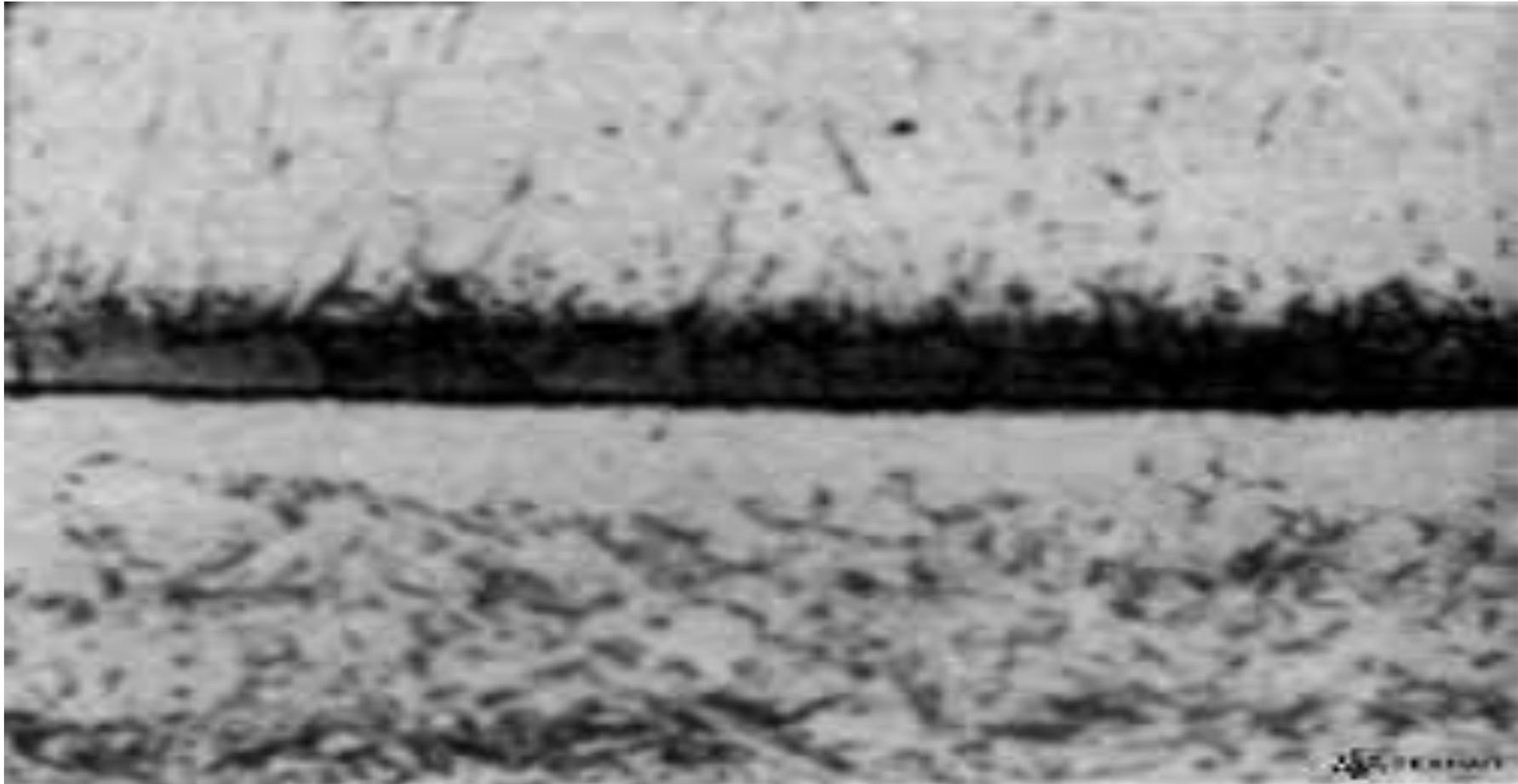
Рис. 158. Микроструктура борированного слоя железа. $\times 100$

Наплавка



Наплавка – это нанесение слоя расплавленного металла на оплавленную металлическую поверхность путем плавления присадочного материала теплотой кислородно-ацетиленового пламени или электрической дуги. Наплавку осуществляют для восстановления изношенных деталей и создания на поверхности детали слоя, обладающего повышенной прочностью, антикоррозионной стойкостью, жаропрочностью и другими свойствами.

