ЛЕКЦИЯ №6

- Классификация видов термической обработки
- Отжиг, ПТО(ПФО)
- СН(структурная наследственность)

Таблица 1

Классификация операций термической обработки стали

Название операции	Содержание операции	Назначение операции
Полный отжиг	Нагревание доэвтектоидной стали до температуры выше критической точки Ac_3 (линия GS), выдержка и последующее медленное охлаждение	Создание мелкозернистой структуры, понижение твердости и повышение пластичности, снятие внутренних напряжений
Неполный отжиг	Нагревание стали до температуры выше критической точки Ac_1 (линия PSK), выдержка и последующее медленное охлаждение	Для улучшения обрабатываемости резанием проката и поковок. Применяется вместо полного отжига для заэвтектоидной стали
Отжиг на зернистый цементит	Нагревание стали до температуры несколько выше критической точки Ac_1, длительная выдержка, медленное охлаждение до 650° С и последующее охлаждение на воздухе	Понижение твердости и улучшение обрабатываемости инструментальных и подшипниковых сталей
Изотермический отжиг	Нагревание стали до температуры выше критической точки Ac_3 (или Ac_1), выдержка, ускоренное охлаждение до температуры немного ниже точки A_1, выдержка при этой температуре для завершения перлитного превращения и охлаждение на воздухе	Для улучшения обрабатываемости резанием легированной стали, сокращения длительности отжига и устранения внутренних напряжений
Низкотемпературный отжиг	Нагревание стали ниже критической температуры, выдержка и последующее охлаждение	Снятие внутренних напряжений, снижение твердости
Диффузионный отжиг	Нагревание стали значительно выше критической температуры Ac_3 (1050—1150° С), длительная выдержка и охлаждение в печи до заданной температуры	Устранение химической неоднородности (ликвации) у легированной стали
Рекристаллизационный отжиг	Нагревание подвергшейся холодной пластической деформации стали выше температуры рекристаллизации (ниже критической температуры), выдержка и последующее охлаждение	Снижение твердости и увеличение пластичности холодно-обработанной (тянутой, катаной или штампованной) стали

Продолжение табл. 1

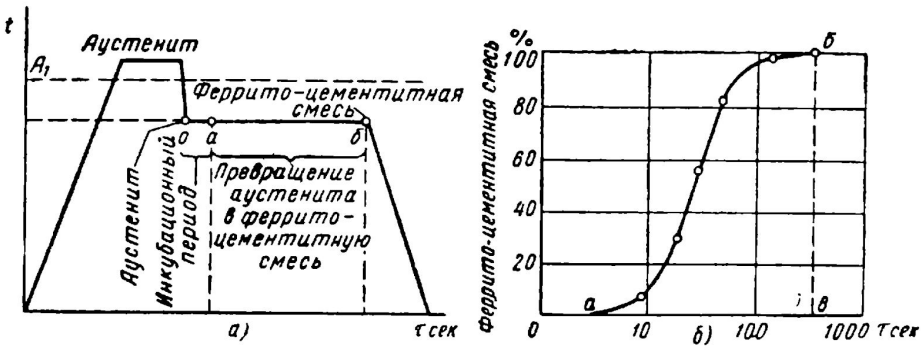
Название операции	Содержание операции	Назначение операции
Нормализация	Нагревание стали до температуры выше критической точки Ac_3 (A_{cm}), выдержка и последующее охлаждение на воздухе	Измельчение зерна, разрушение карбидной сетки и подготовка к дальнейшим операциям термической обработки
Закалка при непрерывном охлаждении (обычная закалка)	Нагревание до температуры выше критической точки Ac_3 (доэвтектоидные стали) или Ac_1 (заэвтектоидные стали), выдержка и охлаждение со скоростью не менее критической	Повышение твердости и прочности
Закалка местная	Закалка части изделия, где необходима высокая твердость и износостойкость	Создание высокой твердости, где это требуется, и сохранение вязкости в остальной части изделия
Закалка с подстуживанием	Подстуживание изделий перед погружением в закалочную среду с целью уменьшения разницы между температурой изделия и охлаждающей средой	Повышение твердости и прочности и снижения внутренних термических напряжений (по сравнению с получаемыми при обычной закалке)
Закалка в двух средах	Охлаждение изделий в воде с последующей переброской в масло или выдачей на воздух, чтобы мартенситное превращение протекало в условиях медленного охлаждения	Повышение твердости и прочности и снижение структурных напряжений
Закалка ступенчатая	Быстрое охлаждение в зоне температур перлитного и промежуточного превращений в расплавленной соли, кратковременная выдержка при температуре несколько выше (ниже) мартенситной точки *Мн* в течение времени, не вызывающего распада аустенита, и последующее охлаждение на воздухе	Повышение твердости и прочности, снижение внутренних напряжений и предупреждение образования закалочных трещин и напряжений
Закалка изотермическая	Быстрое охлаждение через зону перлитного превращения в расплавленной соли, выдержка в этой среде в зоне температур промежуточного превращения для возможно полного распада аустенита и охлаждение на воздухе	Повышение твердости и прочности и уменьшение термических и структурных напряжений, предупреждение образования трещин, деформаций

Продолжение табл. 1

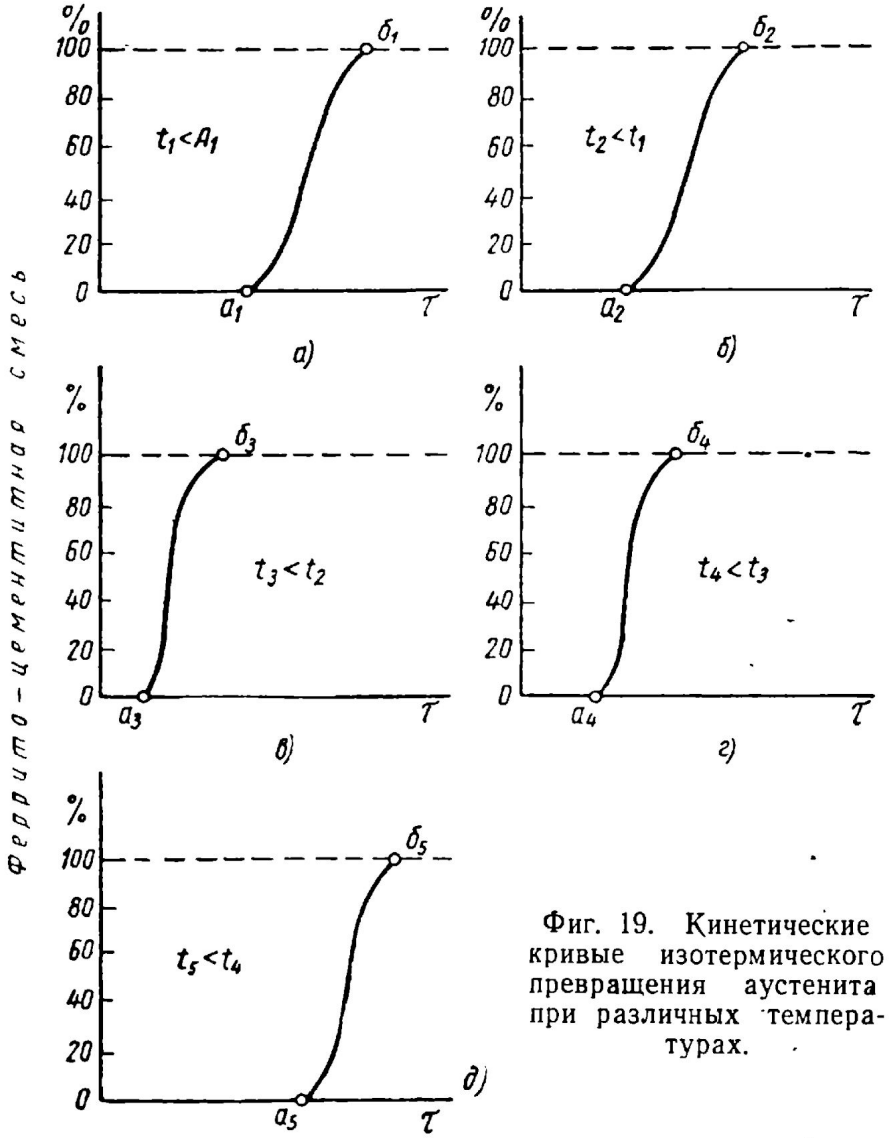
Название операции	Содержание операции	Назначение операции
Закалка с самоотпуском	Кратковременное погружение изделий в закалочную среду с последующим медленным охлаждением на воздухе, во время которого закалившаяся зона отпускается за счет тепла сердцевины или той части, которая не погружалась в закалочную среду	Повышение твердости и прочности и уменьшение внутренних напряжений и замена последующего низкого отпуска
Закалка светлая	Нагревание в защитной атмосфере и охлаждение в расплавленной щелочи	Повышение твердости и прочности и предупреждение обезуглероживания, окисления, сохранение чистоты поверхности
Закалка поверхностная	Нагревание электротоком или газовым пламенем только поверхности изделия; сердцевина изделия после охлаждения остается незакаленной	Создание твердой, износоустойчивой поверхности при сохранении прочной и вязкой сердцевины
Отпуск	Нагревание закаленной стали ниже нижней критической точки Ac_1 (линии PSK), выдержка и охлаждение	Снижение внутренних напряжений, увеличение пластичности и уменьшение твердости, получение заданной структуры
Низкотемпературный отпуск	Нагревание закаленной стали до 150—220° С, выдержка и охлаждение. Отпуск при 100—120° С называется старением	Снижение внутренних напряжений при сохранении высокой твердости и износоустойчивости
Высокотемпературный отпуск	Нагревание закаленной стали до 550—650° С, выдержка и охлаждение. Закалку и высокотемпературный отпуск называют улучшением	Получение высокой пластичности при достаточной прочности
Обработка холодом	Охлаждение закаленной стали до температуры ниже (или несколько выше) точки $Мк$, выдержка и медленное повышение температуры до комнатной	Устранение остаточного аустенита для стабилизации размеров, повышения твердости и износоустойчивости

Изотермическое превращение аустенита

Построение изотермических диаграмм

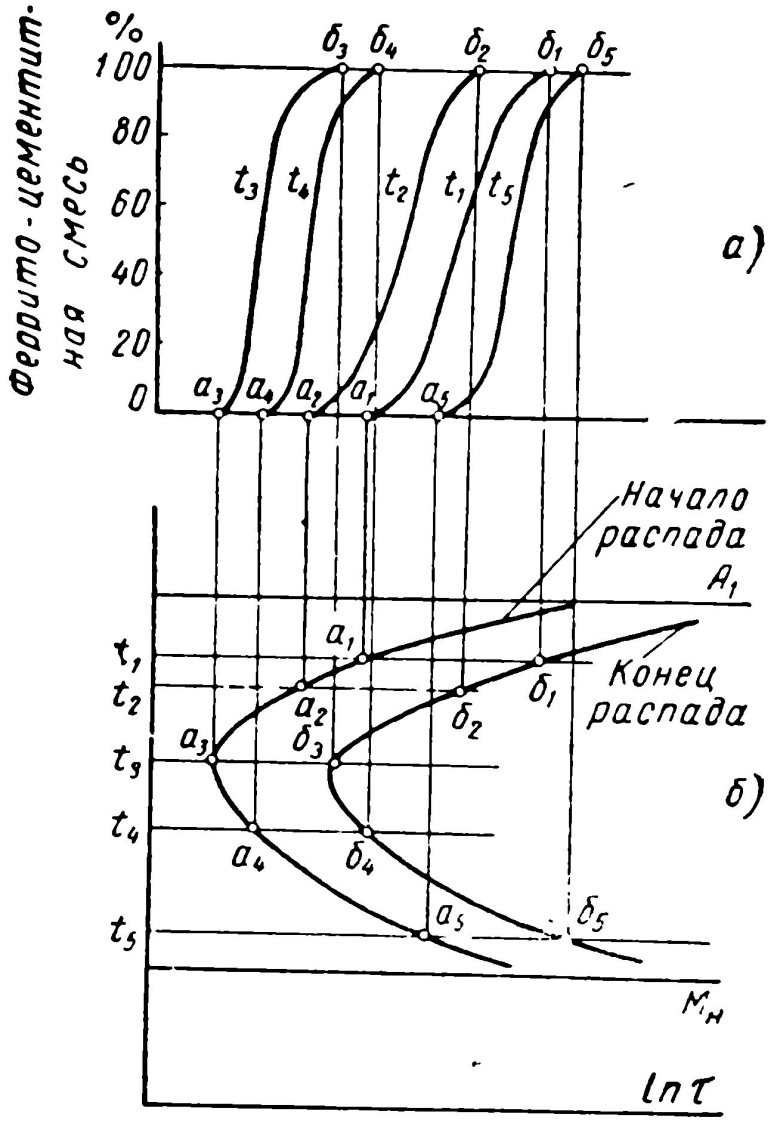


Фиг. 18. График (*а*) и кинетическая кривая (*б*) изотермического превращения аустенита.



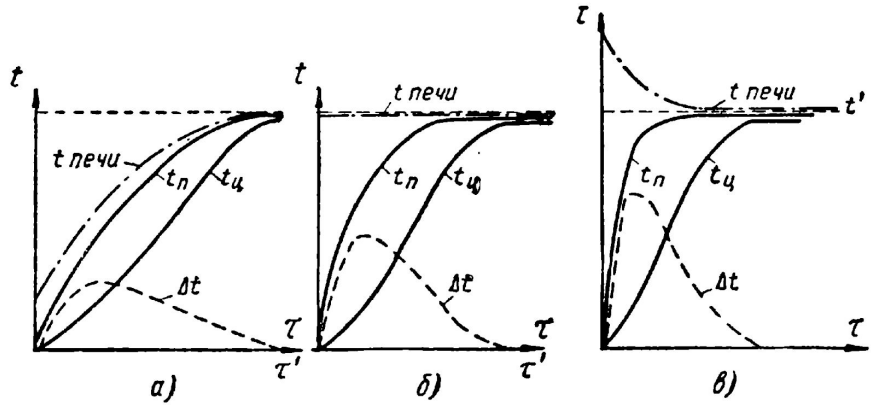
Фиг. 19. Кинетические кривые изотермического превращения аустенита при различных температурах.

Изотермическое превращение аустенита



Фиг. 20. Диаграмма изотермического превращения аустенита.

Технология нагревания стали



Фиг. 50. Три принципиально различных режима нагревания детали в печи: t' — заданная температура нагревания; $t_п$ — температура поверхности; $t_ц$ — температура центра; Δt — разность температур между поверхностью и центром; $t_{печи}$ — температура печи; τ' — время прогрева для случаев *а*, *б* и *в* (А. А. Шмыков).

Расположение заготовок	Продолжительность нагрева	Расположение заготовок	Продолжительность нагрева
	1		1
	1,4		1
	4		2
0,5d	2,2	0,5d	1,4
d	2	2d	1,3
2d	1,8		1,7

Фиг. 51. Сравнительная таблица продолжительности нагревания круглых и квадратных заготовок в зависимости от их расположения в печи (В. Ф. Копытов).

Примерные нормы выдержки образцов диаметром (толщиной) более 3 *мм* при нагревании для закалки до 750—900° С

Нагревательный агрегат	Выдержка в *сек* на 1 *мм* диаметра или наименьшей толщины	
	для углеродистых и низколегированных сталей	для легированных сталей
Электрическая печь	50—80	70—90
Соляная ванна	20—25	25—30
Свинцовая ванна	6—8	8—10

На многих заводах приняты следующие нормы выдержки на 1 *мм* диаметра: при нагревании в пламенных печах 1 *мин*, в электропечах 1,5—2 *мин*, в соляных ваннах 0,5 *мин*, в свинцовых ваннах 0,1—0,15 *мин*.

Основные задачи решаемые ПТО

1.[Н]↓

2.Напряжения↓

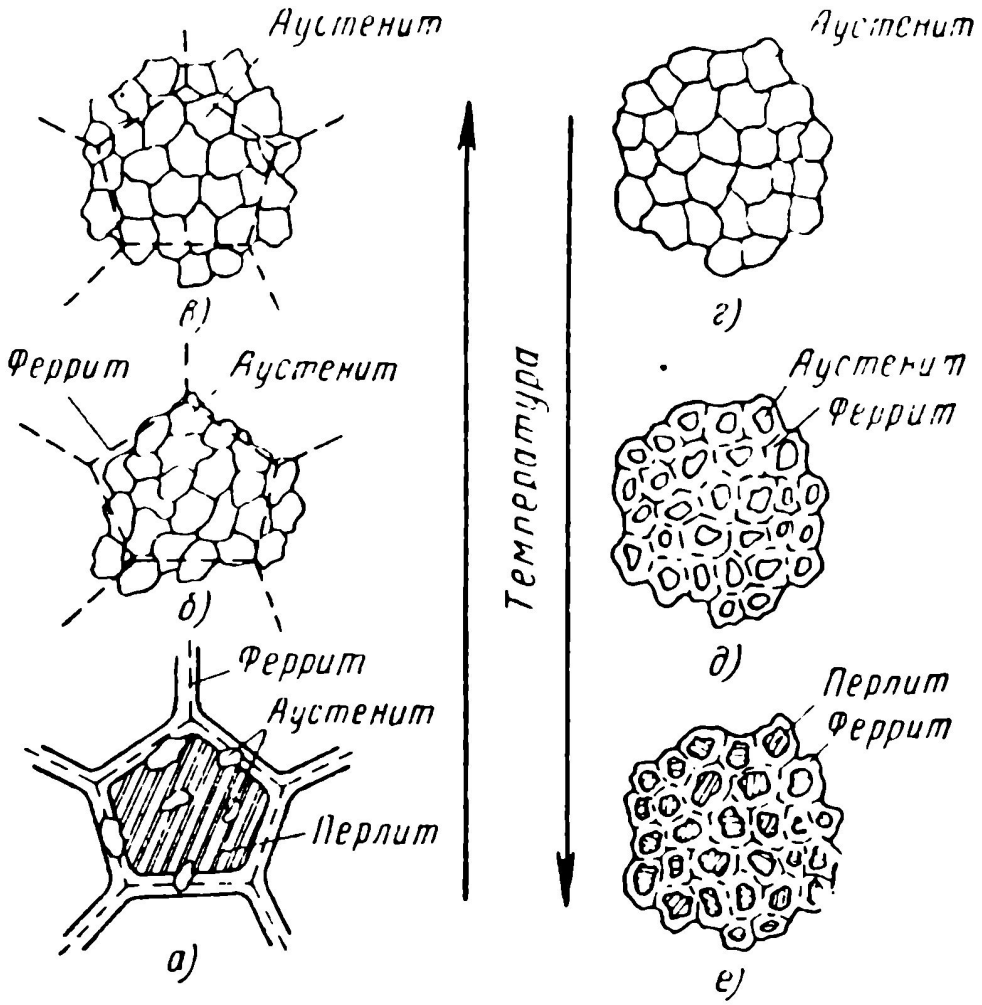
3.σ,НВ↓

4.Подготовка структуры к окончательной Т/О

- снижение склонности к СН

- получение Ф+П структуры

ОТЖИГ И НОРМАЛИЗАЦИЯ СТАЛИ
Полный отжиг



Фиг. 57. Схема изменения структуры доэвтектодиной стали при нагревании и охлаждении.

