РАЗДЕЛ 1
Общие положения по разработке технологических процессов термической обработки

Лекция 1

План лекции

1. Роль термической обработки в повышении качества изделий и снижении металлоемкости машин.

2. Перспективы развития технологий термической обработки.

Перспективы развития технологий термической обработки

- основным конструкционным материалом в ближайшие десятилетия останутся металлы и сплавы;

- в странах с высоким техническим уровнем производства увеличится выплавка стали, подвергаемой термической обработке;

- предусмотрено в 2-3 раза увеличить производство стального литья; при этом преимущественно будет повышаться доля производства литья из высоколегированной стали, подвергаемой термической обработке;

- за 30 лет производство чугунного литья увеличилось в 4-6 раз.

Лекция2 Принципы разработки технологических процессов термической обработки

План лекции

1.Принципы разработки технологических процессов термической обработки.

2.Обоснование выбора технологии в зависимости от характера изделий, требований к свойствам, надежности и масштабов производства.

Основное назначение ЕСТПП

- Создание для всех предприятий и организаций системного подхода к выбору и применению методов и средств ТПП.
- Обеспечение условий производства продукции, требуемой категории качества в минимальные сроки, при минимальных трудовых и материальных затратах.
- Организация производства высокой степени гибкости, допускающей возможность непрерывного его совершенствования и быстрого перехода или переналадки на выпуск других изделий.

Задачи решаемые ТПП

- Отработка новых деталей, узлов и др. в целом на их технологичность.
- Разработка технологических процессов;
- Проектирование и изготовление средств технологической оснастки для выполнения термической обработки.
- Организация и управление процессом ТПП.
- Решение задач ТПП должно осуществляться на различных уровнях: общероссийском, отраслевом и предприятиях.

Вопросы решаемые при разработке ТПП

- Анализ исходных данных (чертеж, программа выпуска изделий, стандарты, справочники);
- Выбор вида технологического процесса: типового, группового, единичного;
- Выбор исходной заготовки;
- Разработка операций термической обработки, включая транспортировку и контроль качества изделий;
- Соблюдение требований техники безопасности и экологии при выполнении технологического процесса;
- Расчет экономической эффективности разработанного процесса;
- Оформление технологической документации (технологическая карта).

Задачи типизации ТП

- Классификация заготовок и деталей по конструкторско-технологическому подобию.
- Систематизация и анализ возможных технологических решений по термической обработке изделий для получения заданных свойств.
- Проектирование оптимального для данного производства типового процесса термической обработки.

Лекция 3

План лекции 3

1. Технологичность изделий при термической обработке.

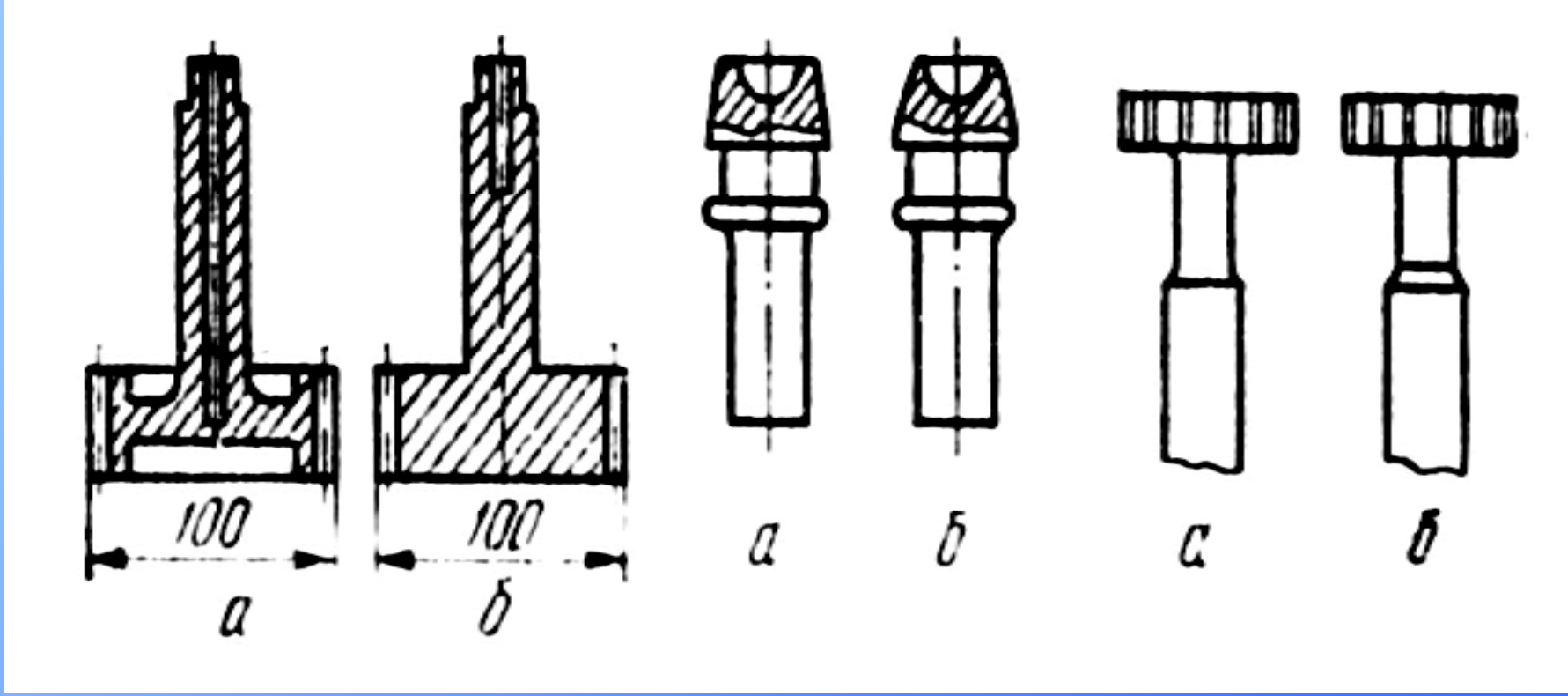
2.Факторы технологичности: марка материала, форма и размеры изделий, стадия изготовления, технические требования и допуски на параметры.

3. Устойчивость технологического процесса. Оформление технической документации на процессы термической обработки.

Факторы влияющие на степень технологичности

- Марки материала, из которого данная деталь изготовлена.
- Формы и размеров.
- Стадии изготовления.
- Технических требований на свойства и пределов (допусков) на отклонение от них.

Влияние формы деталей на технологичность



а – правильная; б - неправильная

Характеристика свойств и технологичность

Свойства	Размер допуска		
	широкий	средний	узкий
Твердость	>58	58-62	58-60
Глубина	>0,8	0,8-1,2	0,8-1,0
упрочненного слоя Технологичность	высокая	средняя	низкая

Факторы способствующие повышению долговечности

- Комплексная механизация и автоматизация технологических процессов, обеспечивающая полное и однообразное выполнение технологических параметров для всех изделий.
- Обеспечение устойчивого выполнения предыдущих операций обработки (литье, обработка давлением горячая или холодная, механическая обработка.
- Увеличение объема контроля деталей – переход от выборочного к полному контролю, а также проведение системных анализов случаев брака.

Лекция 4 Организация контроля процессов термической обработки

План лекции 4

1.Организация контроля процессов термической обработки.

2.Выбор объекта, средств и объема контроля в зависимости от устойчивости технологического процесса термообработки и назначения изделия.

3.Возможности управления качеством за счет контроля процесса и продукции.

Категории контроля

Категория	Сплошной	Выборочный	Непрерывный	Периодический	Летучий
1	А	Г	Б	А	Г
2	Б	А	В	А	В
3	В	А	В	Б	Б
4	Г	А	Г	Б	А

А – вид контроля используется всегда, объем составляет от 50 до 100%;

Б – вид контроля используется часто, объем – от 10 до 50%;

В – вид контроля используется редко, объем - от 10 до 50%;

Г – вид контроля практически не используется, объем - менее 1% объектов контроля.

Показатели процесса контроля

- Точность измерений;
- Достоверность показаний;
- Трудоемкость проведения;
- Стоимость процесса.

Дефекты, возникающие при отжиге

Характеристика дефекта	Сталь	Последствия дефекта	Метод устранения
1. Высокий уровень остаточных напряжений	Любая	Опасность образования трещин при работе	Отжиг для снятия напряжений
2. Неоднородный рост зерна (разнозернистость)	Сталь 10	При холодной деформации поверхностные дефекты и трещины	Рекристаллизационный отжиг или нормализация
3. Феррит по границам зерен или в виде видманштетта	Сталь 45	Пониженная ударная вязкость, опасность хрупкого разрушения	Соблюдение режима нормализации,проведение повторной обработки
4. Повышенное содержание грубого перлита вместо зернистого	Сталь 60	Опасность образования трещин при работе пружины	Сфероидизирующий отжиг с оптимальными параметрами

Дефекты закалки и улучшения

Характеристика дефекта	Сталь	Последствия дефекта	Метод устранения
1.Смешанная структура мартенсита и троостита	У8	Пониженная износостойкость	Закалка с более интенсивным охлаждением
2.Крупные карбидные частицы	40ХС	Пониженный предел прочности	Повторная закалка с отпуском по оптимальным параметрам
3.Неполная закалка с сильным карбидообразованием при отпуске	50ХН	Разрушение боковых поверхностей зубьев шестерен	Изменить марку стали на сталь 45 и провести закалку т.в.ч. с низким отпуском

Дефекты при химико-термической обработке

Характеристика дефекта	Сталь	Последствия дефекта	Метод устранения
1.Пониженная глубина насыщения	18ХГТ 20ХН3А	Продавливание слоя при работе	Повторная ХТО с уменьшенным временем
2.Повышенная глубина при насыщении	То же	Повышенная хрупкость слоя	Если возможно, легкое шлифование, если нет –брак
3.Образование карбидной сетки	То же	То же	Выполнять ХТО с соблюдением параметров

Блок-Схема анализа причин брака

Брак

Результаты осмотра	
1	Описание вида брака
2	Документация на бракованное изделие
3	Анализ появления брака (субъективная и объективная информация)
4	Контроль ритма работы и работы установки, отдельных деталей и узлов
5	Исключение причин или сужение области возможных причин

Начало поверочных испытаний

Выявлены ли причины брака?

Заключение
Отчет
Статистическ ий анализ

Конец

Продолжение

Установление перечня исследований, необходимых для ликвидации брака деталей
Описание термообработанной детали

Результаты осмотра 2	
1	Документацию (макроснимки) взять из результатов осмотра I
2	Просмотр предписаний по снижению брака
3	Анализ проведенной термообработки (субъективная и объективная информация)
4	Технологические основы данной термообработки
5	Собственный опыт и опыт других заводов, касающийся возможных причин брака

Выявлены ли причины брака?