Структура наплавленного слоя аустенитной стали на низколегированную сталь. (темный - науглероженный слой, под ним светлый обезуглероженный слой)



Напыление покрытий

Напыление состоит в образовании покрытия на поверхности детали путем динамического осаждения на основном материале расплавленных капель или оплавленных частиц напыляемого материала, образующегося при нагреве порошка, расплавлении проволоки или прутка различными источниками нагрева. Широкое разнообразие способов напыления обеспечивает получение покрытий, отличающихся по своим свойствам.

Технологии нанесения покрытий в зависимости от применяемого источника тепловой энергии можно разделить на три основных вида: газопламенное напыление, при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании смеси газа с кислородом; электрическое нанесение покрытий, основанное на использовании теплоты, выделяющейся при горении электрической дуги и детонационное, при котором используется энергия взрыва.

Схема плазменного напыления

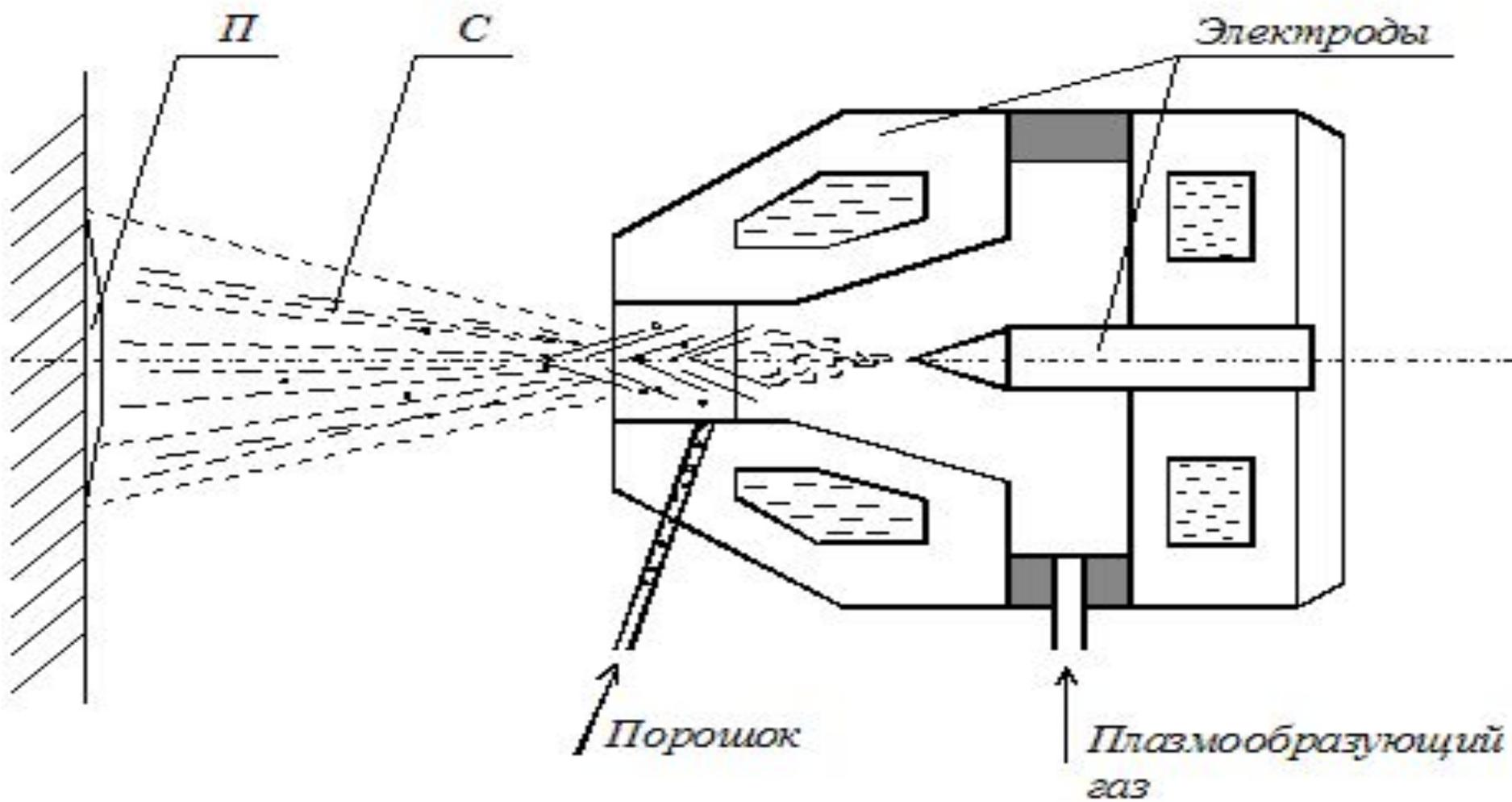
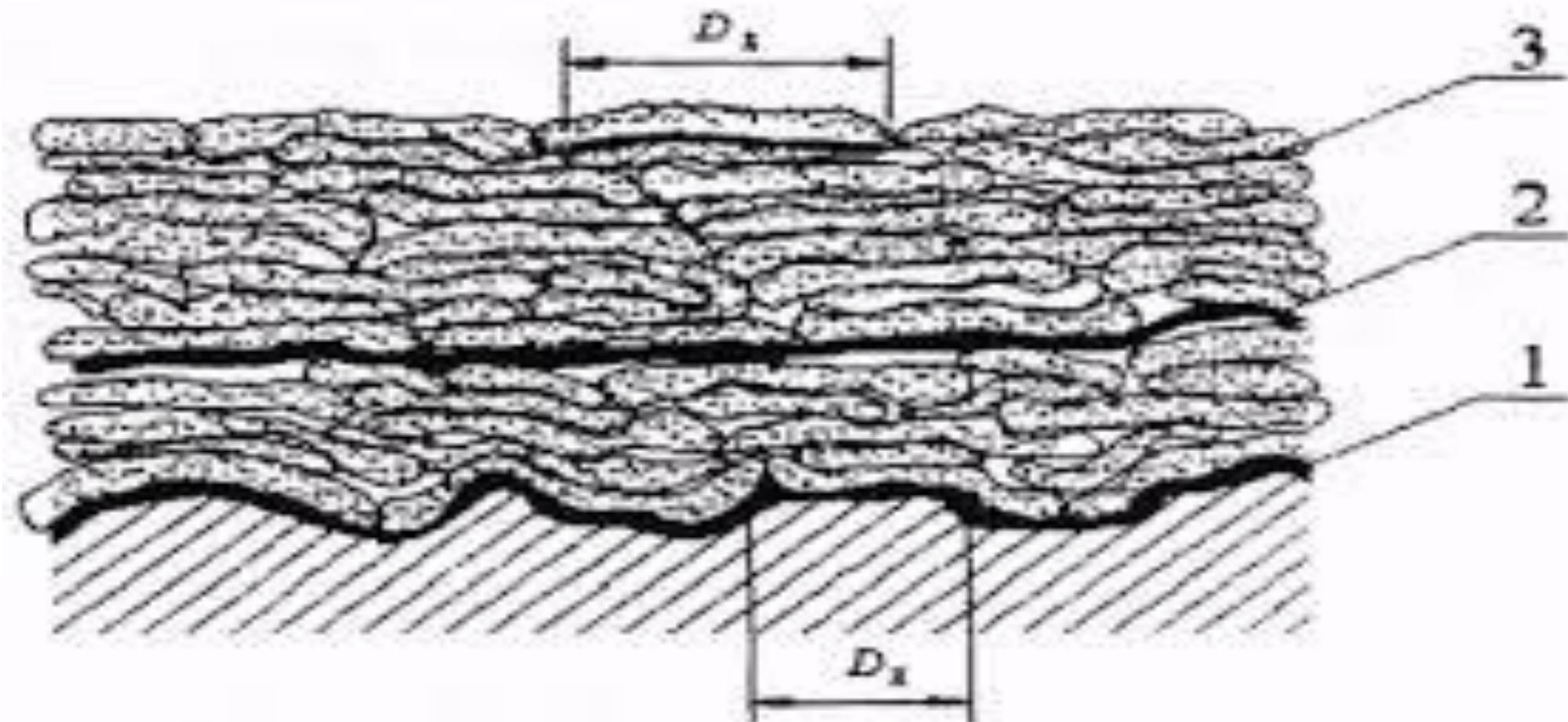


Схема структуры напыленного слоя

- 1 – граница между покрытием и основой,
2 – граница между слоями,
3 – граница между частицами



Напыленный слой алюминия на стали