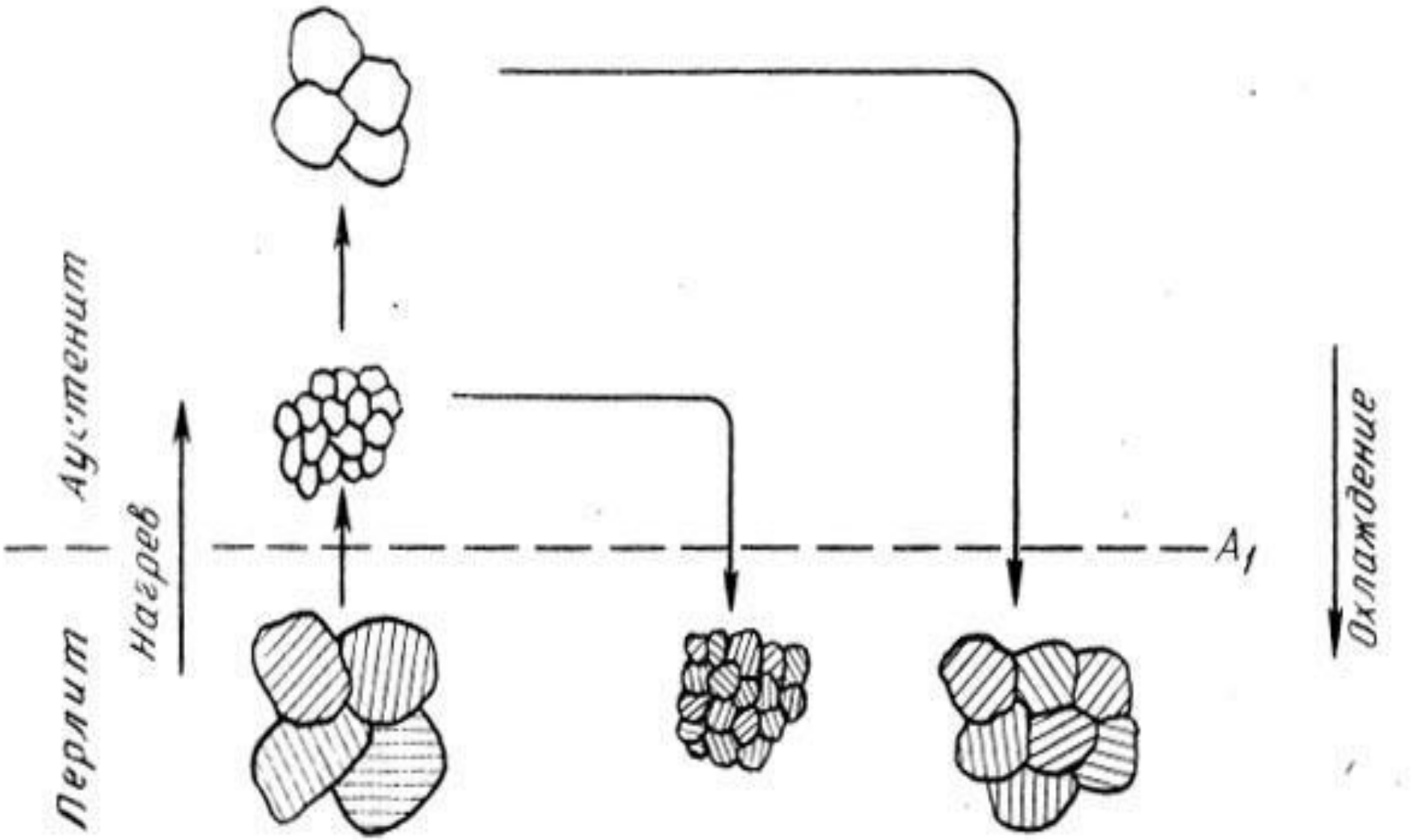
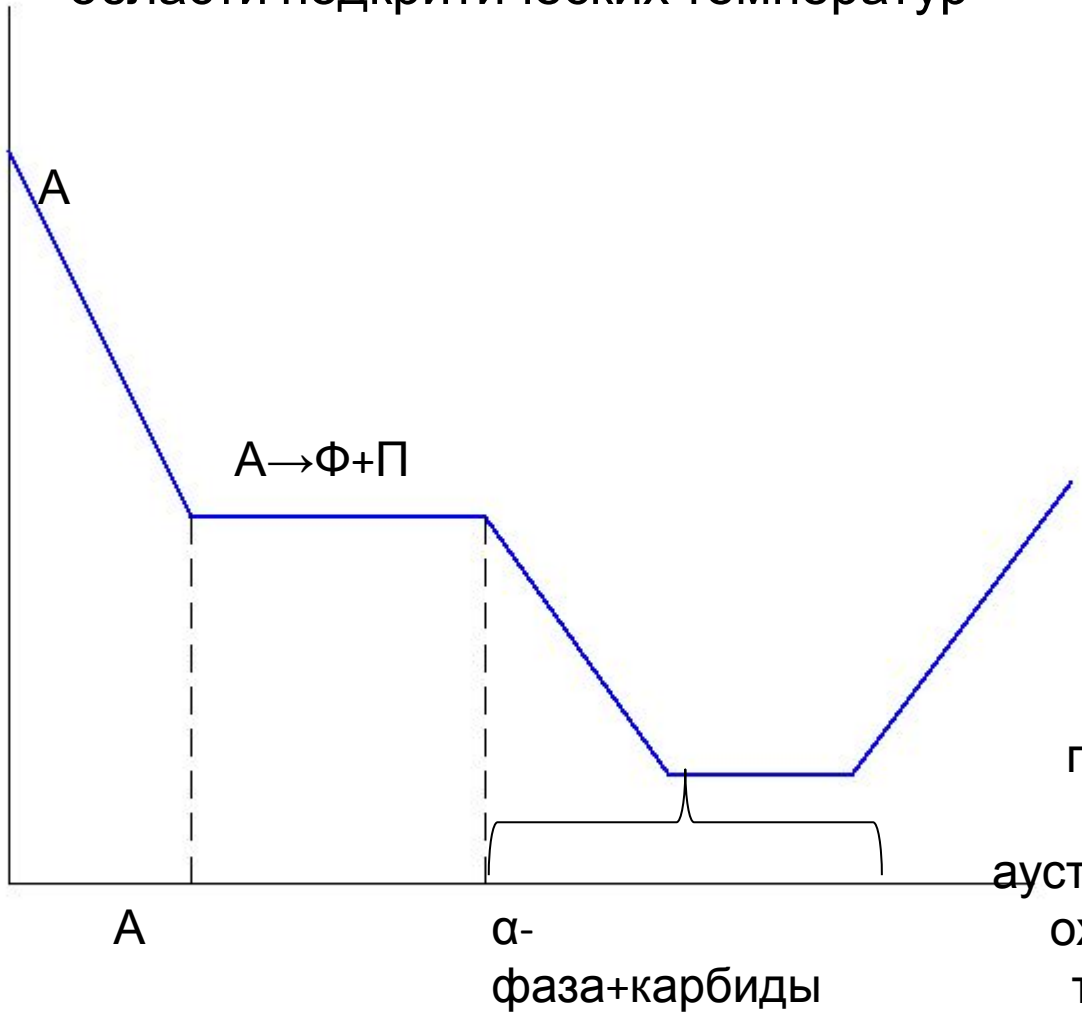


Схема изменения размера зерна перлита в зависимости от нагрева в аустенитной области (эвтектоидная сталь)

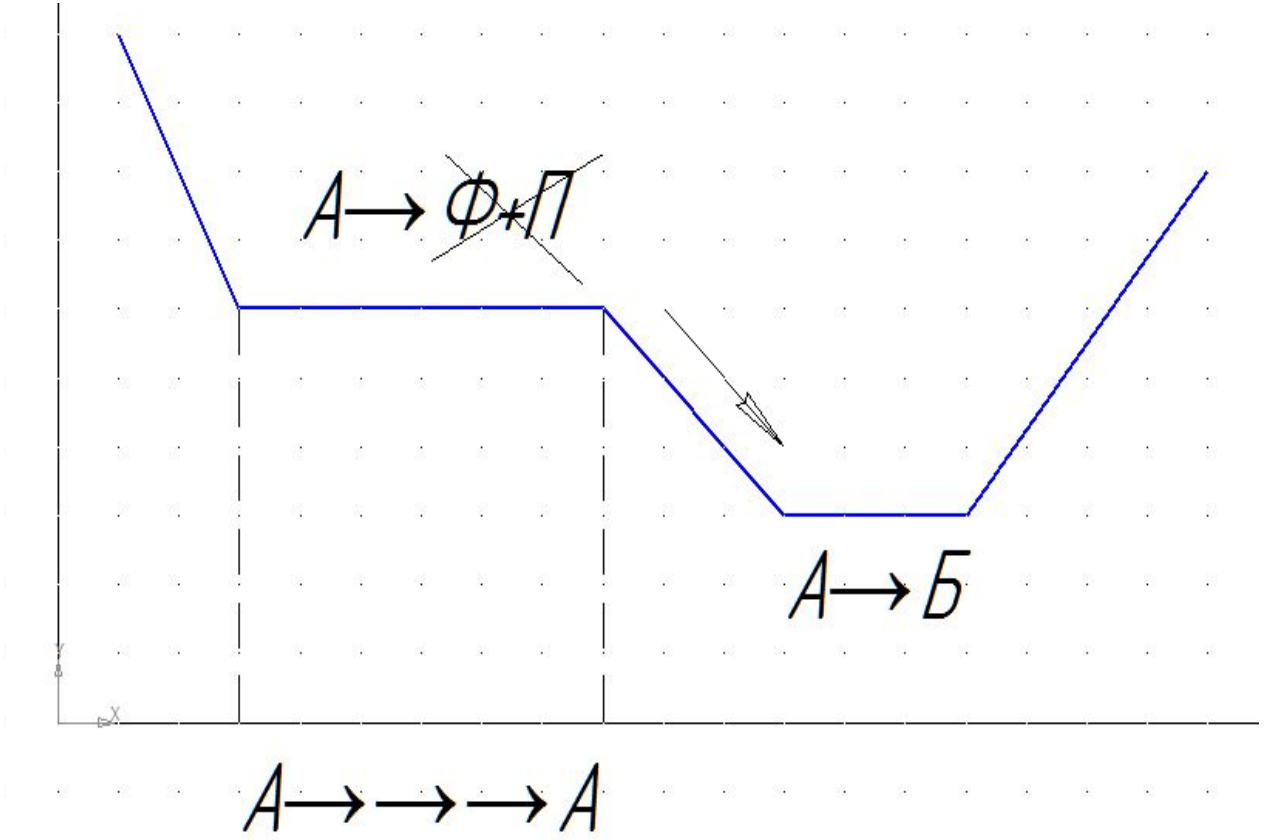
Виды фазовых и структурных превращений реализуемых при ПТО

А→Ф+П превращение при низкой и средней легированности аустенита (Тн ~1200°С) и возможность прохождения диффузионного превращения в области подкритических температур

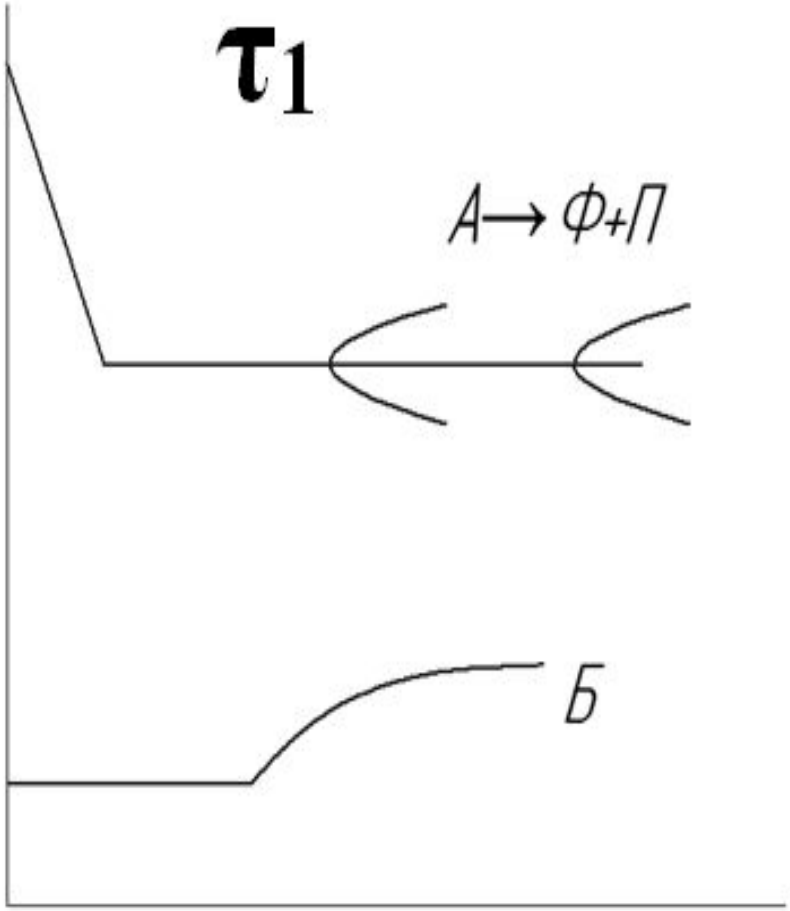


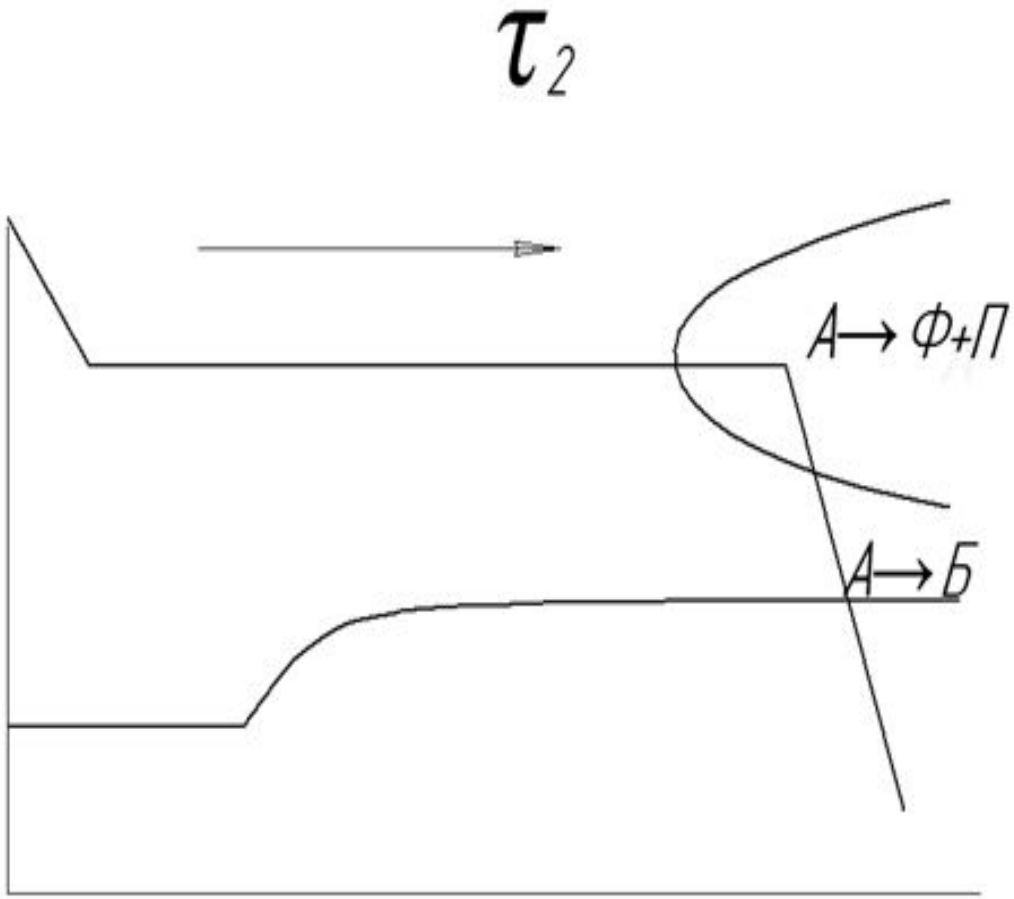
* Возможно частичное превращение остаточного аустенита на стадии охлаждения до температуры переохлаждения

А→Ф-П превращение при высоком уровне легированности аустенита ($T_н$ ~1200°С)