Заключение
Отчет
Статистический анализ

Конец

Продолжение

Проведение проверочных исследований	
1	Определение требуемых величин
2	Неразрушающий контроль
3	Качественный контроль состава материала
4	Исследование структуры с помощью оптического микроскопа

Выявлены ли причины брака

Заключение
Отчет
Статистический анализ

Конец

Продолжение

Продолжение исследований с большими затратами	
1	Количественный химический анализ
2	Определение механических свойств в различных местах по поперечному сечению
3	Электронномикроскопические исследования
4	Рентгенографические исследования
5	Количественный металлографический анализ

Оценка результатов исследований и заключений	
1	Оценка данной термообработки в сравнении с предписаниями технологии
2	Выводы о влиянии состояния технологии на свойства детали
3	Описание дефектов термообработки с указанием их причин и способов устранения
4	Соотношение между состояниями данной термообработки и возникновением брака

Отчет по исследованию

Статистический анализ образования дефектов или брака

Введение производственных мероприятий для предотвращения брака

Конец

РАЗДЕЛ 2.
ТЕХНОЛОГИЯ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ

Лекция 5 Технологические задачи и характеристика предварительной термической обработки

План лекции 5

1. Технологические задачи и характеристика предварительной термической обработки.

2. Виды отжига: полный, неполный, диффузионный, рекристаллизационный, сфероидизирующий, низкий, нормализационный.

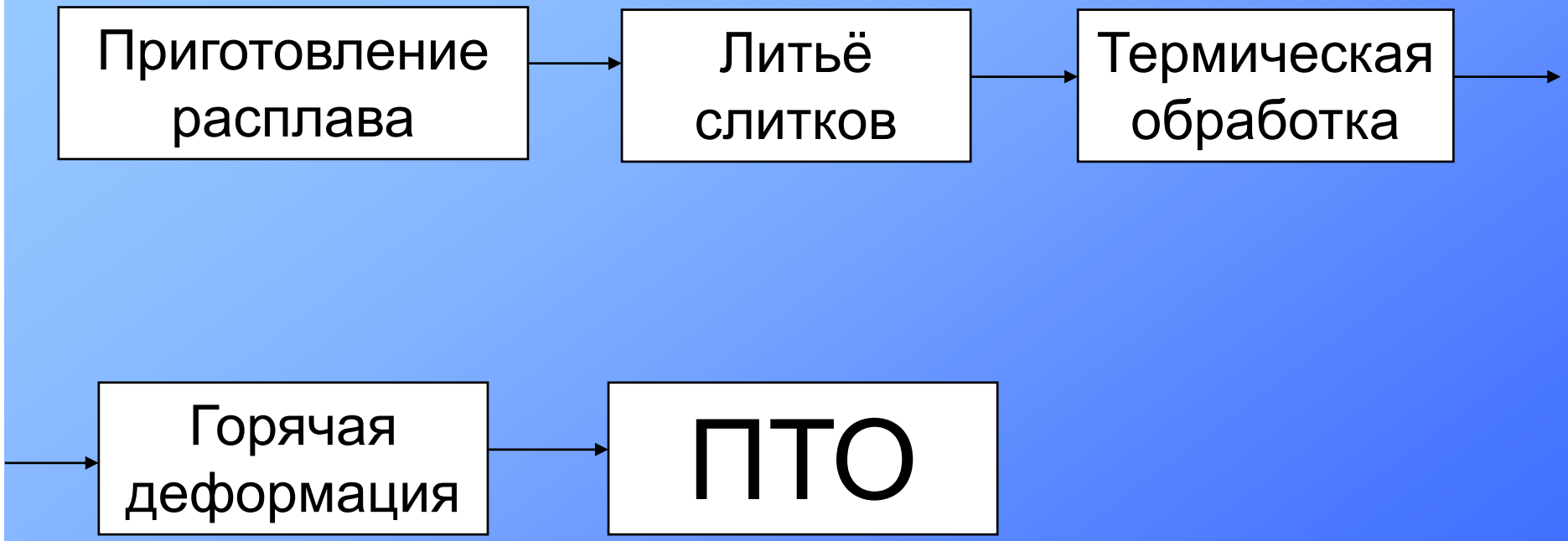
Технологические задачи предварительной термической обработки (ПТО)

- Улучшение технологичности при производстве деталей обработкой резанием.
- Повышение точности геометрии изделий при окончательной термической обработке (ОТО). Ускорение процессов диффузии при ОТО.
- Улучшение свойств готовых деталей путем воздействия на микроструктуру.

Производственный цикл получения заготовок и полуфабрикатов

- Приготовление расплава; литье слитков; термическая обработка слитков, которая может отсутствовать; горячая деформация; ПТО.
- Приготовление расплава; литье отливок; обработка отливок; ПТО.

Производственный цикл получения заготовок



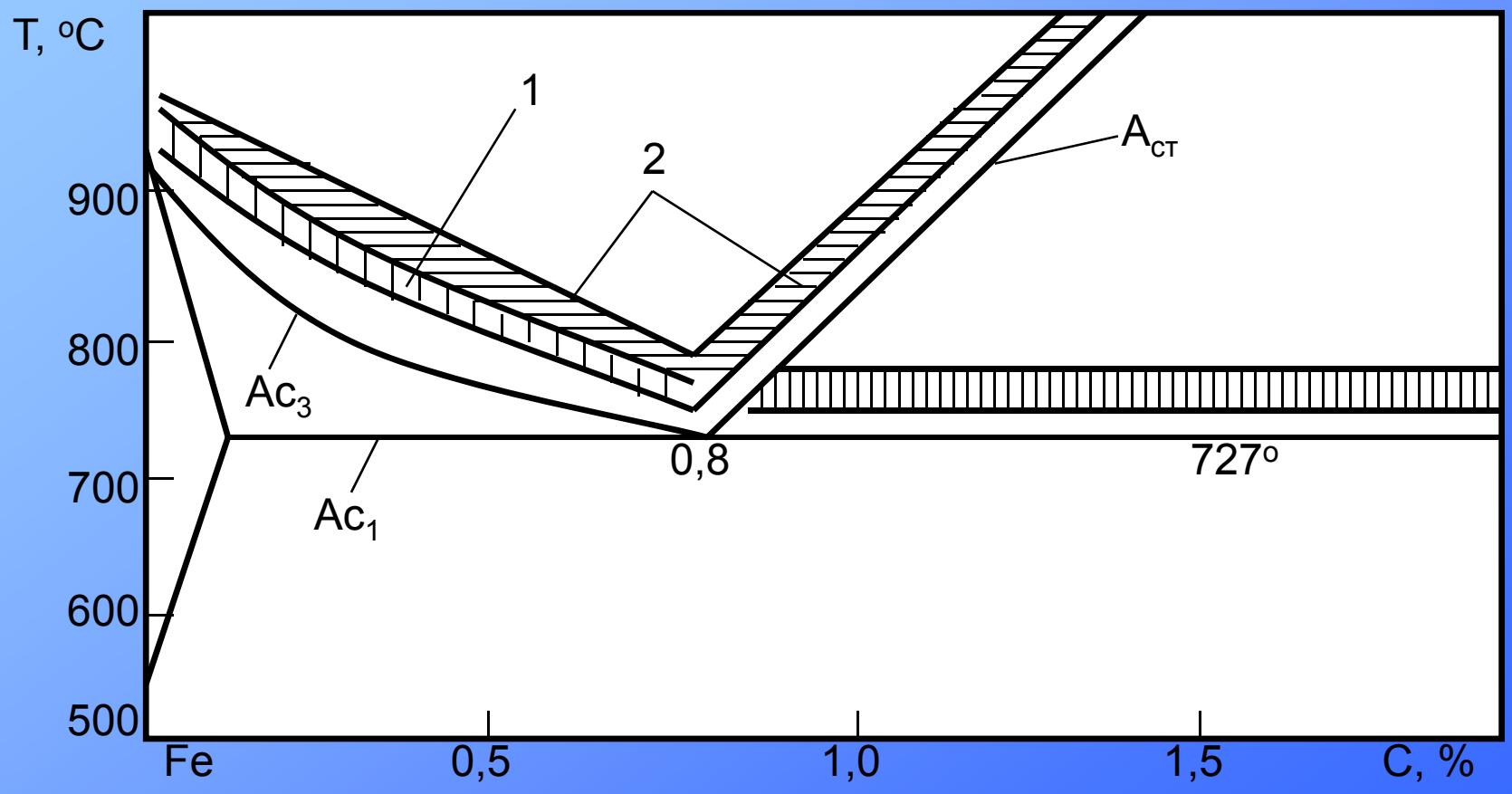
Производственный цикл получения заготовок

Приготовление расплава → Литьё отливок → Обработка отливок → ОТО

Производственный цикл получения отливок

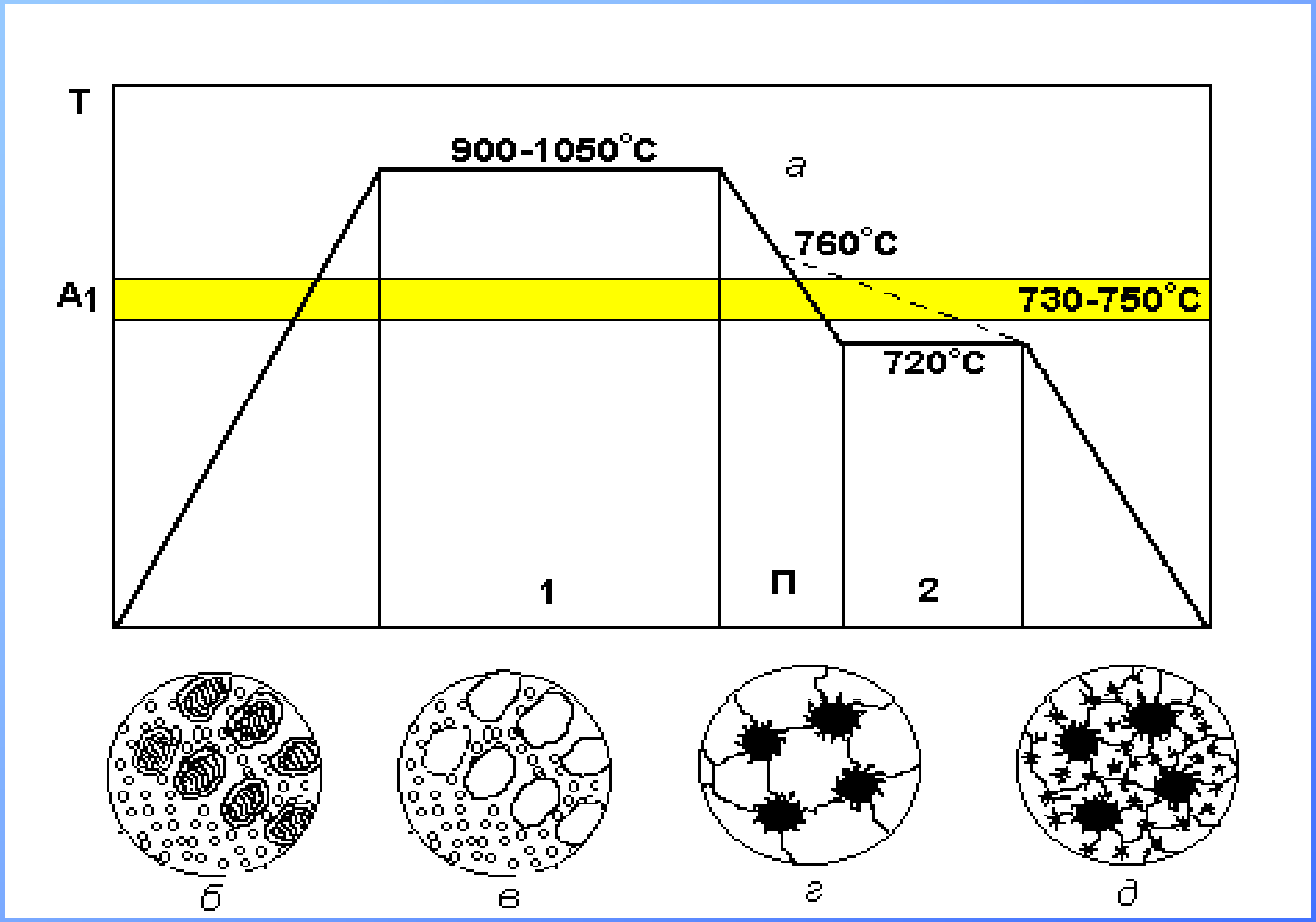
- Приготовление расплава
- литье отливок
- обработка отливок
- ПТО