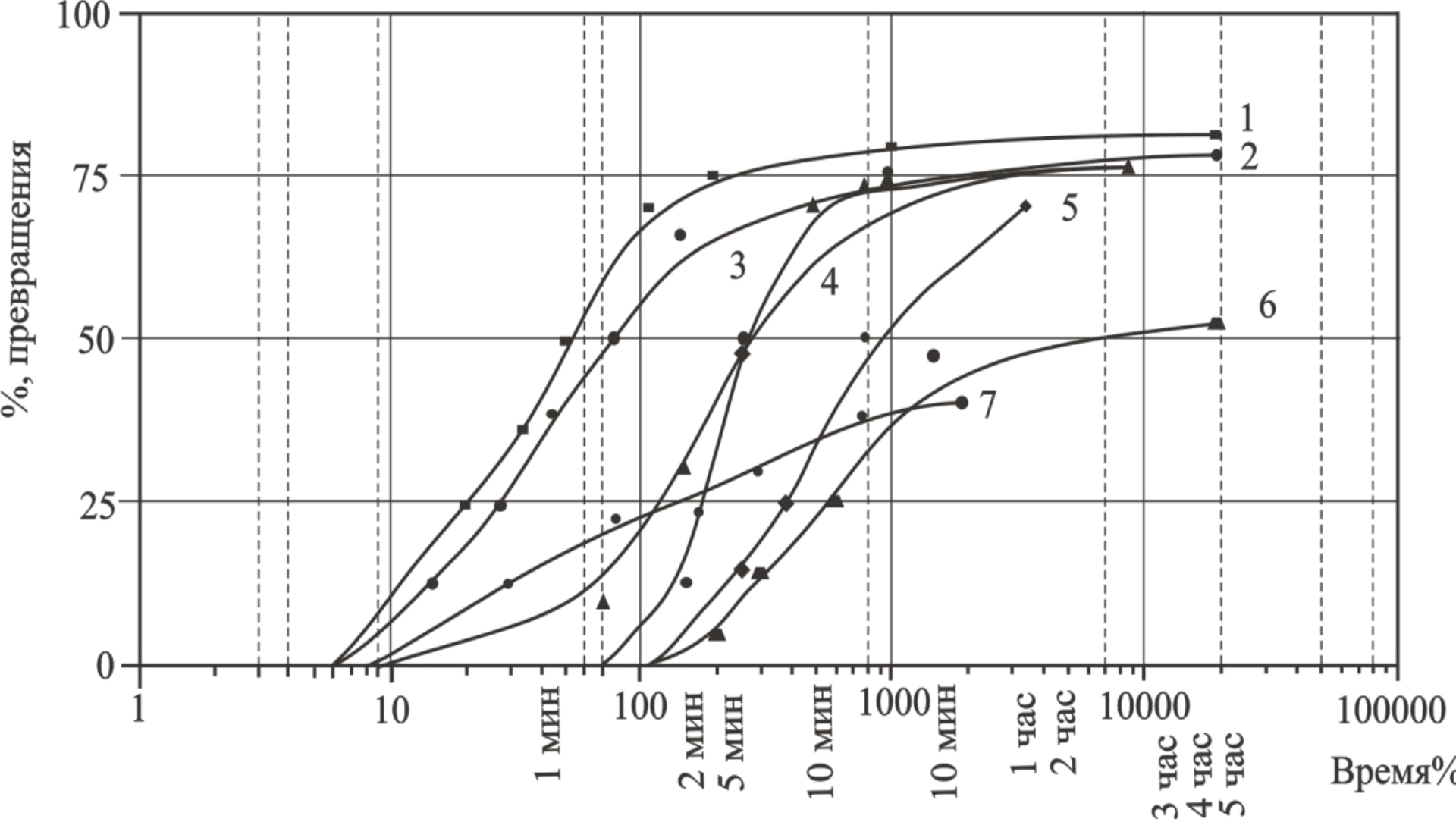


Кинетика распада аустенита при переохлаждении на стадии окончания копежа. (стали 1,2 групп)





$\tau_2 >> \tau_1$



Обобщенная диаграмма изотермического распада аустенита при температуре 350 ºС опытных составов стали хромоникелевой композиции при легировании молибденом, вольфрамом и ванадием.

1 **– 22Х2Н4 (Ni=3,58%) (Будет диффузионное превращение А→Ф+П)**

2 **– 22Х2Н4W (Ni=3,58%, W=0,45%)**

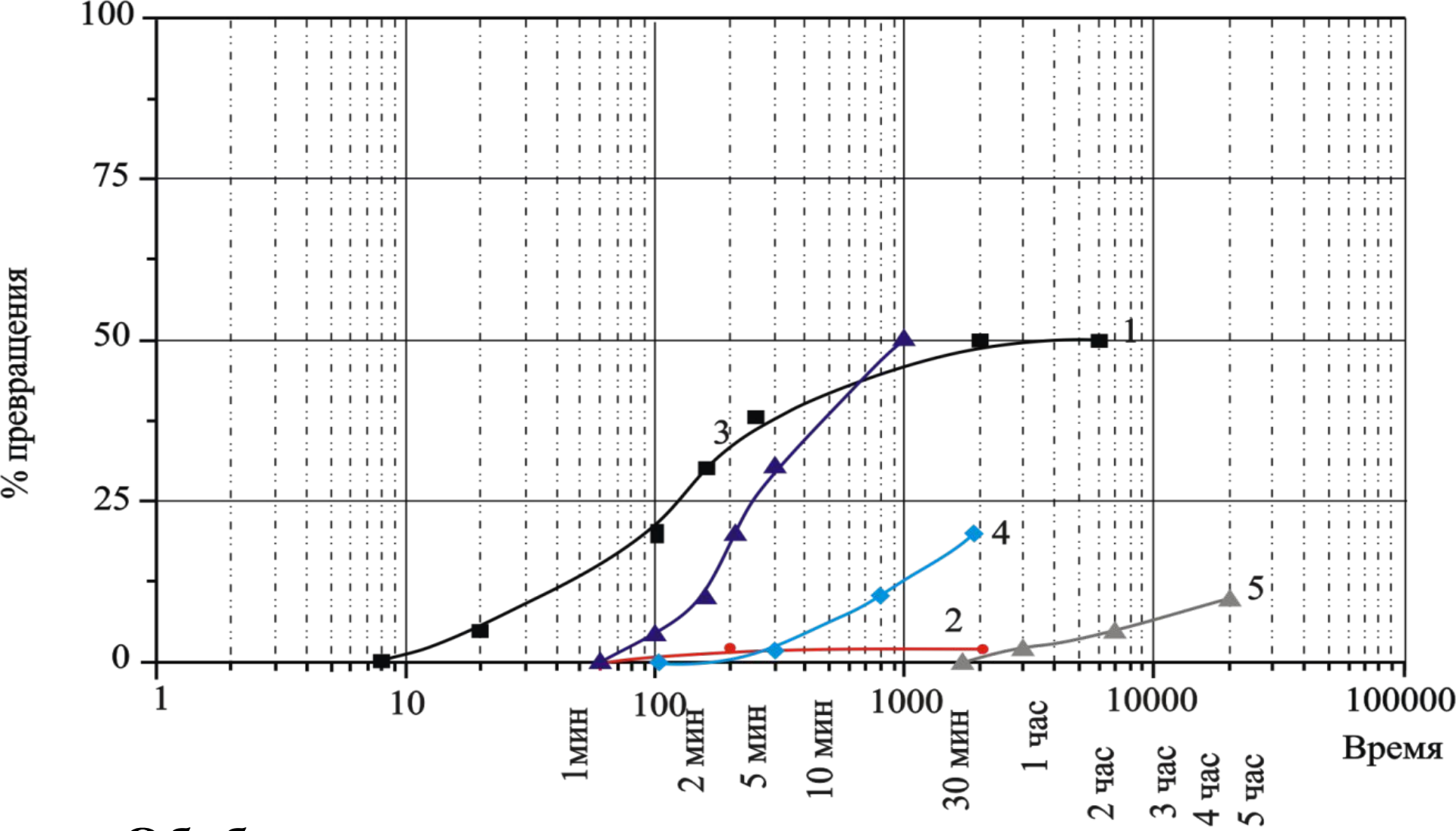
3 **– 22Х2Н4МВ (Ni=3,58%, W=0,45%, Mo=0,43%)**

4 **– 24Х2Н4М (Ni=3,58%, Mo=0,34%)**

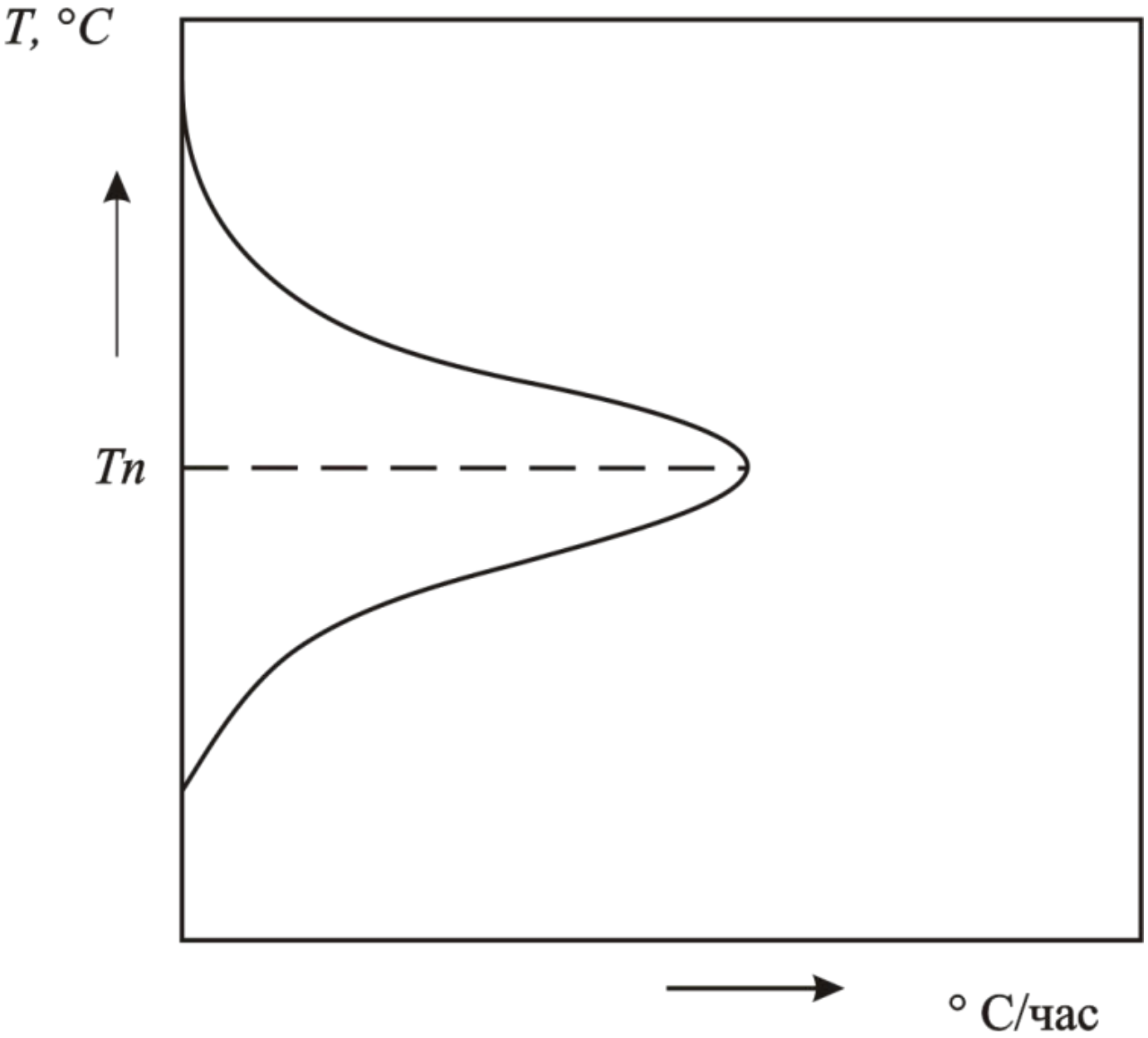
5 **– 24Х2Н4М (Ni=3,75%, Mo=1,23%)**

6 **– 20Х2Н4МВФ (Ni=4,38%)**

7 **– 20Х2Н4МВФА (Ni=4,38%, Mo=1,38%)**



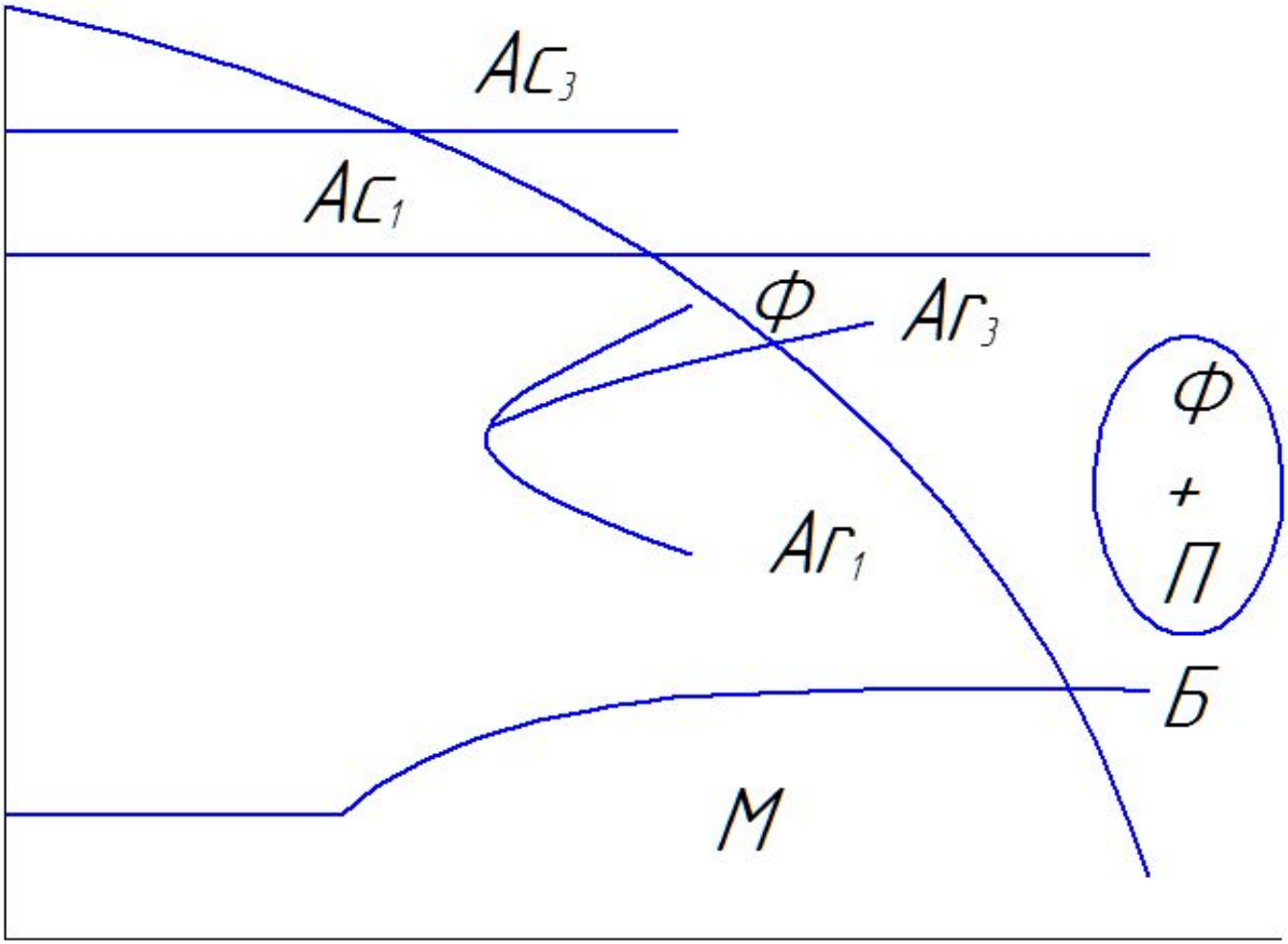
Обобщенная диаграмма изотермического распада аустенита при 400 °С опытных составов стали хромоникелевой композиции при легировании молибденом, вольфрамом, и ванадием.


T, °C
Tn
° C/час

Виды отжига:

-<u>Отжиг при непрерывном охлаждении при</u> $T_н > A_{c3}$

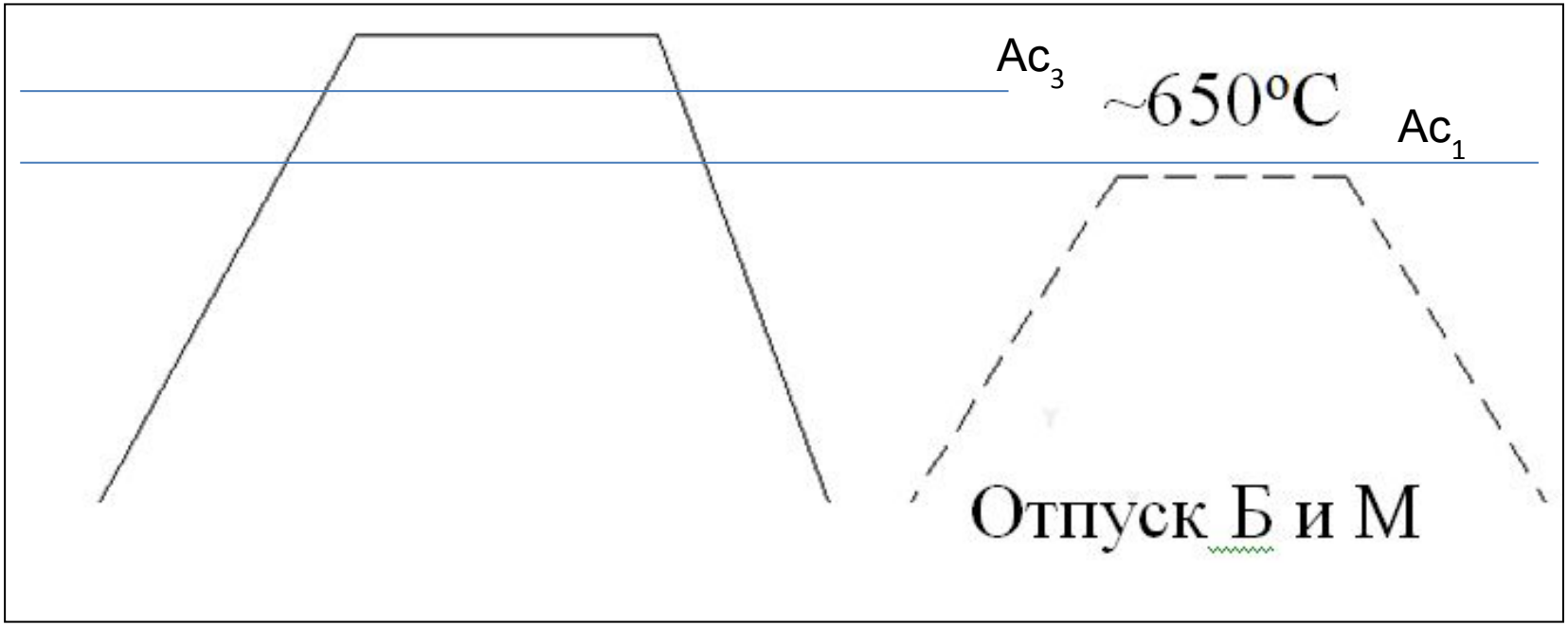
Для низколегированных сталей



Виды отжига:

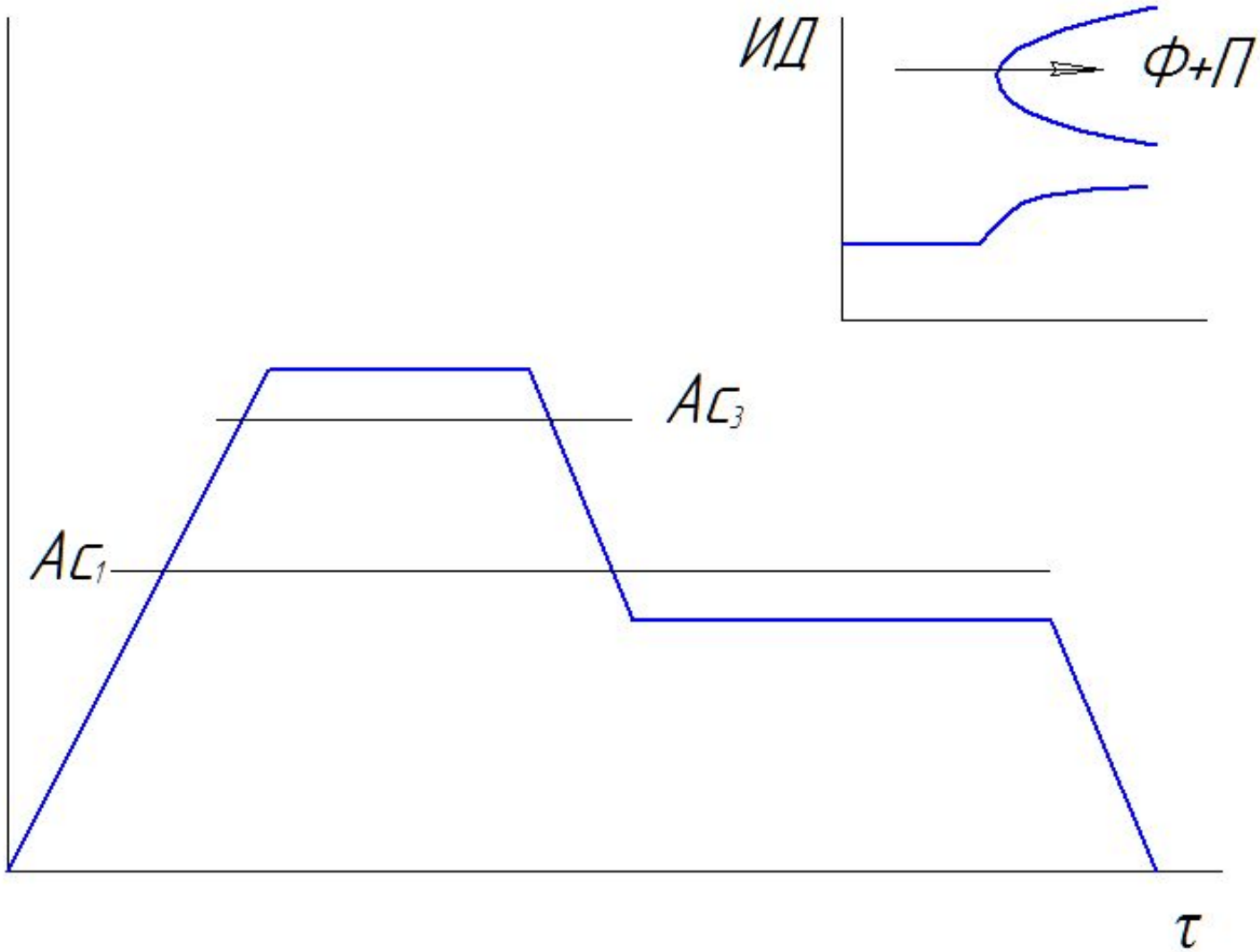
-<u>Отжиг при непрерывном охлаждении при</u> $T_н > A_{c3}$

Стали мартенситного класса

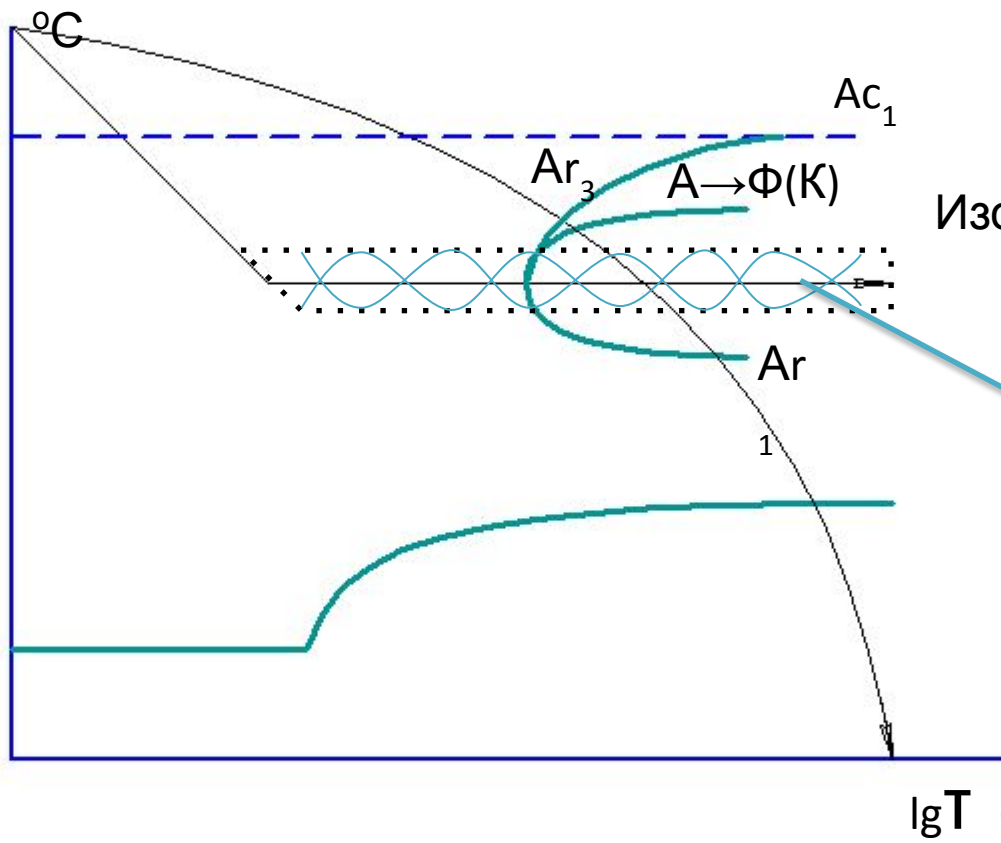


Виды отжига:

- Изотермический отжиг



Изотермический отжиг

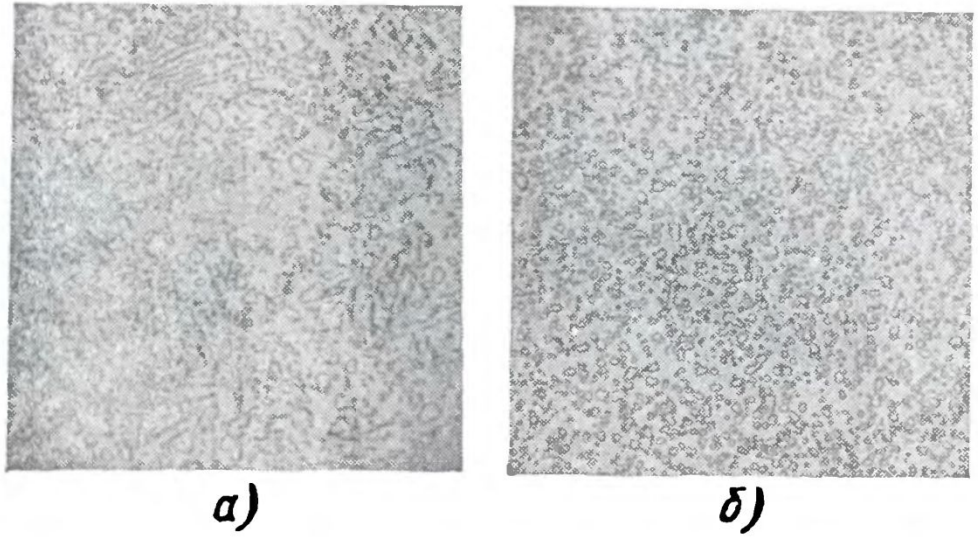


Изотермический отжиг

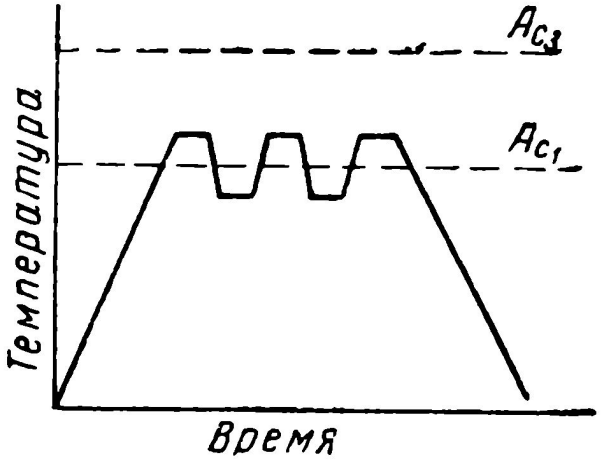
Диапазон температур мин. Устойчивости аустенита

Обычный отжиг При непрерывном охл.

ОТЖИГ И НОРМАЛИЗАЦИЯ СТАЛИ
Неполный отжиг

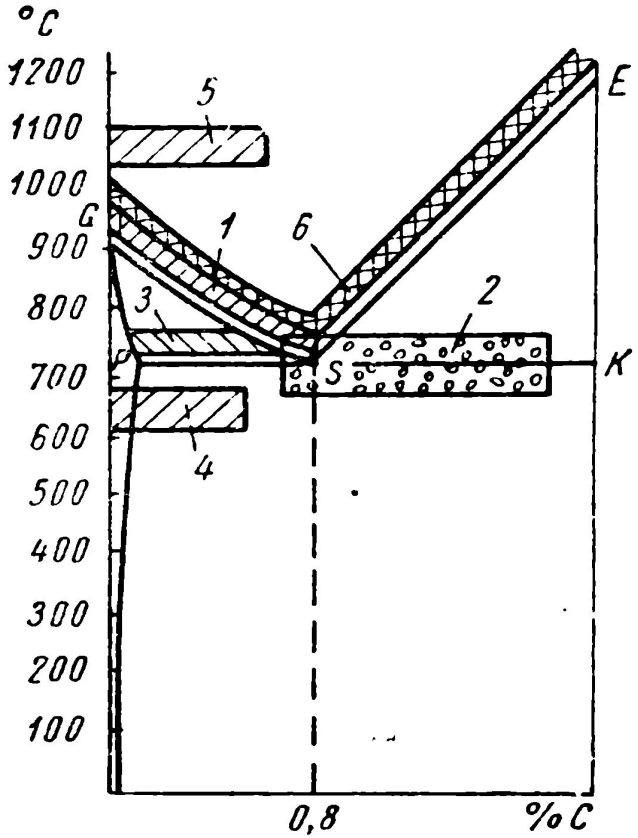


Фиг. 58. Зернистый перлит:
а — пластинчатый перлит, частично превратившийся в зернистую форму; *б* — перлит с зернистой формой цемента. × 500.



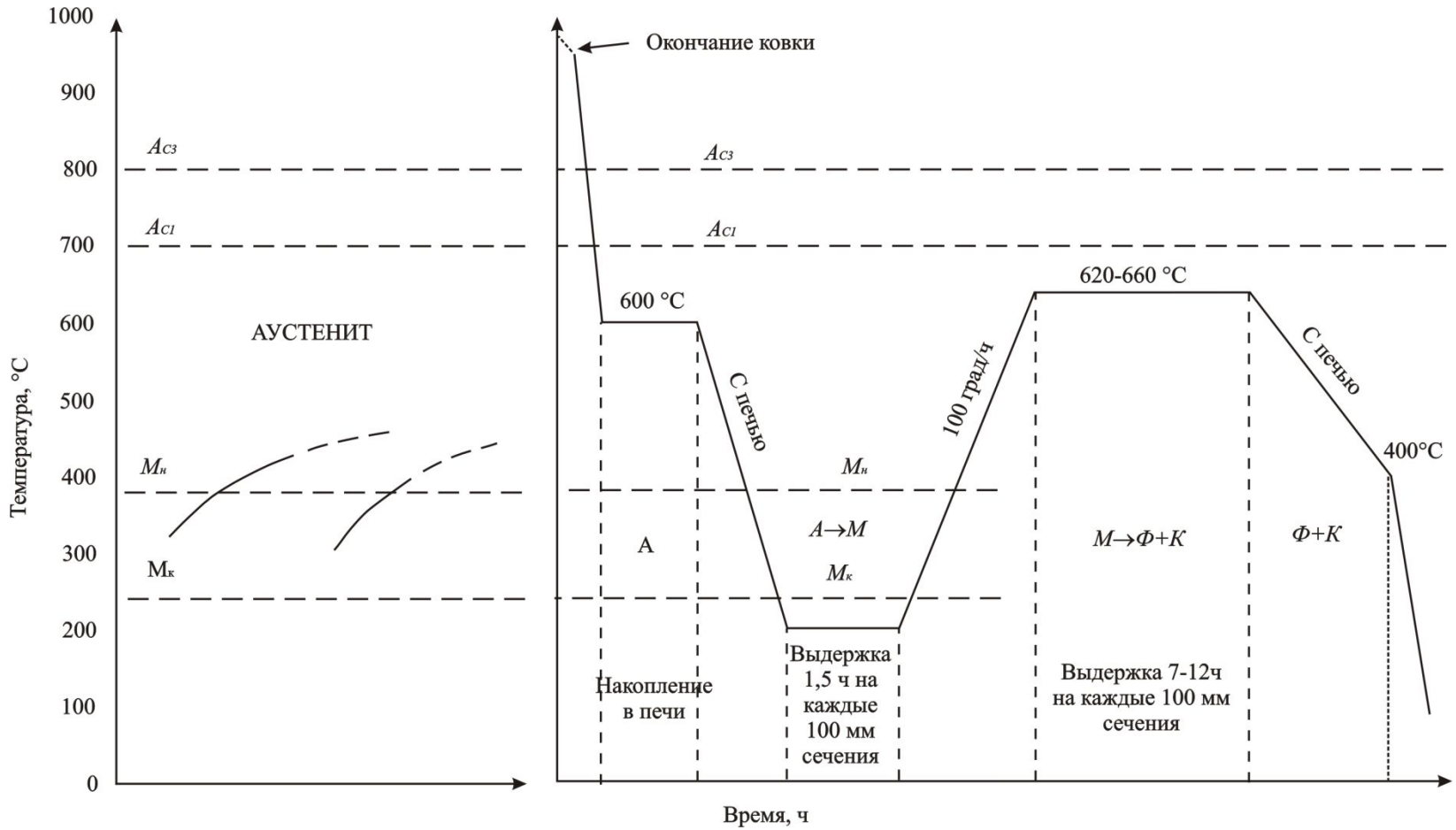
Фиг. 59. Схема маятникового (циклического) отжига.