Интервал температуры нагрева углеродистых сталей



1 - полный отжиг 2 - нормализация

Отжиг белого чугуна на ковкий



а - схема отжига

б - исходная структура доэвтектического белого чугуна;

в - структура при температуре (900 - 1050 ˚С)

г - структура при температуре 900 - 1050 ˚С;

д - конечная структура

Лекция 6

Технология закалки сталей

План лекции

1. Закалка стали.
2. Способы нагрева и охлаждения.
3. Закалочные среды: вода, масло, растворы, гетерофазные среды.
4. Выбор и технологические расчеты охлаждения по данным о прокаливаемости сталей.

Критическая скорость закалки ($V_{КР}$)

для термокинетических С -кривых

$$V_{КР} = Ar1 - t_{min} / \tau_{min}, [°C/c]$$

для изотермических С -кривых;

$$V_{КР} = A_{r1} - tmin / 1,5 \cdot \tau min [°C/c] -$$

где Ar1 - температура критической точки стали А1, °С;

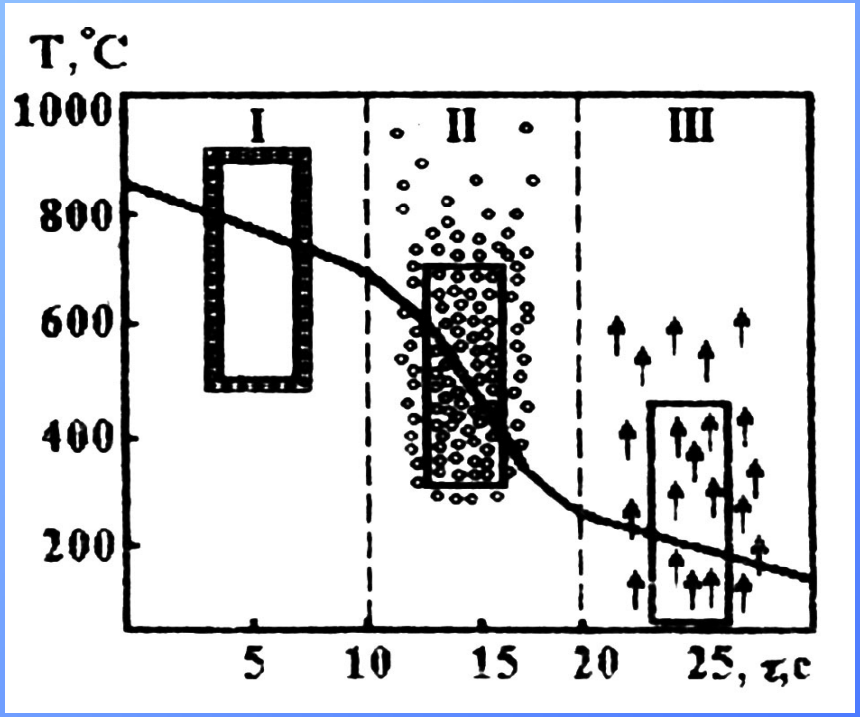
tmin – температура минимальной устойчивости переохлажденного аустенита °С;

tmin – время минимальной устойчивости переохлажденного аустенита, с.

Требования в закалочным средам

- Охлаждать со скоростью выше критической;
- Стабильность свойств при работе в требуемом интервале температур и при хранении;
- Инертность – отсутствие или весьма малое химическое взаимодействие с поверхностью охлаждаемых изделий;
- Легкая удаляемость с поверхности изделий при промывке или очистке;
- Небольшая вязкость, которая не затрудняет перекачку среды насосами от мест хранения к охлаждающим устройствам;
- Безвредность и безопасность при работе, недефицитность, невысокая стоимость.

Фазы теплового обмена в жидких закаливающих средах

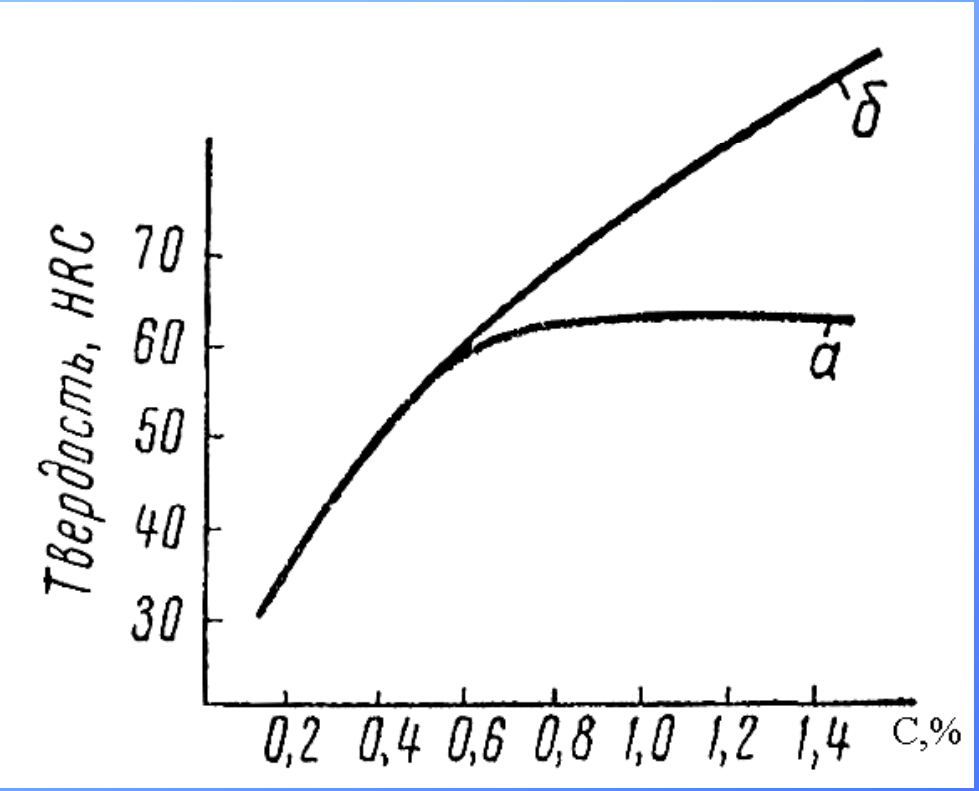


1 – пленочного кипения – «паровая рубашка»;

2 – пузырчатого кипения;

3 – конвективного теплообмена

Твердость стали в зависимости от содержания углерода и температура нагрева под закалку



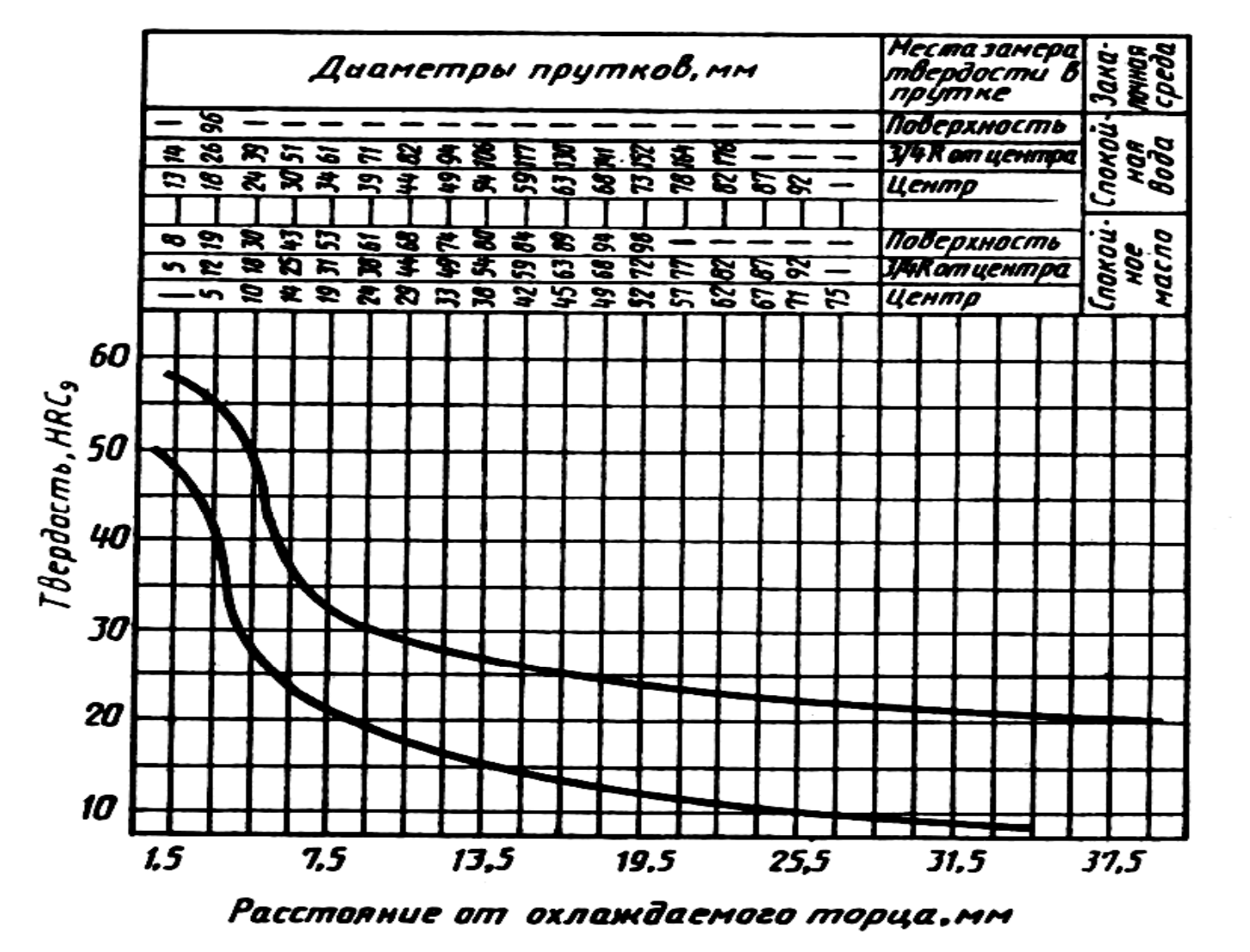
а – нагрев выше критической точки Ас1;