Низкотемпературный отжиг (высокотемпературный отжиг)



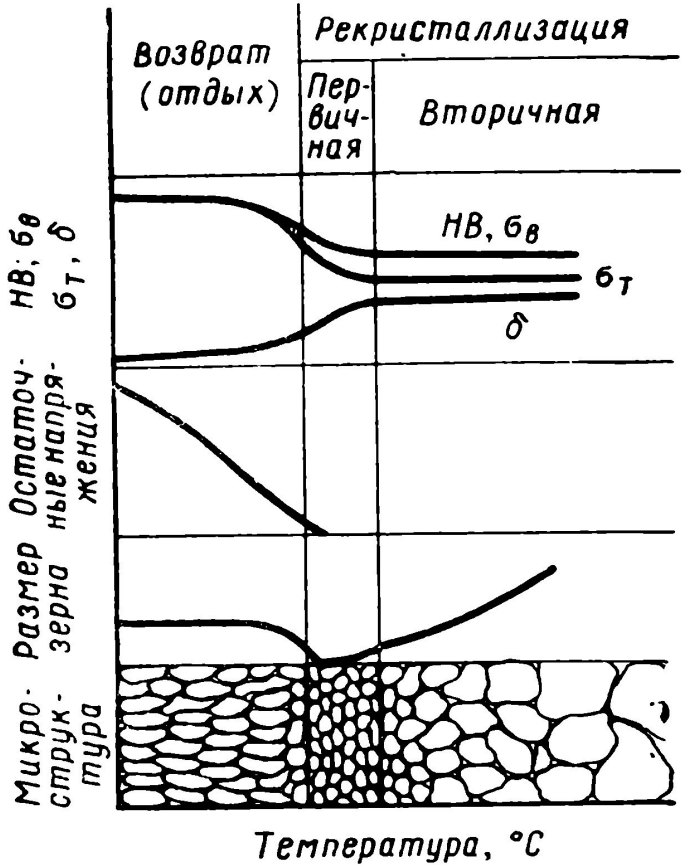
Фиг. 54. Температуры нагревания стали для отжига и нормализации:

1 — полный отжиг доэвтектоидной стали; *2* — неполный отжиг заэвтектоидной стали; *3* — неполный отжиг доэвтектоидной стали; *4* — низкотемпературный отжиг и рекристаллизационный отжиг; *5* — диффузионный отжиг; *6* — нормализация.



Режимы противофлокенной обработки (отжига) поковок из высоколегированной конструкционной стали мартенситного класса (18Х2Н4ВА) [125]

Рекристаллизационный отжиг

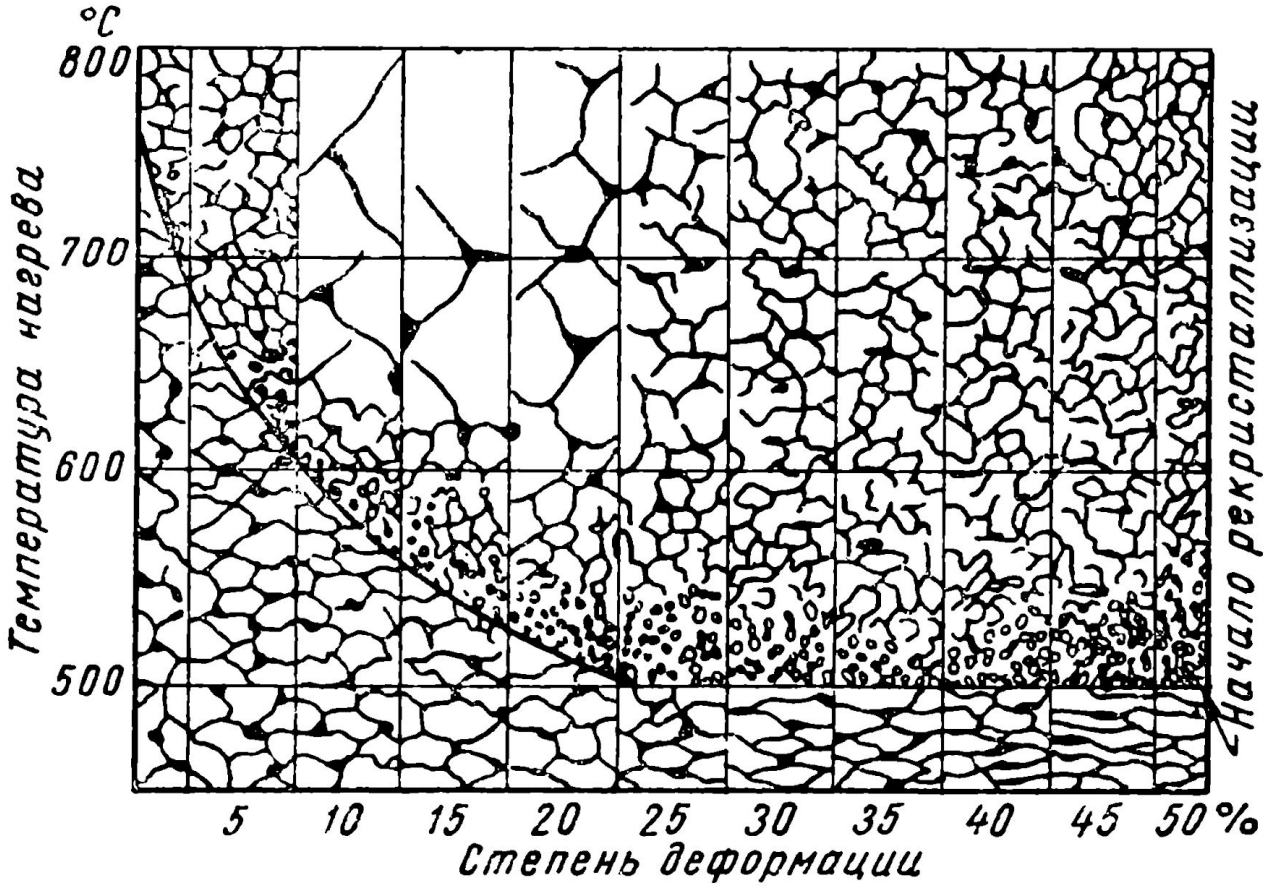


Фиг. 62. Схема изменения структуры и механических свойств при нагревании холоднодеформированного металла.

$$T_{рекр} \approx 0{,}4T_{пл},$$

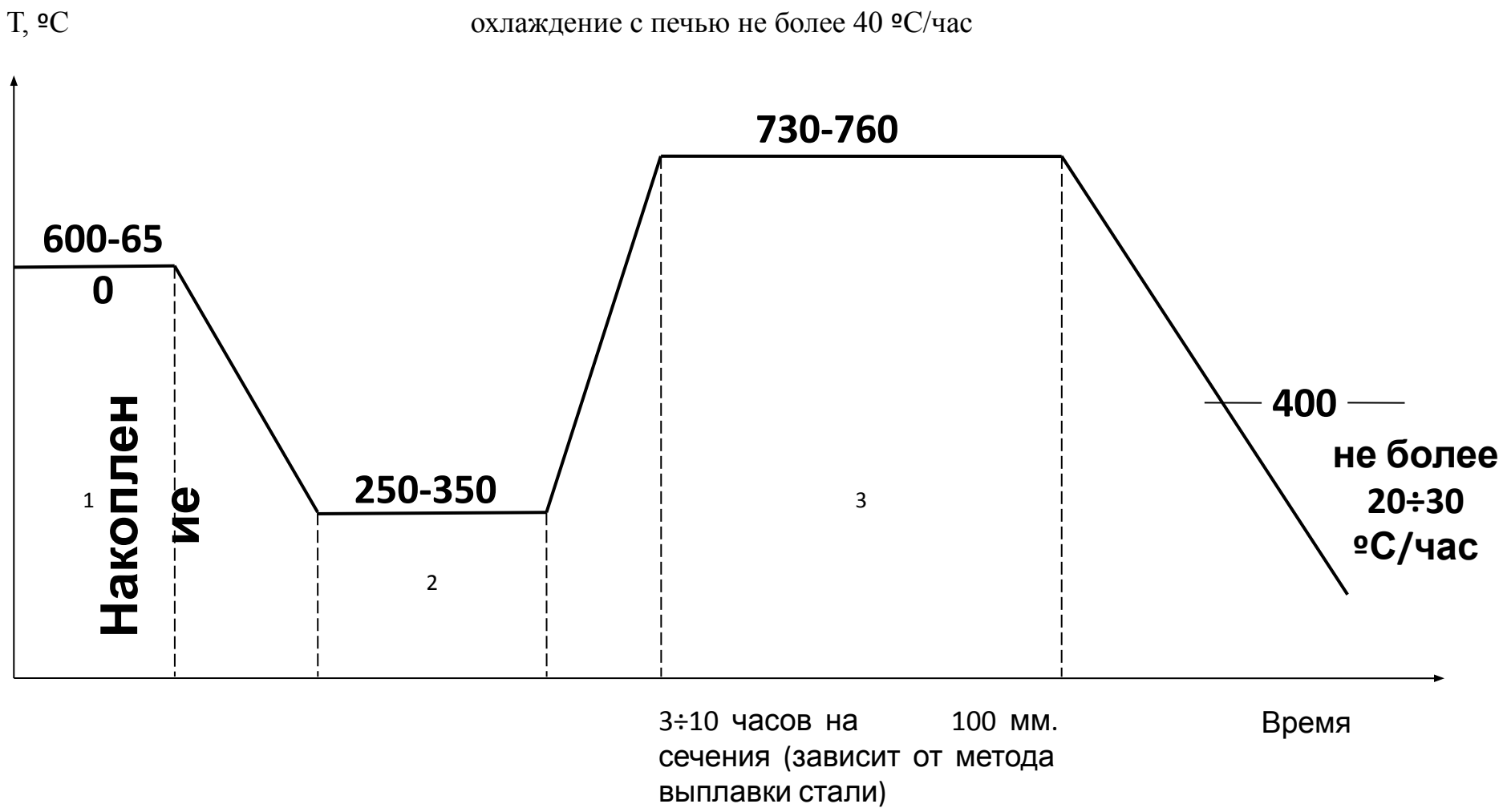
где $T_{рекр}$ и $T_{пл}$ — соответственно температуры рекристаллизации и плавления в °К.

Рекристаллизационный отжиг

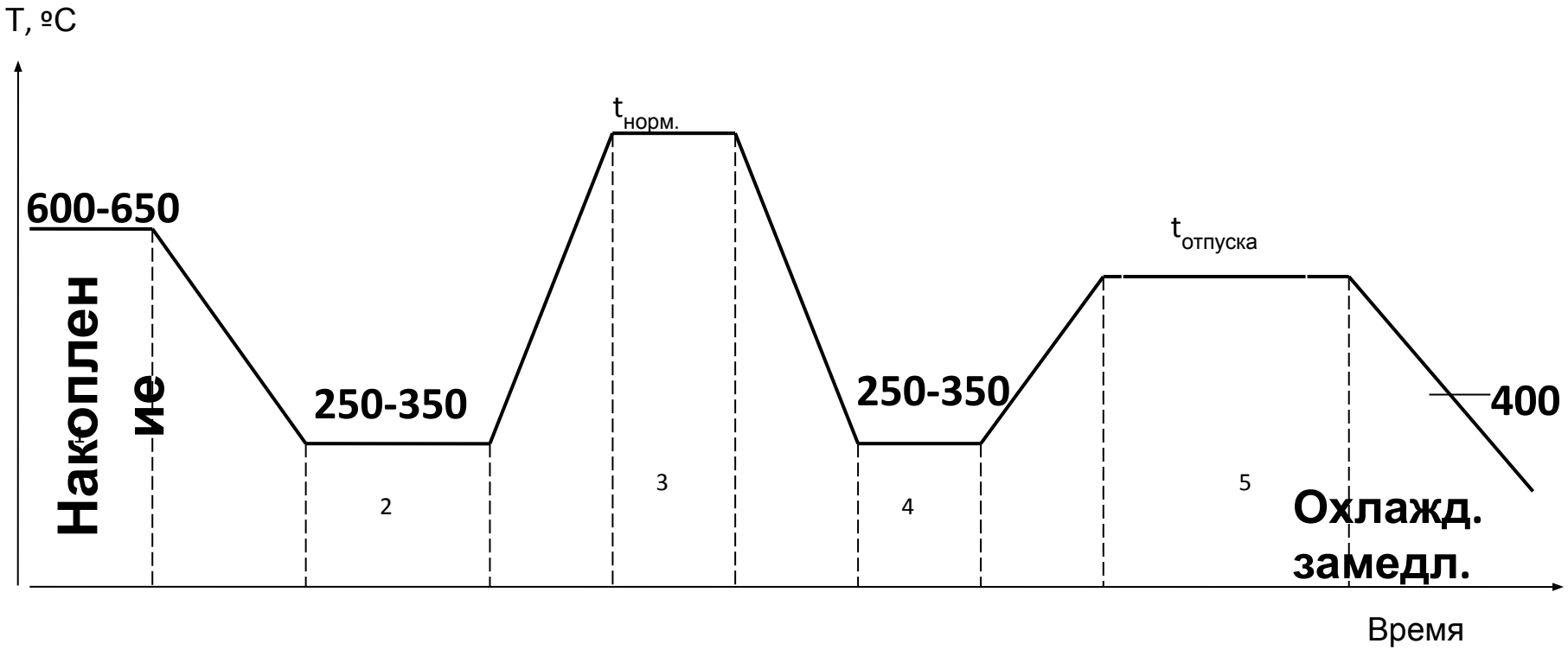


Фиг. 63. Диаграмма зависимости величины зерна низкоуглеродистой стали от степени деформации и температуры отжига рекристаллизации.

Фактические рекомендуемые режимы ПТО для различных групп марок стали.

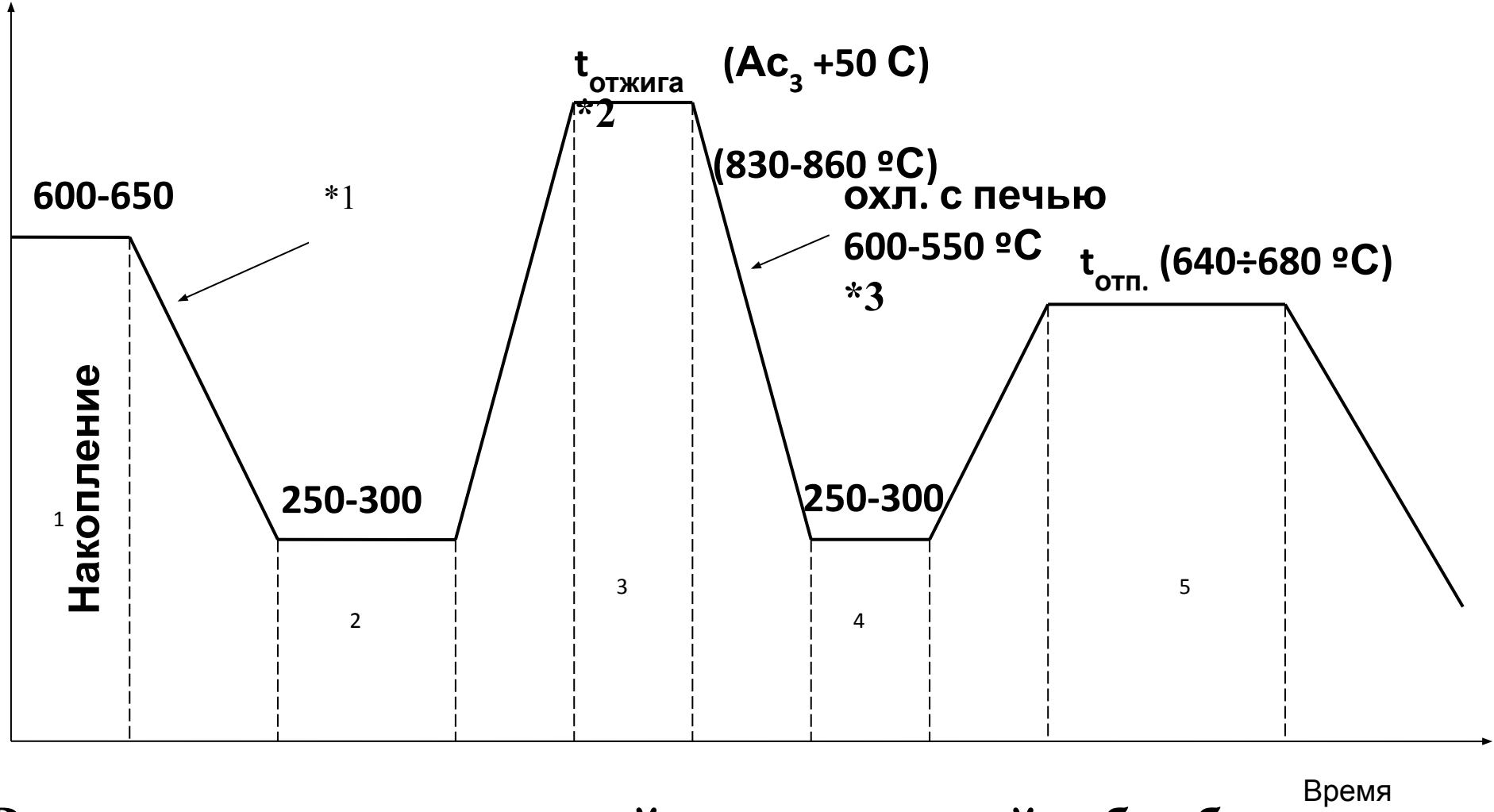


Режим предварительной термической обработки для стали марок 25Х2МФА, 12Х2МФА, 15Х2МФА, 18Х2МФА, 25Х3МФА, 15Х1М1Ф.



Режим предварительной термической обработки для групп легированных марок стали.

$t_{норм}$ ºC	920-960	880-920
$t_{отп}$ ºC	730-760	640-680
Марка стали	25Х2МФА, 12Х2МФА, 15Х2МФА, 18Х2МФА, 25Х3МФА.	15Х3НМФА, 15Х3НМФА-А, 15Х2НМ1ФА, 15Х2НМ1ФА-А



Режим предварительной термической обработки для стали марок 40ХН, 40Х2Н2М, <u>25ХН3МФА,</u> 40ХНМА, 38ХГН, 30ХН3А, 4Х4МВФ, 5ХНМ2, 36ХНВ, 34ХН4М, 34ХН2МА, <u>35ХН3МФА, 38ХН3МФА,</u> 4Х4М1В3Ф, 5ХНВ, 5ХНМ.

Эффект наследования А→Б превращения на стадии переохлаждения после копежа на структуру и свойства после последующих этапов термической обработки

Недостатки:

- наследование эффекта повышенной легированности на последующих этапах, вплоть до отпуска (в схеме многоциклового отжига).

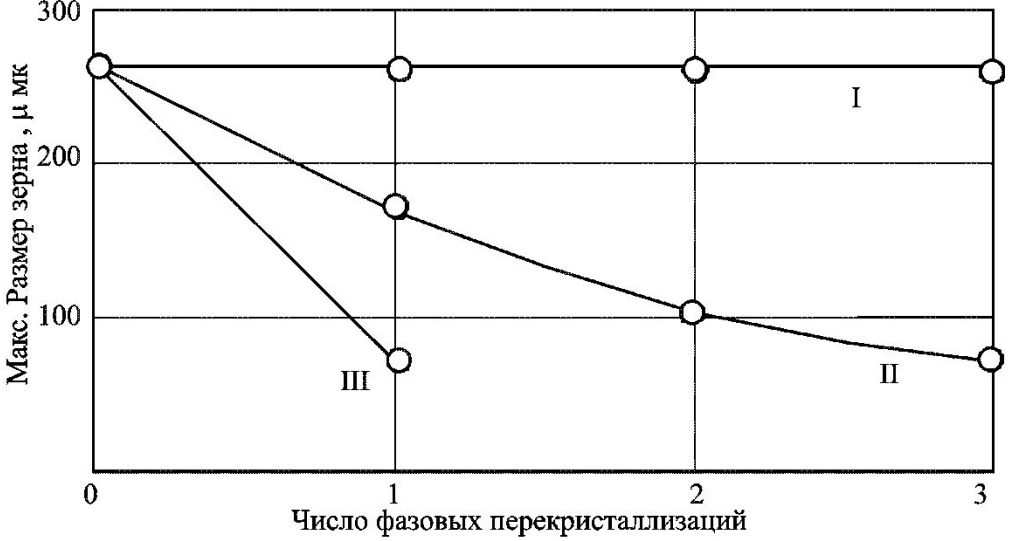
Это наследование структуры превратившегося обогащенного аустенита в бейнит при переохлаждении после накопления (при отсутствии диффузионного превращения) приводит:

Сохранение первичного (крупного – $T_н$=1200°C) аустенитного зерна (в структуре – бейнит)

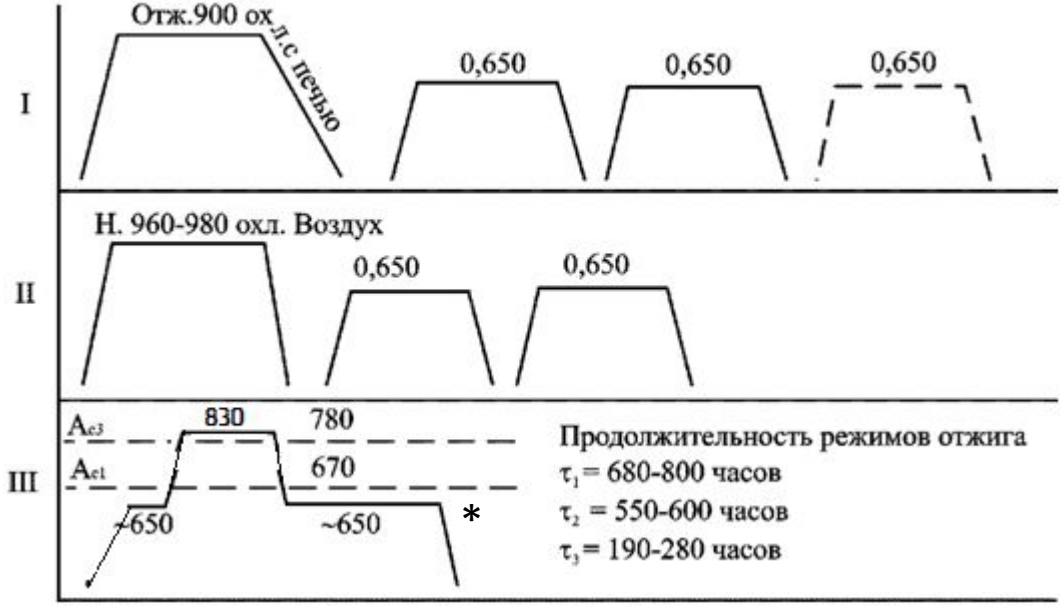
Переход и его сохранение на следующей стадии – перекристаллизация с последующим отпуском. Этот эффект по сохранению границ крупного первичного аустенитного зерна может наследоваться и далее по циклу термической обраотки, вызывая негативные последствия:

- снижение характеристик пластичности вязкости;
- снижения ударной вязкости и критического температуры хрупкости;
- повышение склонности к ОХ;
- снижение служебных характеристик

Факт наследования размера зерна подтверждается следующими схемами:



а)

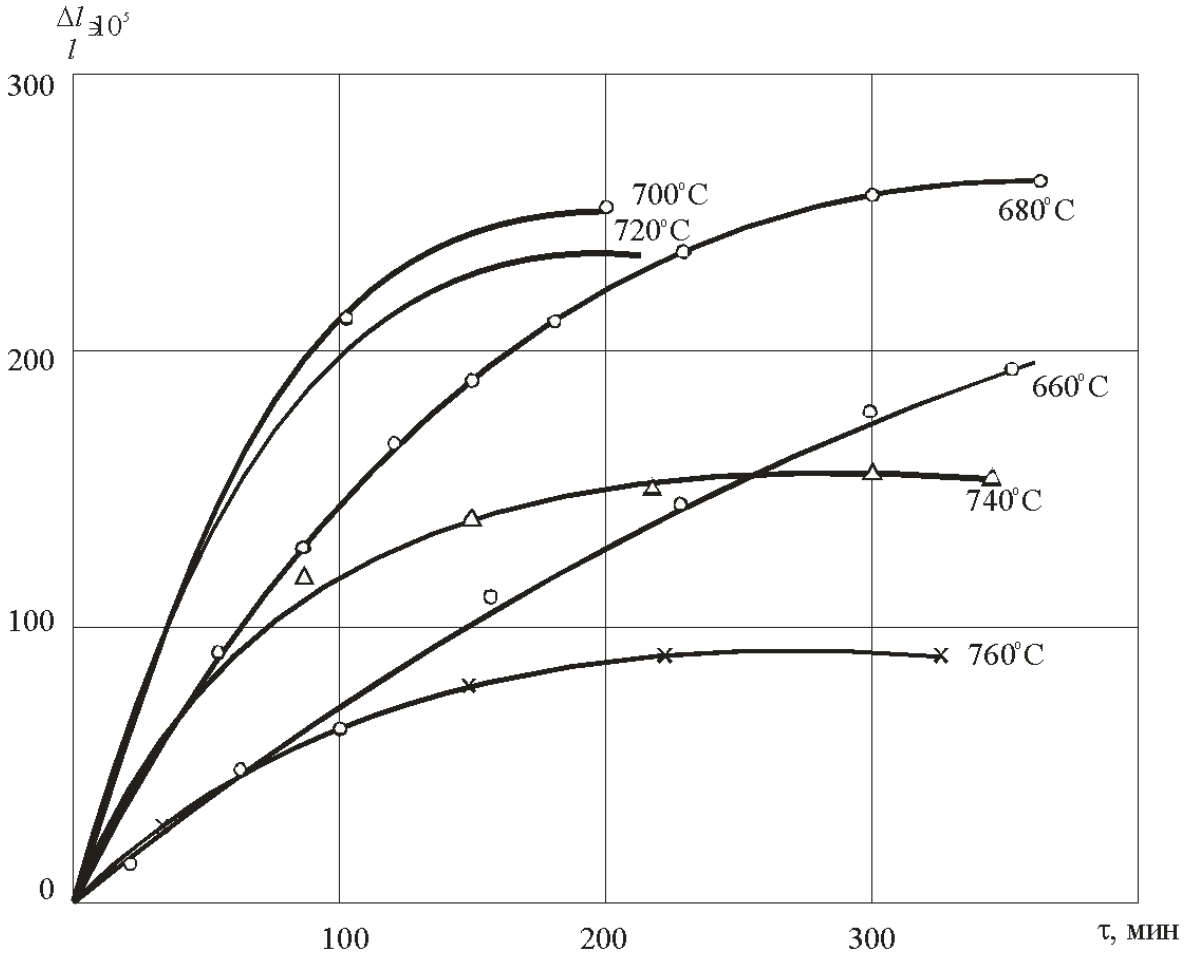


*при оптимальности T°C изотермического отжига

Степень измельчения зерна в стали марки 20ХН3МФА в зависимости от режима предварительной термической обработки.

Ni – до 3.0%

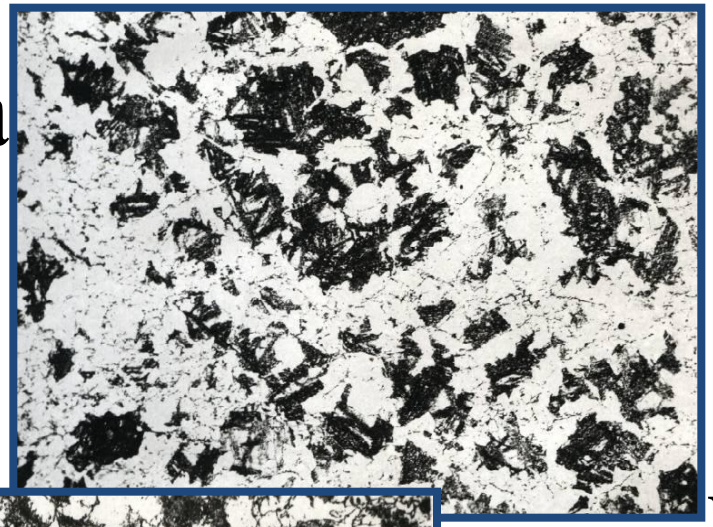
Определение оптимальной температурной зоны изотермического А→Ф+П превращения.



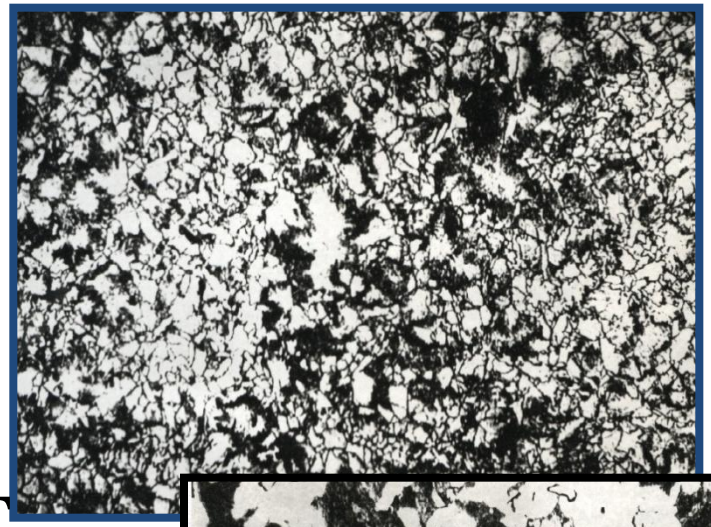
Временная зависимость изменения длины образцов стали марки 15Х2МФА-А при изотермических выдержках при температурах 660,680,700,720,740,760 ^{0}С.

Микроструктура стали 15Х2МФА-А, полученная в результате изотермической выдержки при температуре: а) 660 °С; б) 680 °С в) 700 °С; г) 720 °С; д) 740

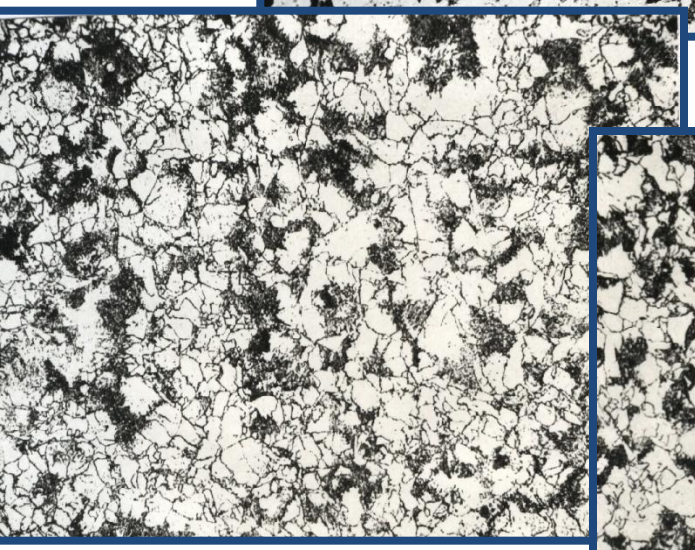
а

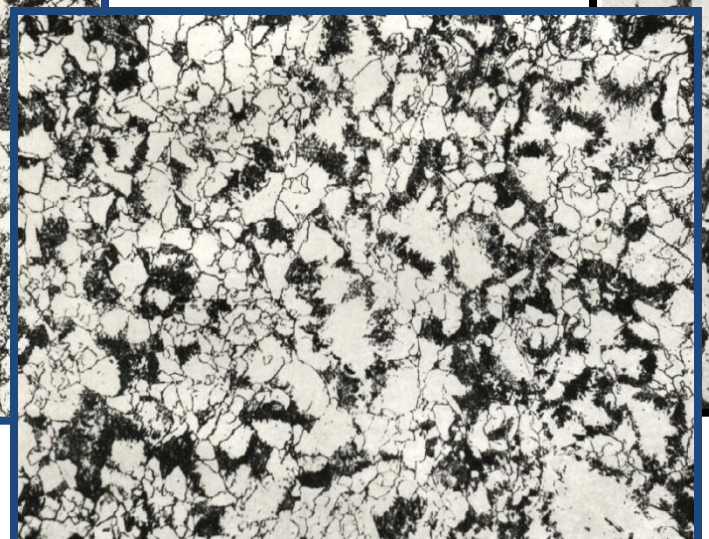


б

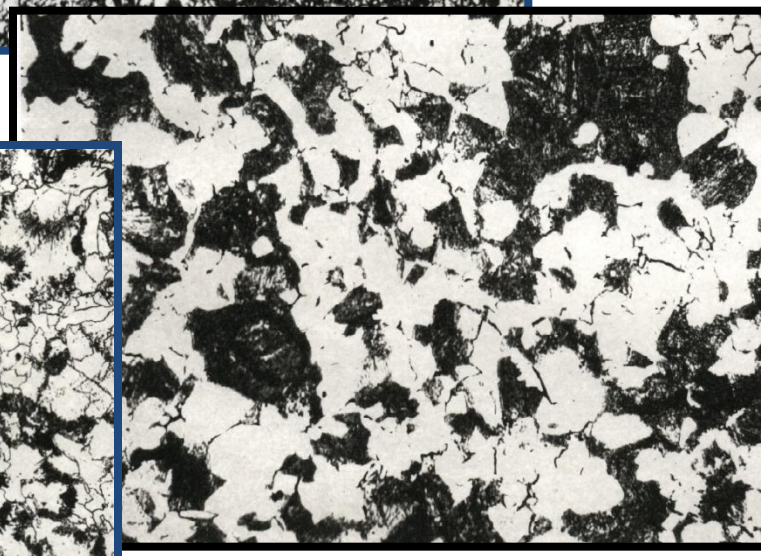


г





в



д

Наилучшим и наиболее эффективным способом устранения последствий перегрева в структуре и изломе, с целью измельчения зерна (т.е подготовке структуры под окончательную термическую обработку) остается **полный отжиг с распадом А при охлаждении на структуры перлитного типа.**

Для сталей повышенной легированности – необходим изотермический отжиг.

При установлении рациональных методов борьбы с флокенами в процессе переработки стали необходимо учитывать:

- Главные факторы, обуславливающие образование флокенов в стали, являются водород и структурные напряжения;
- Сталь приобретает иммунитет к флокеночувствительности лишь после того, как содержание водорода в ней снижено до определенного предела;
- Момент образования флокенов;
- Кинетику превращения переохлажденного аустенита в стали.