б – нагрев до аустенитного состояния

Влияние углерода на твердость полумартенситной зоны

Содержание углерода, %	Твердость,HRC
0,18-0,22	25
0,23-0,27	30
0,28-0,32	35
0,33-0,42	40
0,43-0,52	45
0,53-0,62	50

Полоса прокаливаемости конструкционной углеродистой стали марки 45



Прокаливаемость стали 40, ГОСТ 1050-74

Количество мартенсита, %	Критический диаметр, мм	
	в воде	в масле
50	15-25	8-15
90	10-15	5-9,5

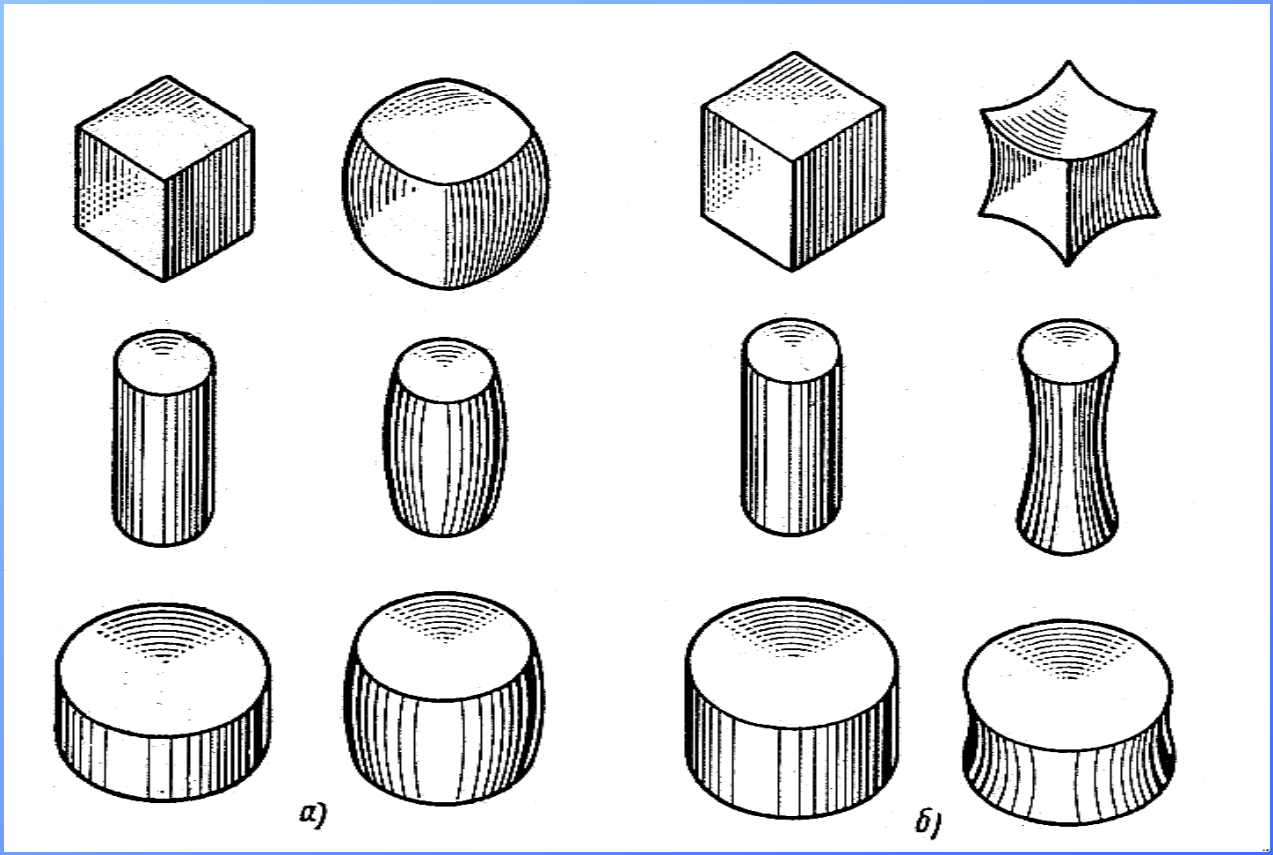
Закалка с температуры 850 ^{o}C

Лекция 7

План лекции

1. Термические и структурные напряжения, деформация и коробление изделий при термической обработке.
2. Закалочные трещины.
3. Методы борьбы с трещинами и деформациями: выбор состава стали, условий нагрева и охлаждения.

Деформация тел простой формы при нагреве и охлаждении под воздействием напряжений



а – термических; б – структурных

Категории устойчивости деталей к остаточным напряжениям

-Массивные (валы, оси, плиты, колеса) $l:d \leq 5$;

-Повышенной жесткости $l:d = 5\text{-}10$;

-Средней жесткости $l:d = 10\text{-}15$;

-Малой жесткости $l:d = 25\text{-}40$;

-Весьма малой жесткости $l:d > 40$,

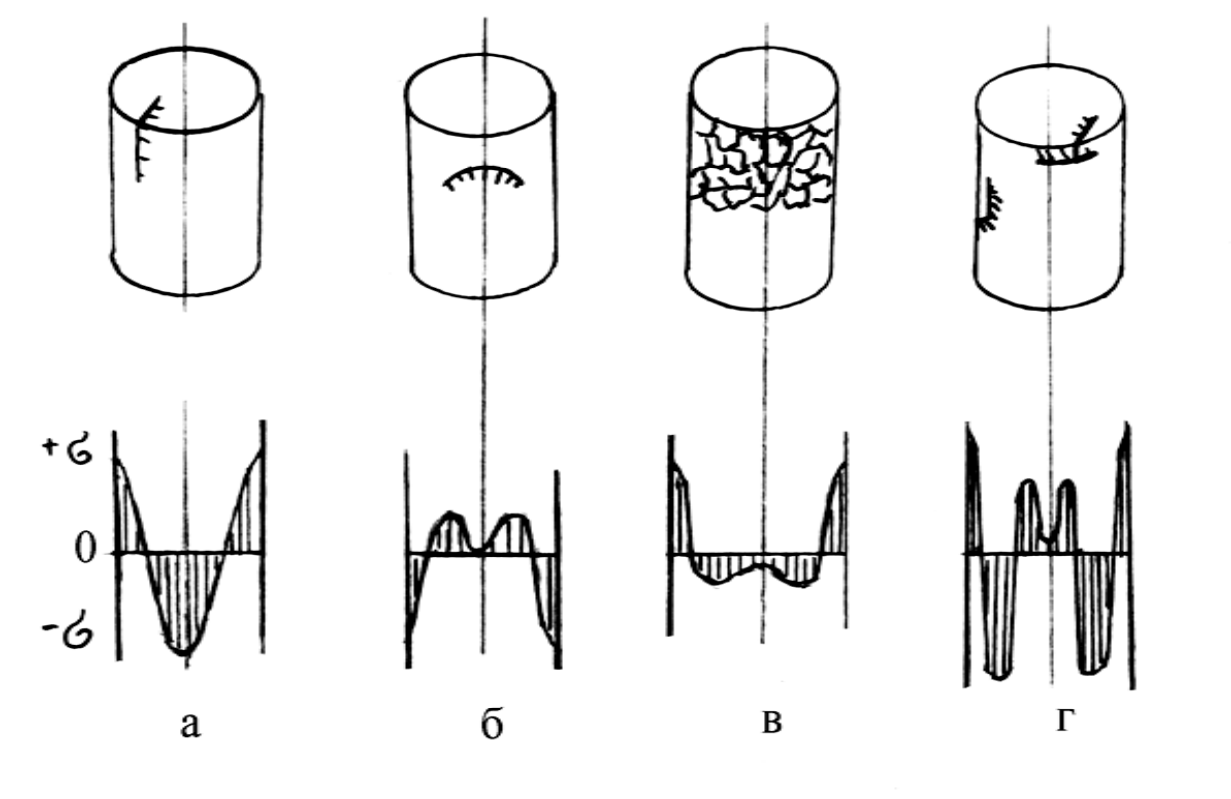
где l – наибольший размер изделия;

d – наименьший размер.

Категории технологической жесткости

Категория	Форма изделия	
	стержневая	плоскостная
Первая	$>0,2$	$>10^{-5}$
Вторая	$0,2 - 5\cdot10^{-3}$	$5\cdot10^{-6} – 10^{-7}$
Третья	$2\cdot10^{-3} - 2\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-8} - 2\cdot10^{-9}$
Четвертая	$<10^{-4}$	$<10^{-9}$

Классификация трещин



а – трещины глубокие; б – внутренние трещины;

в – поверхностные трещины в виде сплошной или разорванной сетки;

г – поверхностные трещины отслаивания;

+σ - напряжения растяжения;