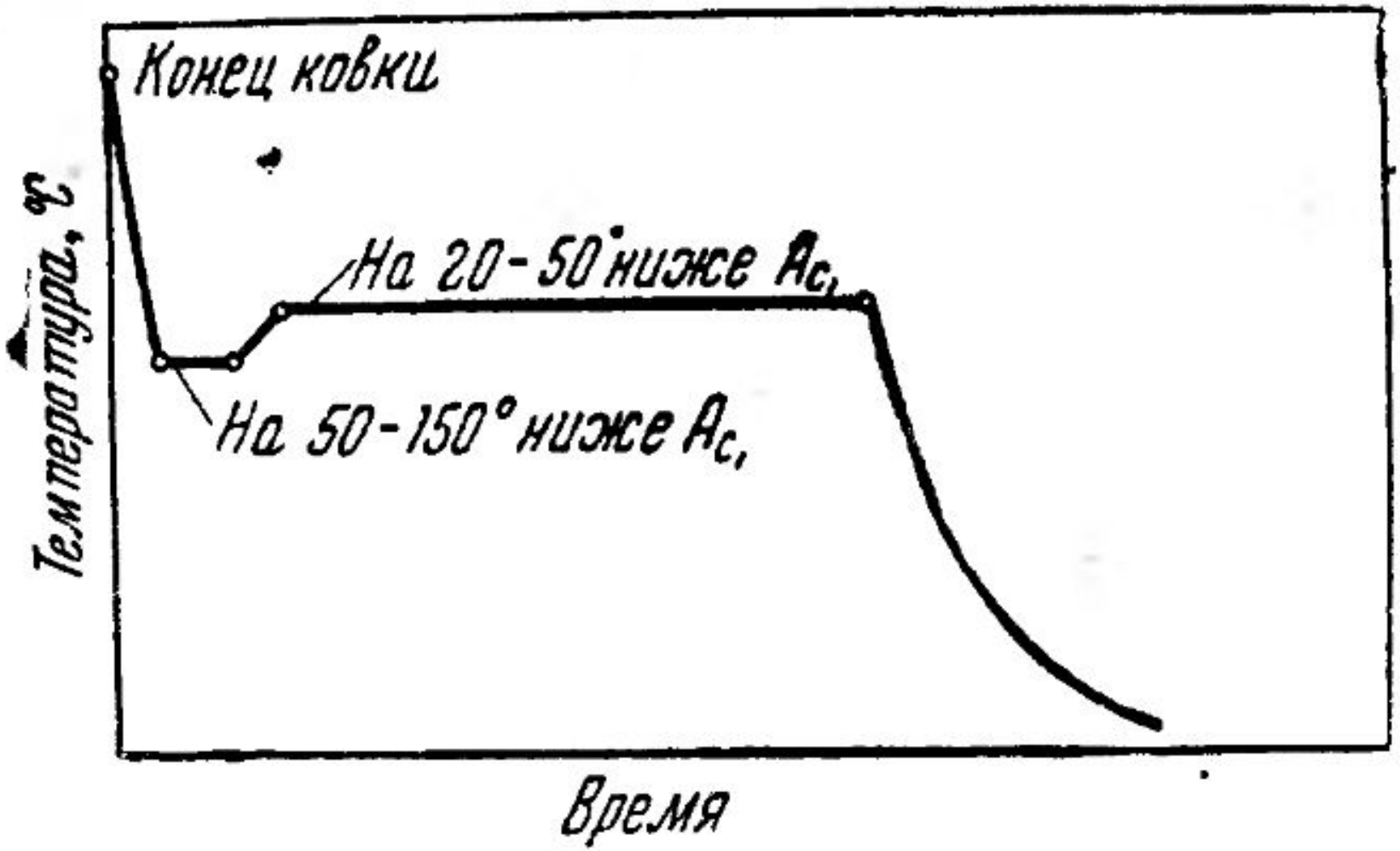


График тепловой обработки, предупреждающей образование флокенов в стали перлитного класса

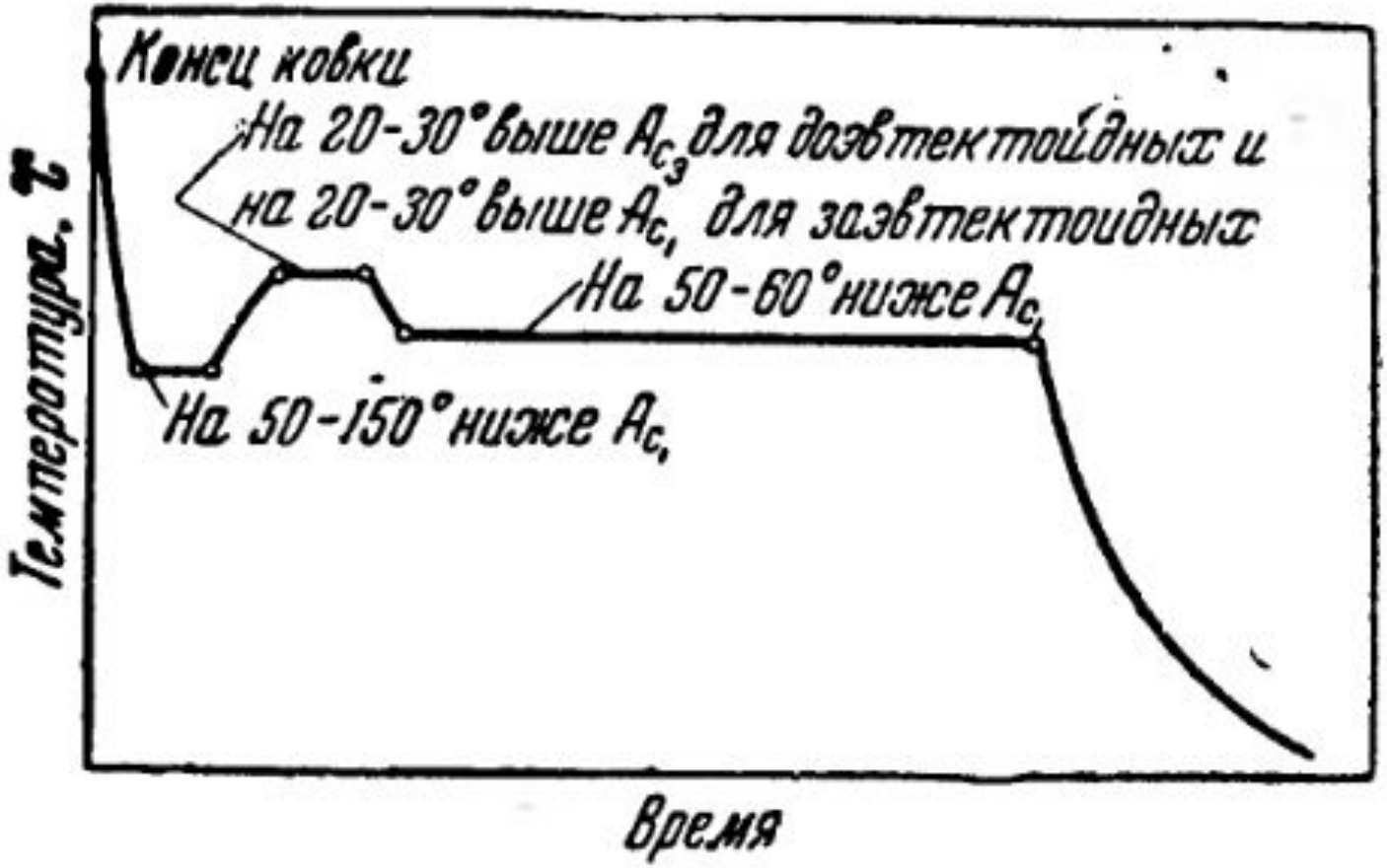


График тепловой обработки, предупреждающей образование флокенов в стали перлитного класса для случая, когда сталь не подвергается дальнейшей горячей механической обработке

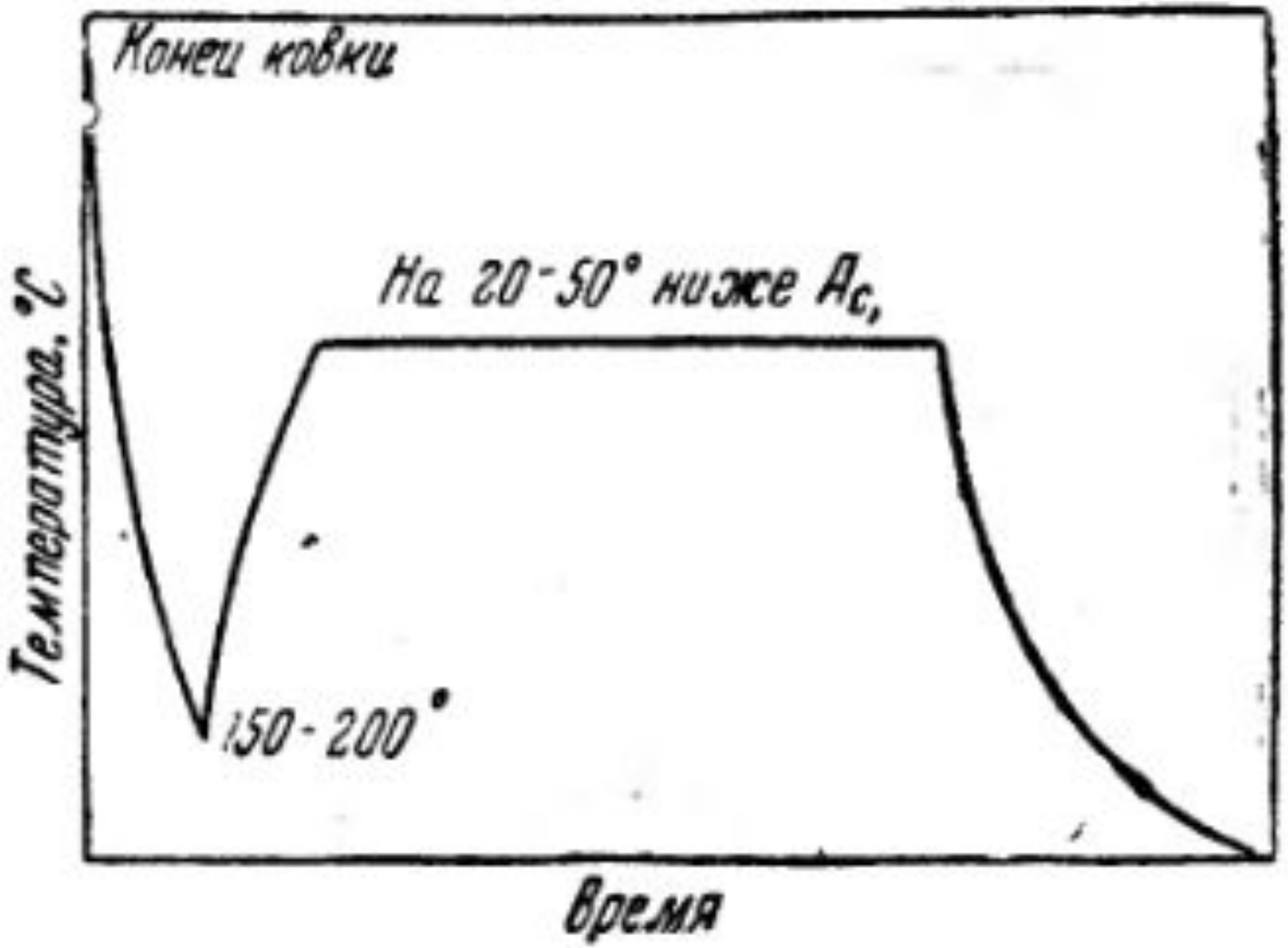


График тепловой обработки, предупреждающей образование флокенов в стали мартенситного класса

Виды брака при отжиге и нормализации

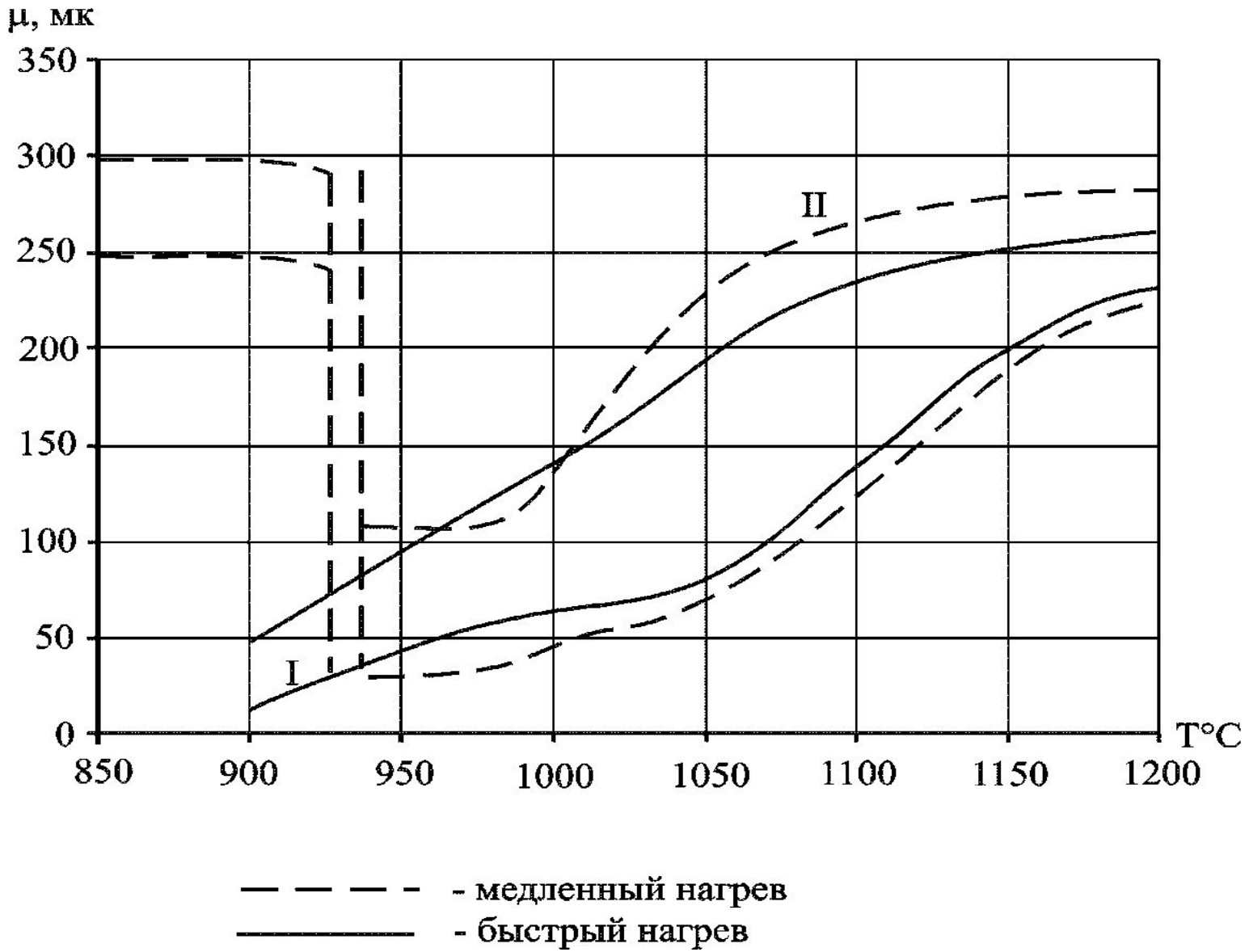
- НЕДОГРЕВ
- ПЕРЕГРЕВ
- ПЕРЕЖОГ
- ФЛОКЕНЫ

Закономерности факторов СН

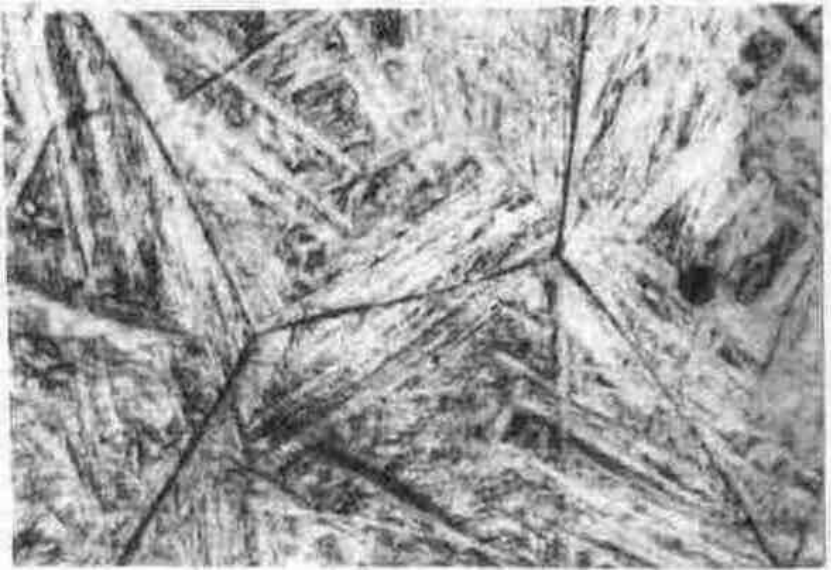
- **Все проявления СН существенно зависят от исходной структуры стали.**

- **Скорость нагрева в температурном интервале образования аустенита.**

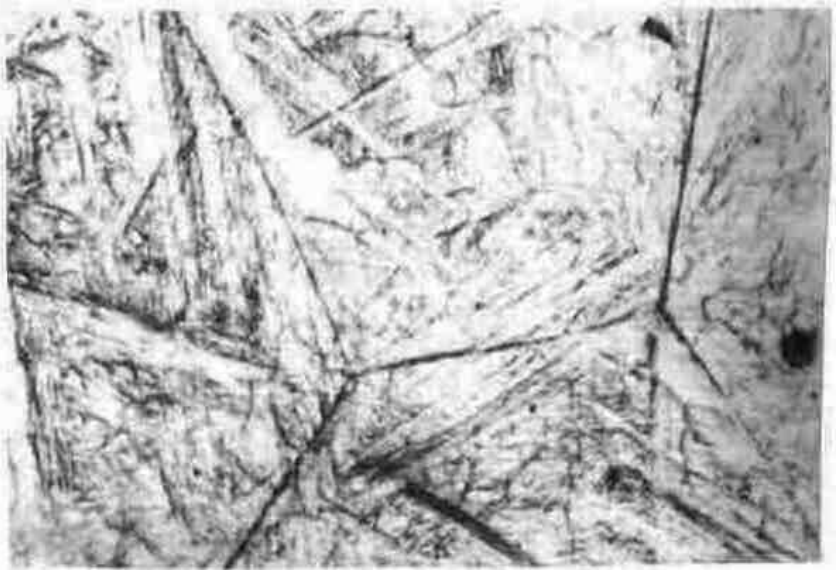
- **Супер быстрый нагрев – ТВЧ, соляная ванна → Восстановление зерна (крупного).**