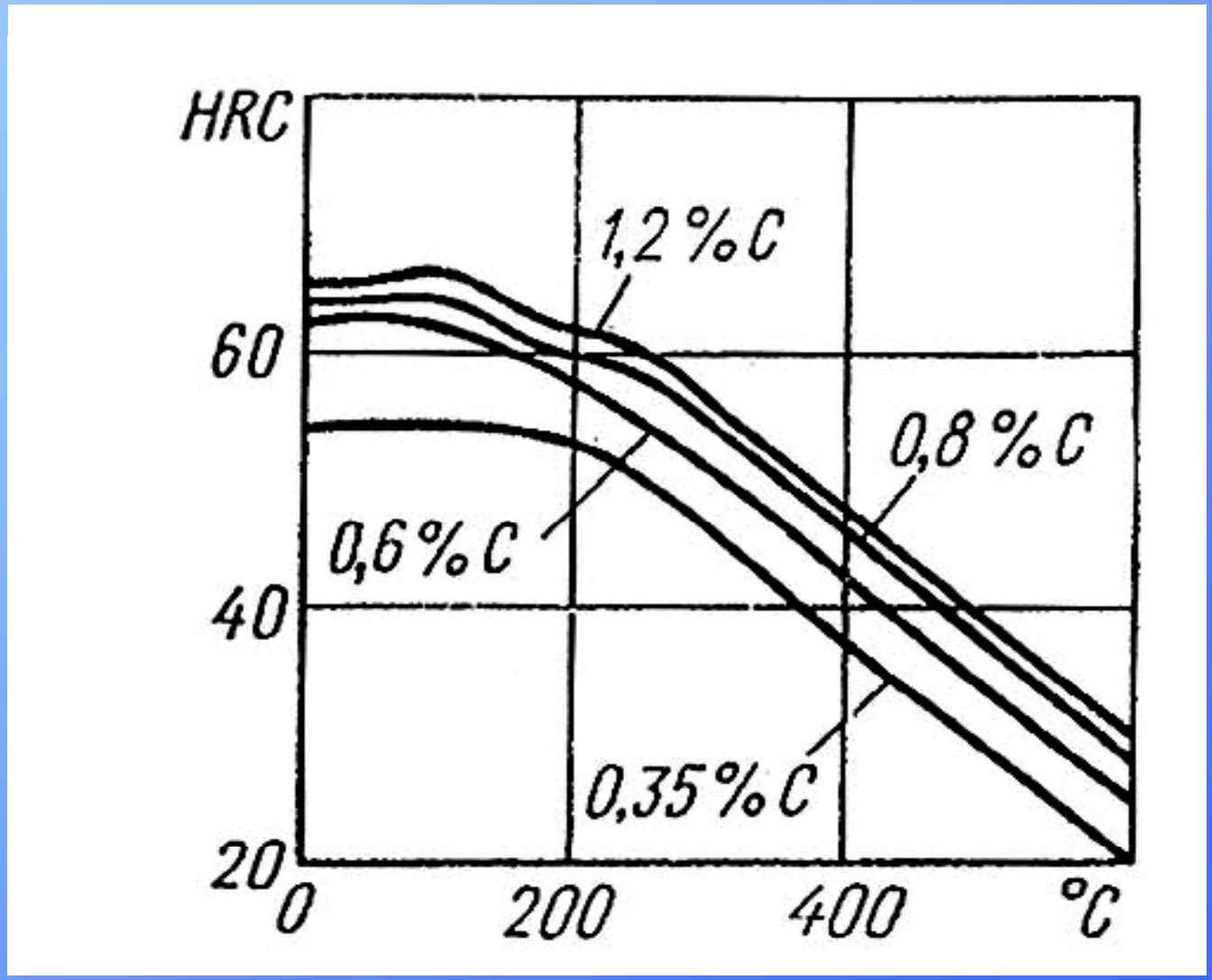
–σ - напряжения сжатия

Лекция 8 Отпуск и старение стали

План лекции

1. Отпуск стали.
2. Старение.
3. Отпуск под нагрузкой.
4. Отпуск после шлифования.
5. Правка. Эффект кинетической пластичности.
6. Термообработка после правки. Методы стабилизации размеров

Зависимость твердости углеродистых ста сталей от температуры отпуска



Понятие отпуска и старения

- Отпуском называется операция термической обработки, при которой в результате нагрева ниже критической точки А1 происходит переход структуры из метастабильного состояния в равновесное.
- Старение – это операция термической обработки, при которой в закаленном без полиморфного превращения в сплаве происходит распад пересыщенного твердого раствора.

Виды отпуска

- Низкий отпуск выполняется при температурах 80-250 °С
- Средний отпуск выполняется при температурах 320-450 °С
- Высокий отпуск проводится при температурах 450-700 °С

Виды старения

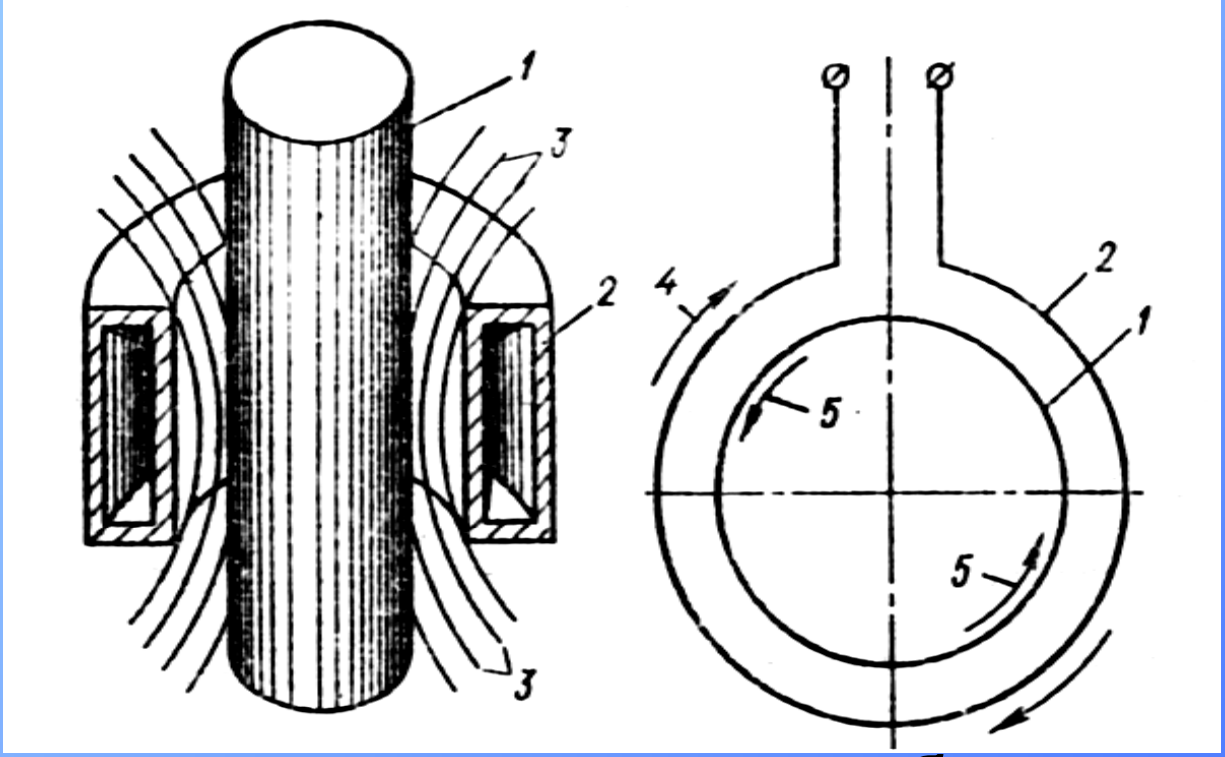
- термическое старение, протекающее в закаленном сплаве
- Деформационное старение, происходящее в изделиях после пластической деформации

Лекция 9 Поверхностное упрочнение термической обработкой

План лекции

1. Поверхностная термическая обработка.
2. Источники и способы нагрева.
3. Нагрев токами высокой частоты.

Схема индукционного нагрева



а **б**

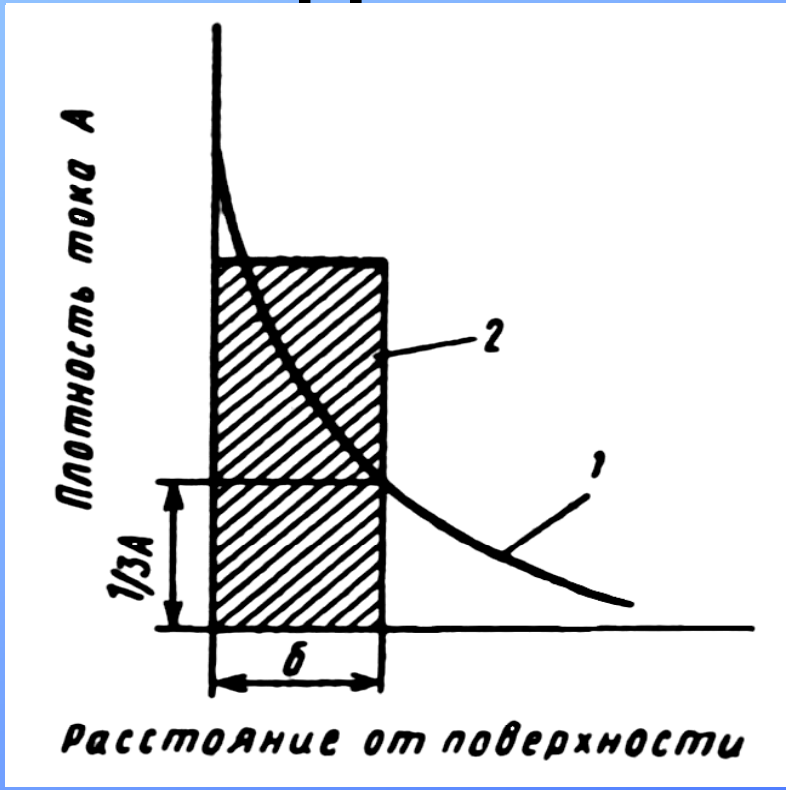
а – распределение магнитного потока в индукторе;

б – направление токов в индукторе и детали;

1 – нагреваемая деталь; 2 – виток индуктора;

3 – магнитные силовые линии; 4 – направление тока в индукторе; 5 – направление тока в детали

Распределение плотности переменного тока по нагреваемой детали



1 – действительное распределение;

2 – условное распределение; δ – глубина проникновения тока в деталь

Закон Джоуля-Ленца

$$Q = I^2 \cdot R \cdot т \quad [кДж],$$

где I - сила тока равна 5000-8000 А,

R – сопротивление материала нагреваемой детали, Ом,

т – время нагрева, с,

Q -количество тепла

Измерение глубины проникновения тока

$$\delta \approx 5030 \sqrt{\rho / \mu \cdot f} \quad [см]$$

где ρ – удельное электросопротивление материала детали, ом·см,

μ – относительная магнитная проницаемость,

f – частота тока

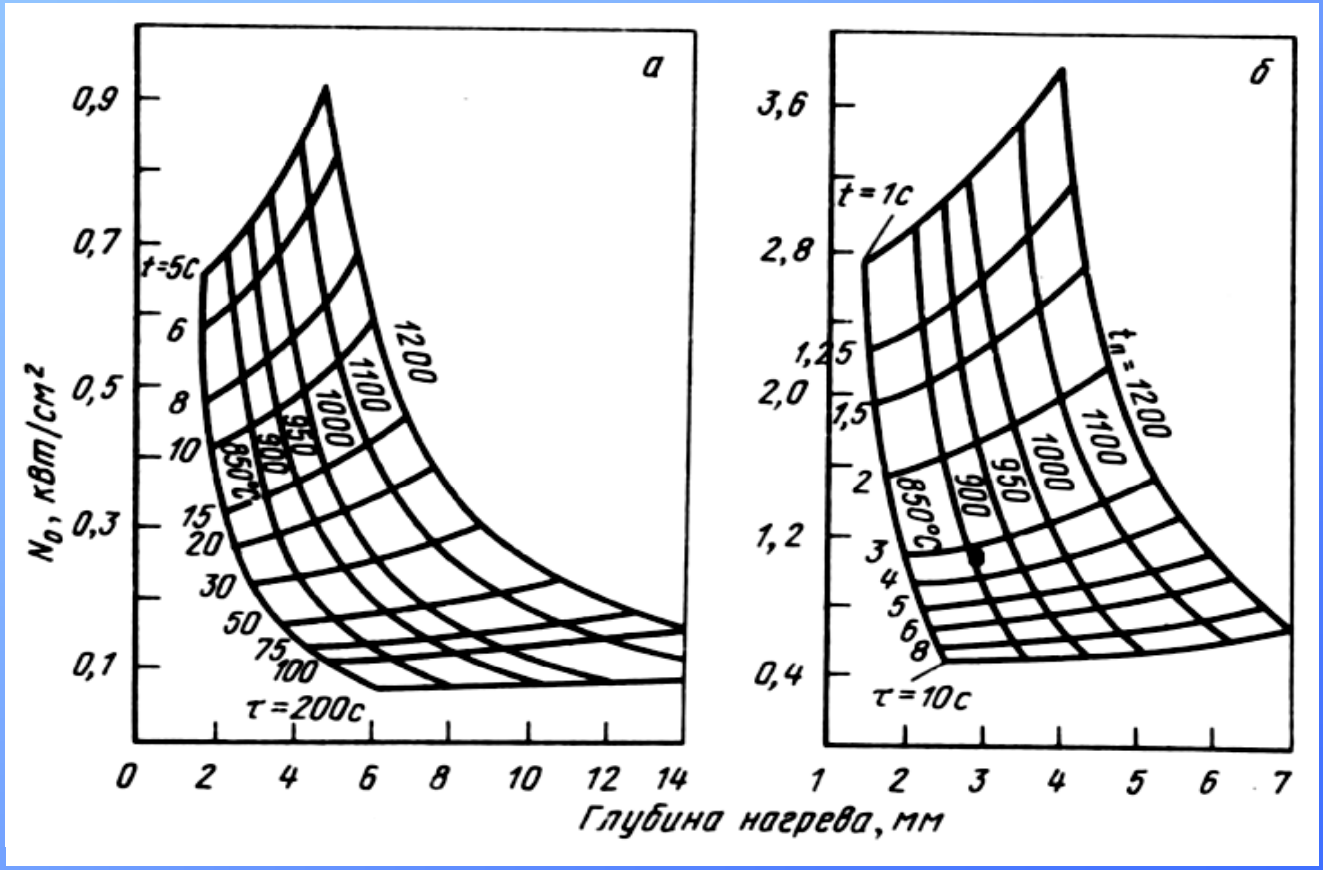
Влияние частоты тока на глубину слоя

Частота тока, Гц	Глубина слоя, мм
50	15-80
1 000	3-17
2 500	2 -11
4 000	1,5-9
8 000	1-6
10 000	0,9-5,5
70 00	0,3-2,5
400 000	0,2-1,0

Значения скорости нагрева и удельной мощности для различной глубины закаленного слоя

Глубина слоя, мм	Скорость нагрева, °С/с	Удельная мощность, кВт/см^2
1 – 2	100 -300	0,8 – 1,5
3 – 5	20 – 80	0,5 – 1,3
6 - 10	2 - 15	0,05 – 0,2

Графики ориентировочного выбора удельной мощности и времени нагрева



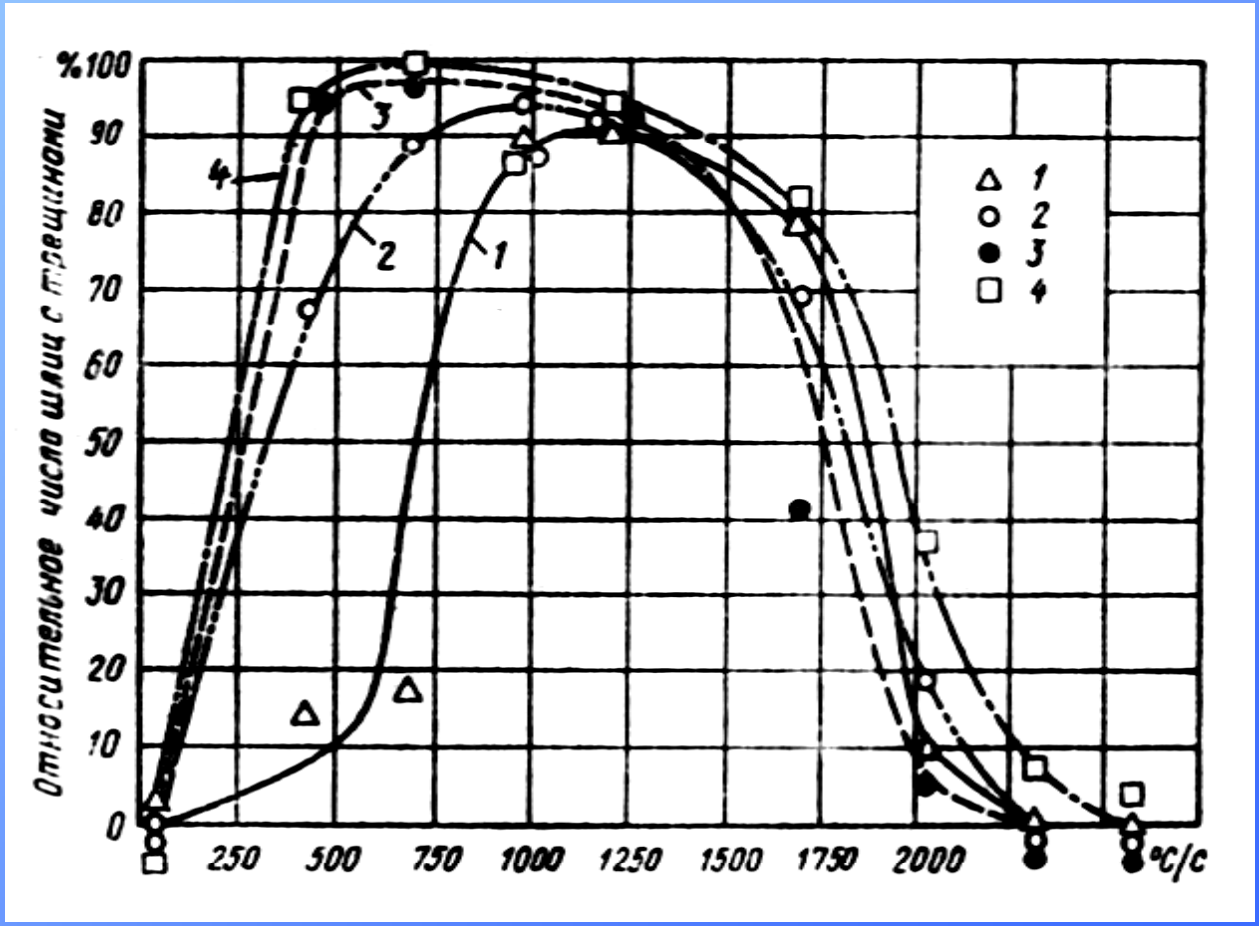
а – частота тока 10 кГц; б – частота тока 4 кГц

Лекция 10 . Особенности нагрева и охлаждения при обработке токами высокой частоты (ТВЧ)

План лекции

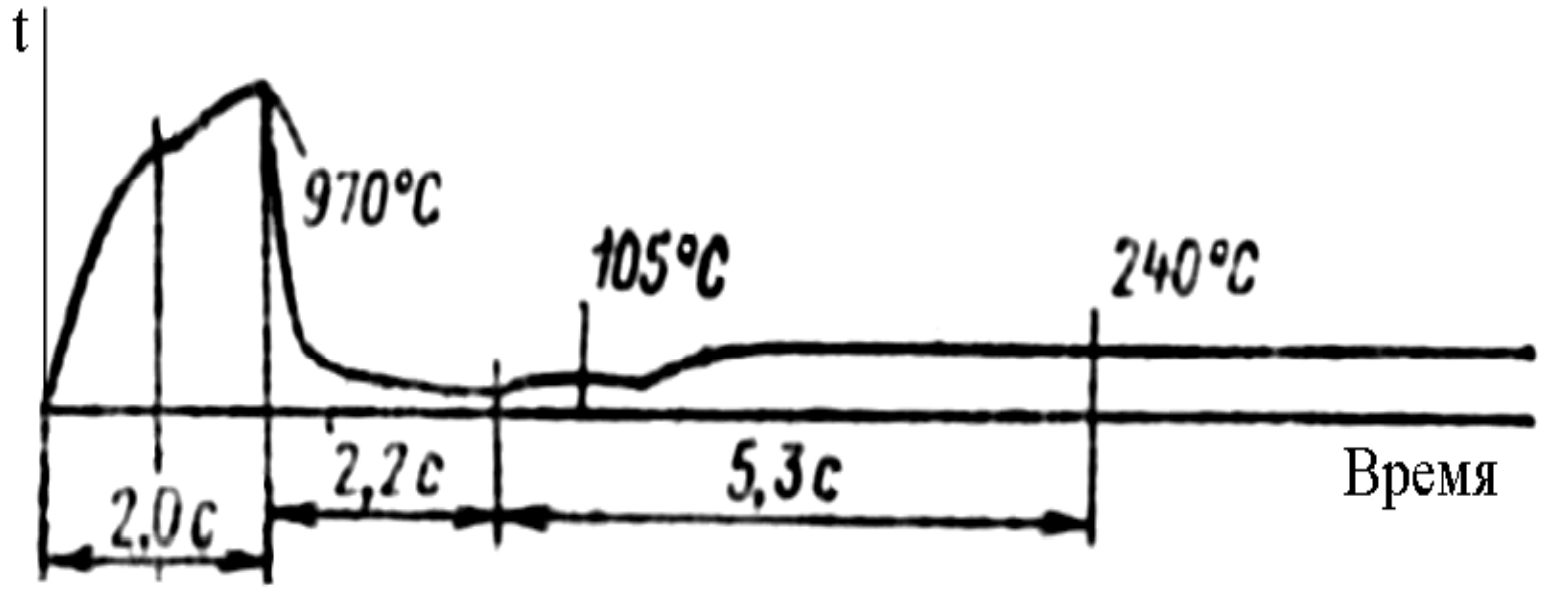
1. Особенности нагрева и охлаждения при обработке токами высокой частоты (ТВЧ).
2. Технология лазерной и электронно-лучевой обработки.