Влияние температуры и скорости нагрева на размер зерна стали марки 20Х2Н4МВФА

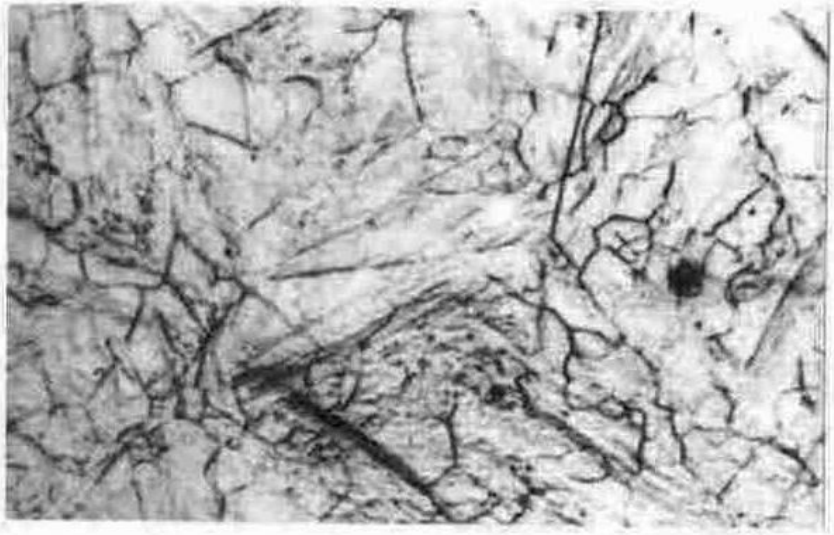


T = 900 °C



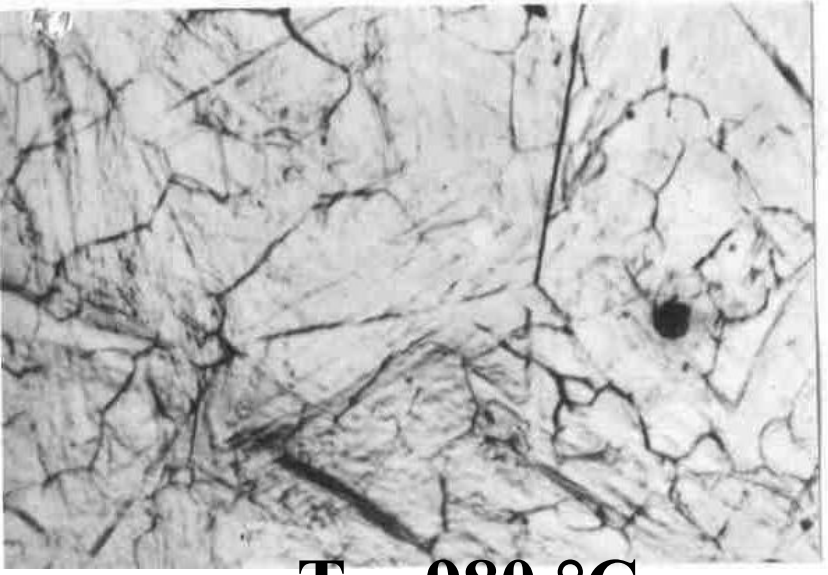
T = 930 °C

T = 940 °C

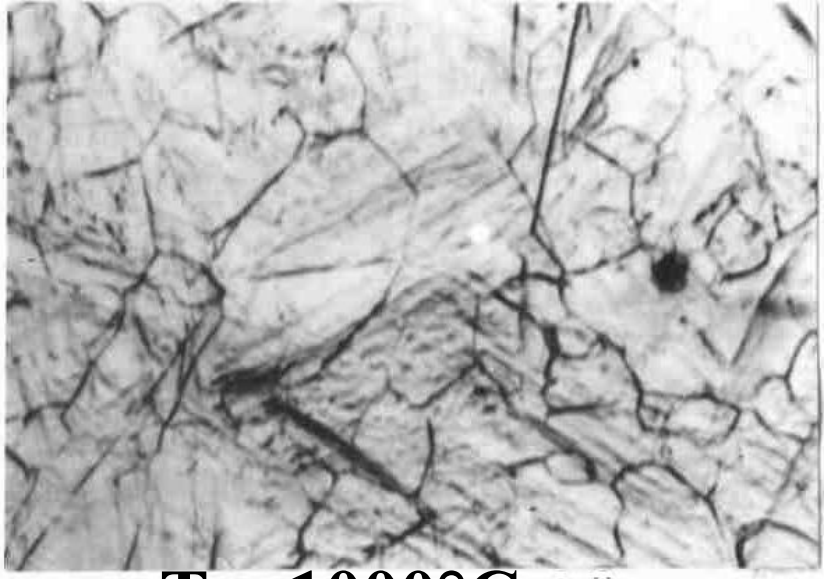


T = 960 °C

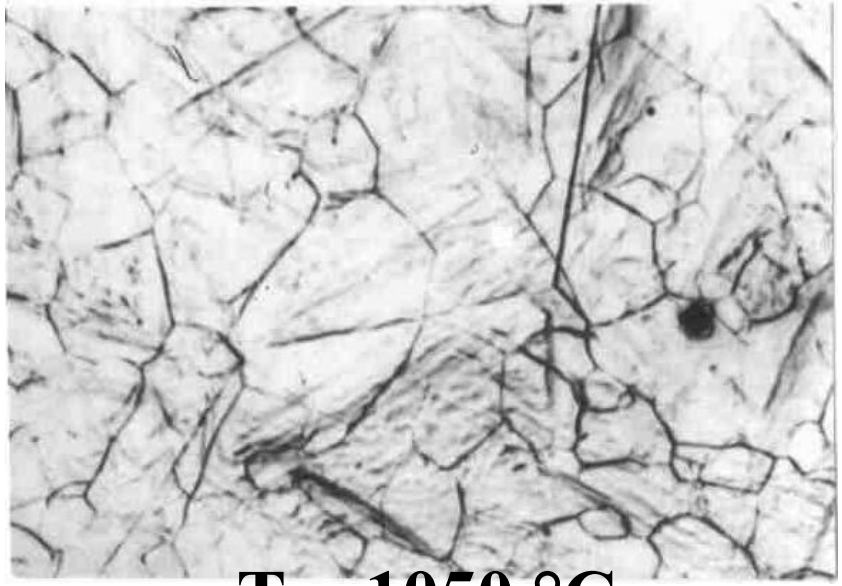
Кинетика изменения рекристаллизованного аустенитного зерна стали 20Х2Н4МВФА (100×).



T = 980 °C



T = 1000°C



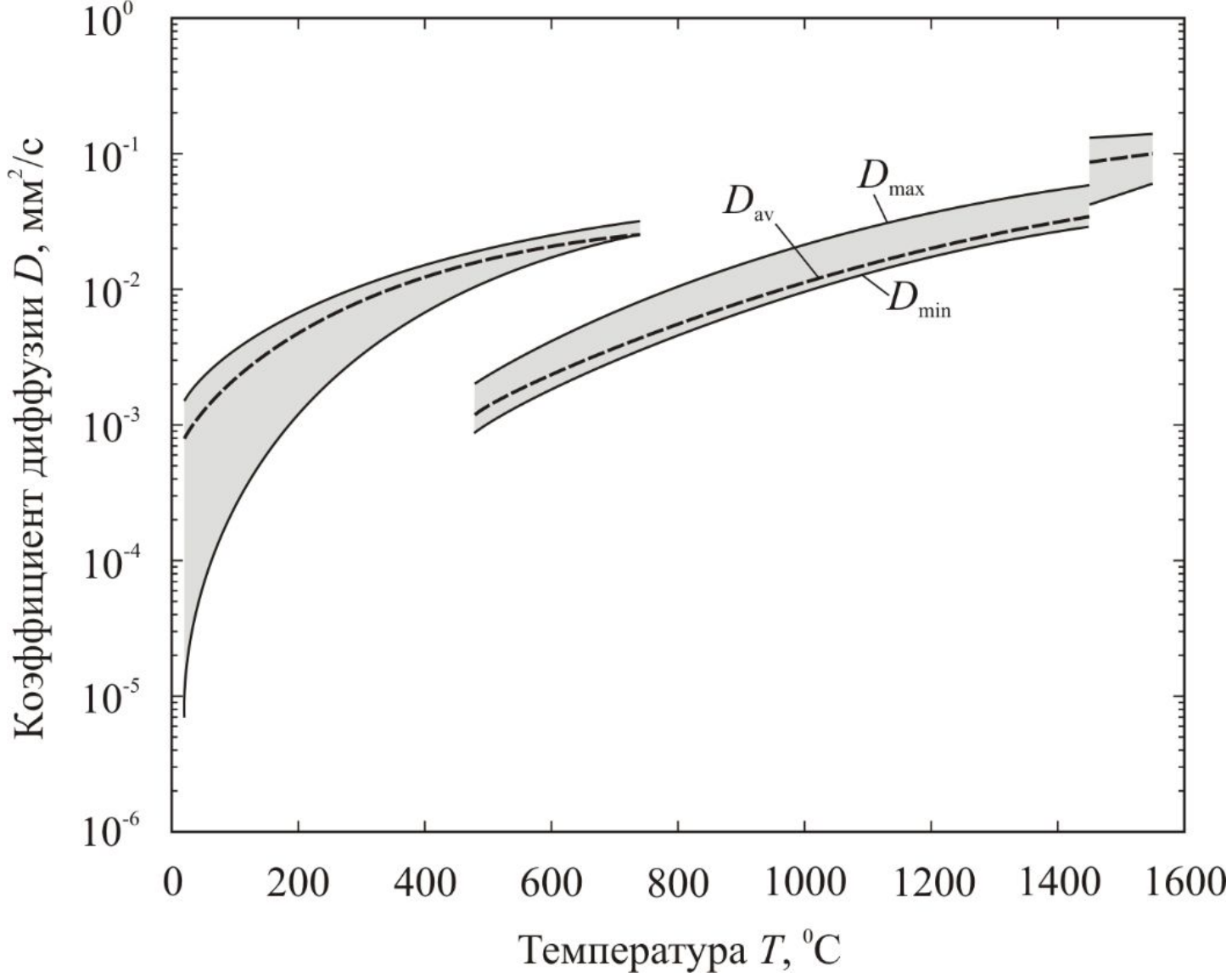
T = 1050 °C

Кинетика изменения рекристаллизованного аустенитного зерна стали 20Х2Н4МВФА (100×).

Влияние температуры аустенитизации на химический состав и тип карбидной фазы стали 20Х2Н4МВФА

Примечание: [C*] - среднее содержание углерода в стали

T аустен. °C	% содерж. карбидов	Состав карбидного осадка, %							Состав карбидного осадка
		C*	Fe	Cr	Ni	Mo	V	W	
820	1,71	0,20	0,97	0,04	0,15	0,15	0,14	0,06	VC, γ-Fe Me_3C
850	1,54	0,20	0,97	0,04	0,11	0,09	0,09	0,04	
880	1,61	0,20	1.16	0,03	0,13	0,06	0,03	-	γ-Fe, Me_3C VC
910	1,48	0,20	1,09	0,03	0,11	0,03	0,02	-	γ-Fe, Me_3C
950	1.53	0,20	1.14	0,03	0,12	0,02	0,02	-	γ-Fe, Me_3C
1000	0,82	0,20	0,61	0,02	0,10	0,01	0,02	-	На рентгенограмме нет линий
1050	0,69	0,20	0,38	0,01	0,07	0,01	0,02	-	
1200	0,82	0,20	0,51	0,01	0,06	0,01	0,03	-	

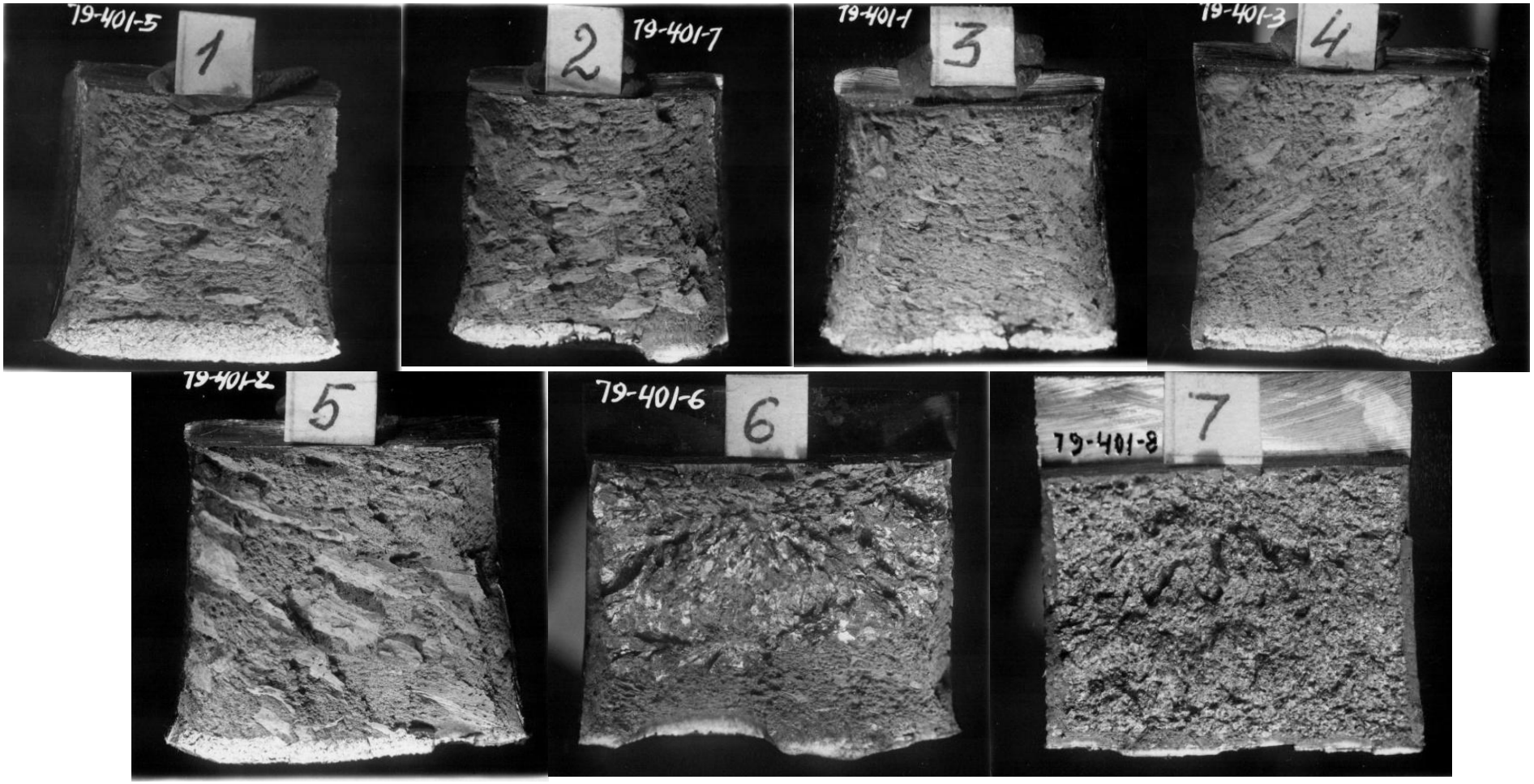


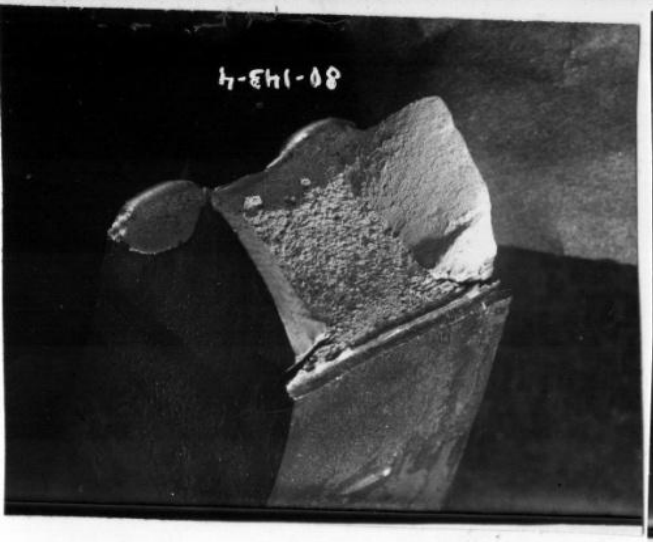
Полоса значений коэффициента диффузии водорода в низколегированных конструкционных сталях (Mundra, 1997).

Растворимость водорода *S* в стали при давлении P_{H2} = 0.1013 МПа, см^3/100 г (ppm)

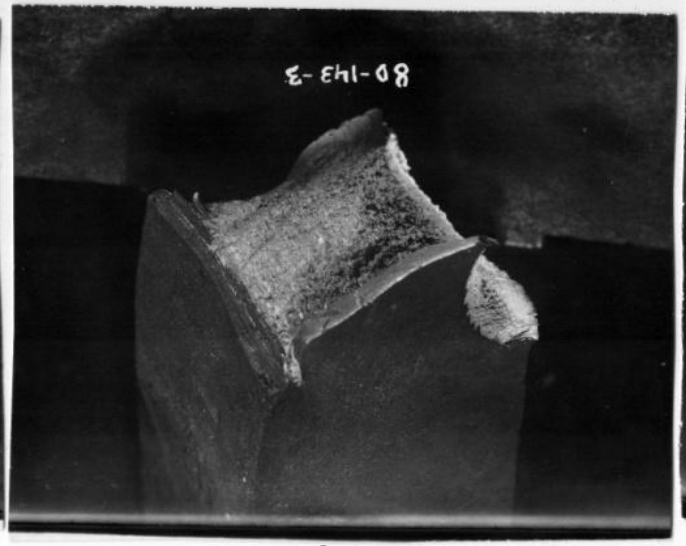
Температура, °C	1400	900	800	650	300
S в γ-Fe, см^3/100 г (ppm)	9.75 (8.78)	4.30 (3.87)	3.35 (3.02)	2.06 (1.86)	0.25 (0.23)
Температура, °C	250	200	100	24	–
S в γ-Fe, см^3/100 г (ppm)	0.15 (0.14)	0.08 (0.06)	–	–	–
Температура, °C	1400	900	800	650	300
S в α-Fe, см^3/100 г (ppm)	–	2.92 (2.63)	2.25 (2.03)	1.37 (1.23)	0.16 (0.14)
Температура, °C	250	200	100	24	–
S в α-Fe, см^3/100 г (ppm)	0.091 (0.082)	0.047 (0.042)	0.0074 (0.0067)	–	–

Фото изломов по стали 20Х2Н4МВФА-ВД. Попытки исправления камневидного излома (попытки).





4



3

1

2

1,3,4 – вид излома после отжига
2 – после отжига + ОТО