Зависимость относительного количества трещин от интенсивности охлаждения в интервале мартенситного превращения



1 – сталь45; 2 – 40Х; 3 – 40ХГРТ; 4 – 40ХНМА

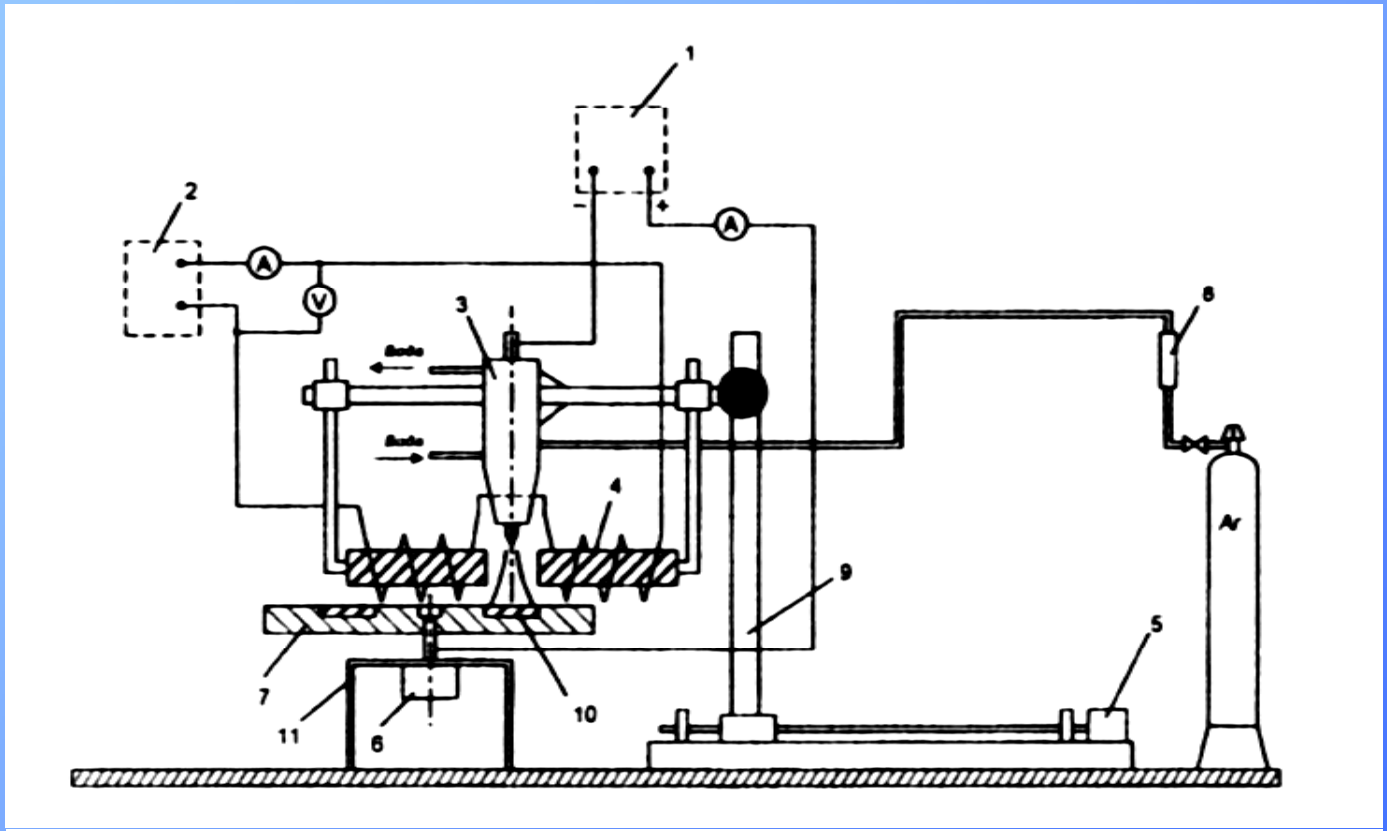
Осциллографическая запись процесса индукционной закалки с самоотпуском



Технико-экономические характеристики высококонцентрированных способов нагрева

Способ нагрева	Плотность мощности, Вт/см^2	К.п.д. источника, %	Глубина упрочненного слоя, мм	Микротвердость слоя, ГПа	Стоимость оборудования, тыс.руб
Т. в.ч.	10^3-10^4	90	1,0-10,0	~8	1 000-23 000
Лазерный	10^8-10^9	10	~0,7	~12	1 500-15 000
Электрон. луч	10^2-10^{10}	90	~0,5	~12,5	1 500-15 000
Электрич. дуга	10^4-10^5	75	~1,0	~9	1,5-90

Схема электродугового нагрева при закалке



1,2 – источник питания; 3 – сварочная горелка;
4 – сканирующая система; 5, 6 – электродвигатель;
7 – рабочий стол; 8 – ротаметр; 9 – манипулятор;
10 – нагреваемое изделие; 11 – защитный кожух

Лекция 11. Технология упрочнения поверхности изделий обработкой давлением

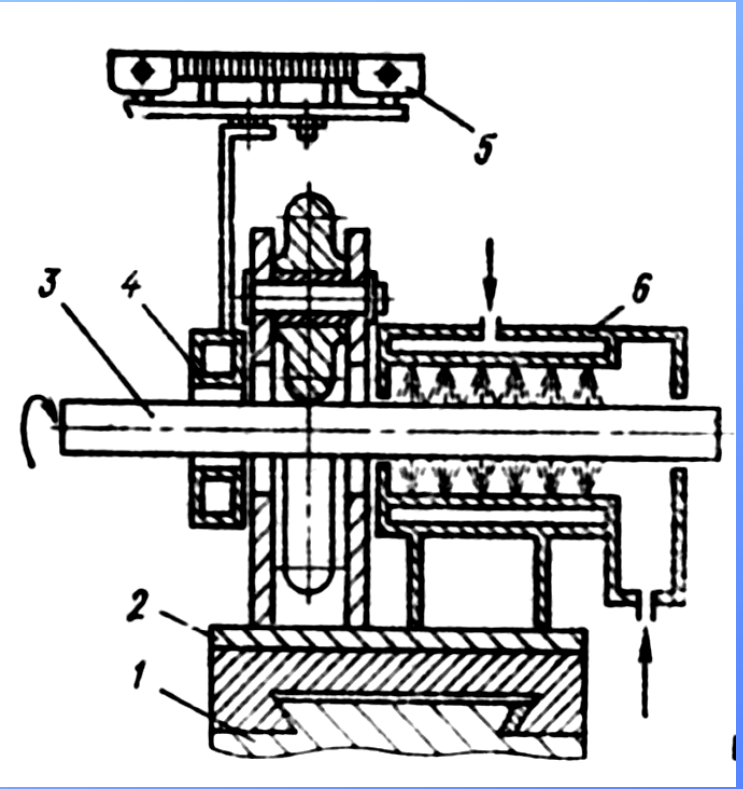
План лекции

1. Технология упрочнения поверхности изделий обработкой давлением.
2. Окисление и обезуглероживание стали при термической обработке.
3. Среды для нагрева.

Способы упрочнения поверхности обработкой давлением

- Высокотемпературная термомеханическая обработка поверхностных слоев (ВТМОП);
- ВТМОП + холодная деформация обкаткой;
- Холодная деформация + ВТМОП;
- Холодная деформация + ВТМОП + холодная деформация;
- Наклеп дробью

Схема устройства для непрерывно-последовательной ВТМОП



1 - основание; 2 – рабочий стол; 3 – нагреваемое изделие;
4 – индуктор; 5 – трансформатор;

6 – охлаждающее приспособление (спрейер);

7 – деформирующий ролик

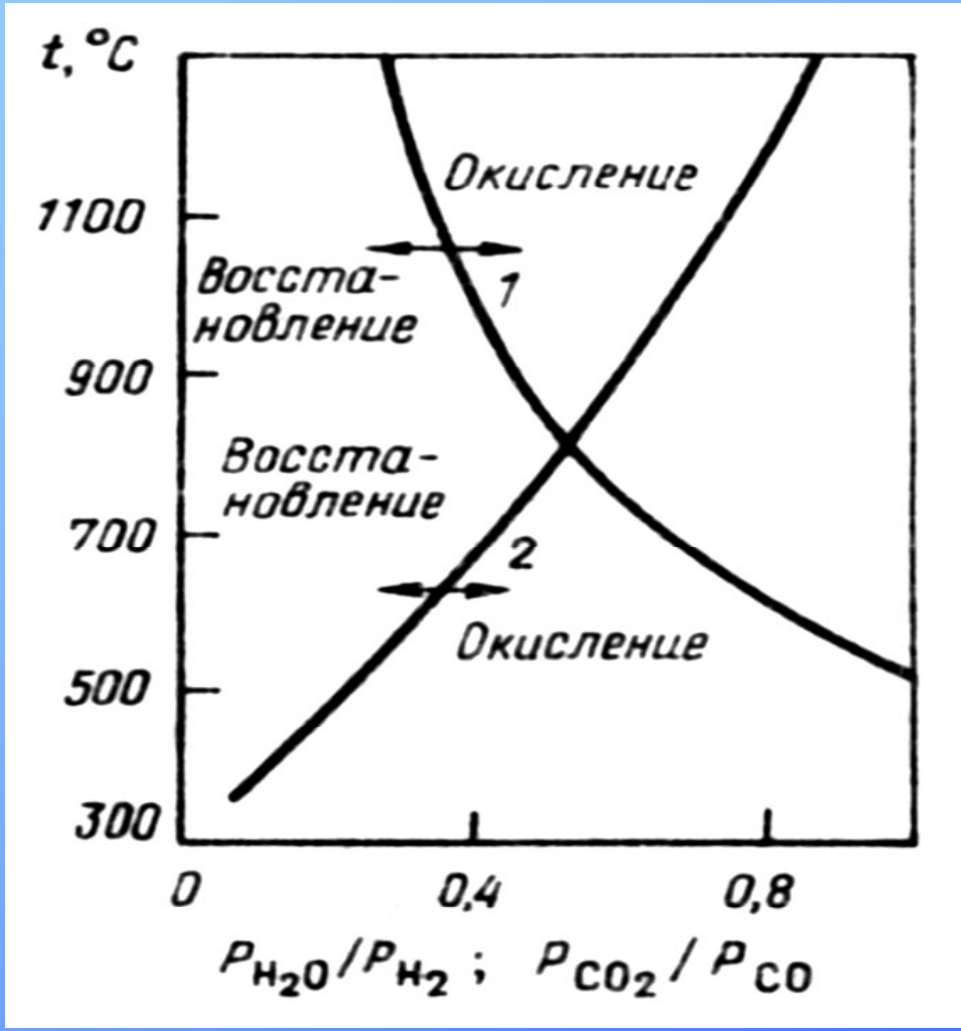
Технологические параметры при наклепе дробью

- Дробь стальная или чугунная диаметром 0,6-0,8 мм;
- Скорость потока дроби 40-80 м/с;
- Расход дроби 80-100 кг/мин;
- Время обработки 1-2 мин.

Среды используемые при термической обработке

- Обезуглероживающие, имеющие в составе O_2, CO_2, H_2O, H_2;
- Окисляющие, содержащие : O_2, CO_2, H_2O, SO_2;
- Восстанавливающие: H_2, CO, CH_4;
- Науглероживающие : CO, CH_4;
- Нейтральные : Ar, He, N_2, вакуум.

Кривые равновесия реакции



1 – $Fe + CO_2 \leftrightarrow FeO + CO$;

2 – $Fe + H_2O \leftrightarrow Fe\,O + H_2$

Лекция 12

План лекции

1. Технология цементации и нитроцементации с последующей термообработкой зубчатых колес.
2. Ионная цементация.
3. Технология газового азотирования (червячные пары, инструмент, детали станко- и энергомашиностроения).
4. Ионное азотирование.

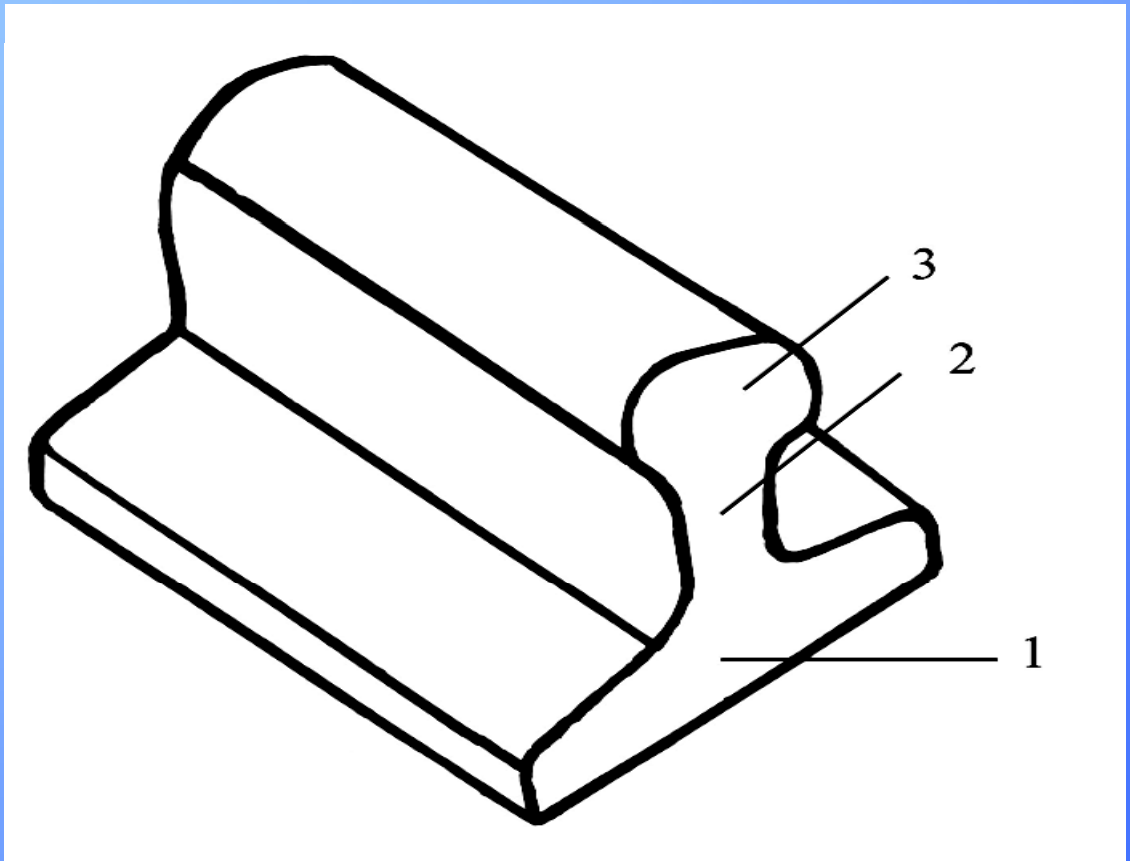
РАЗДЕЛ 3.

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Лекция 13

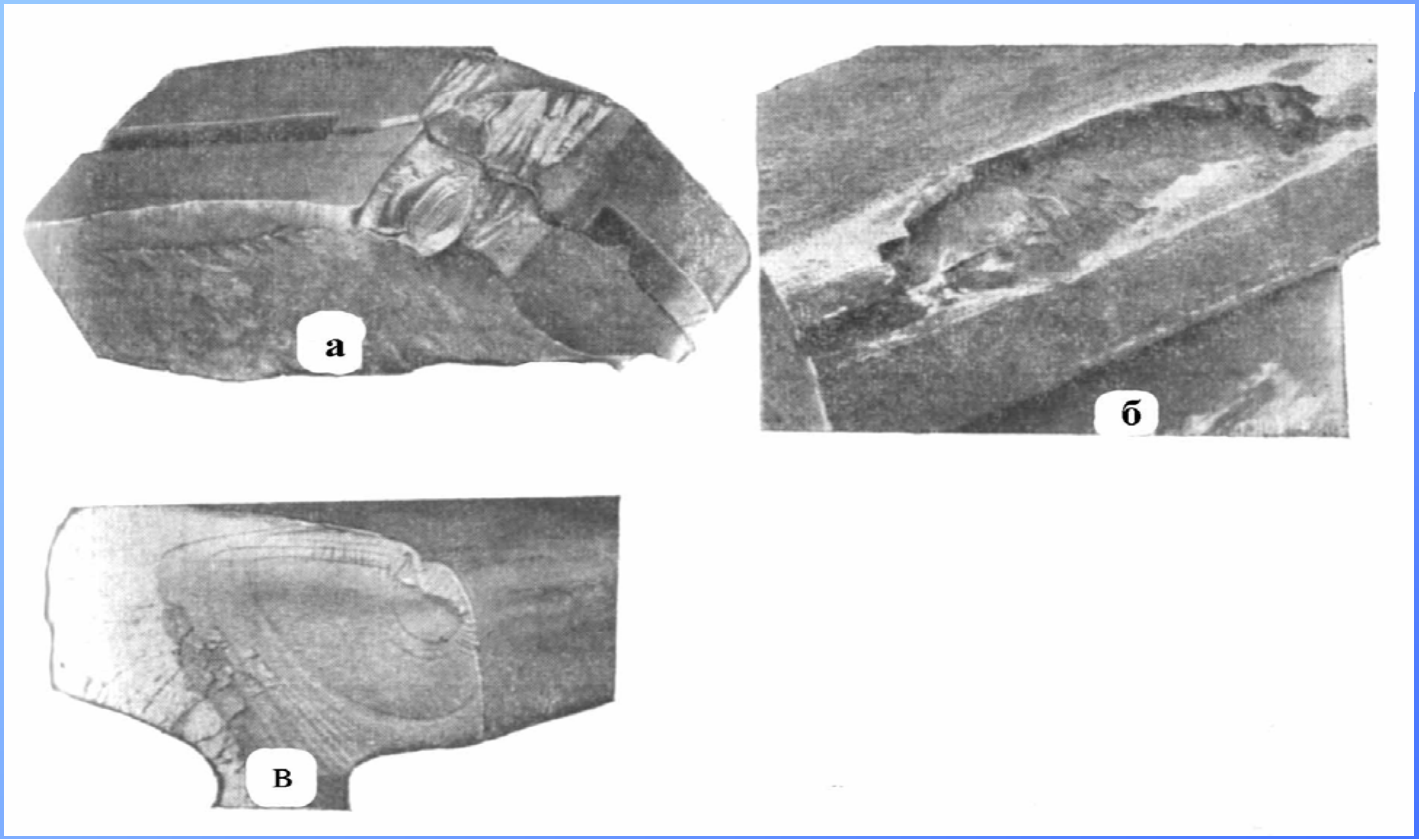
Технология предварительной термической обработки железнодорожных рельсов.

Элементы железнодорожного рельса



1 – подошва; 2 – шейка; 3 - головка

Контактно-усталостные повреждения рельсов



а – внутренняя продольная трещина в головке;

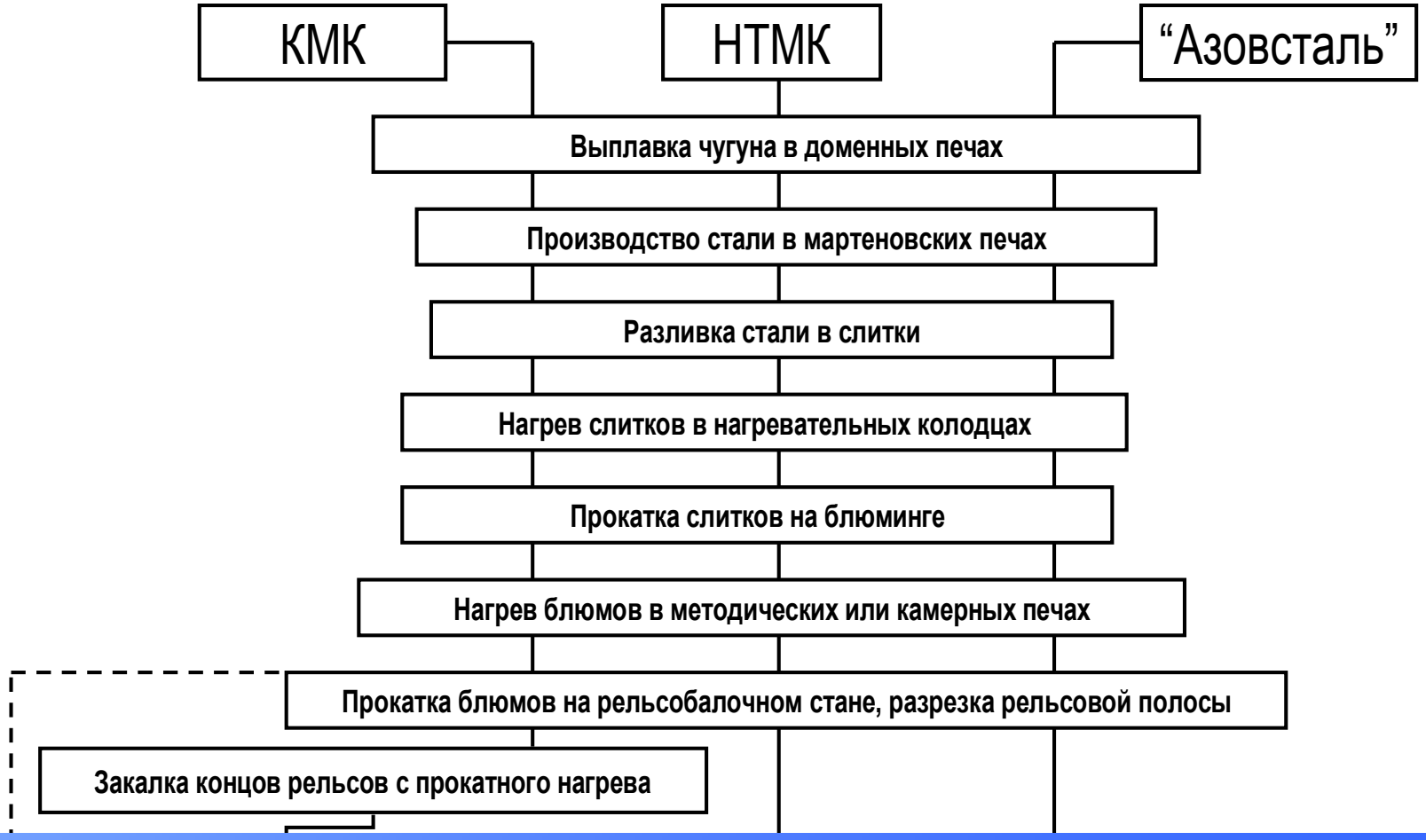
б – выщербина головки на поверхности катания;

в – поперечная усталостная трещина головки

Химический состав рельсовых сталей, % ГОСТ 24182-80

Тип рельсов	Марка стали	C	Mn	Si	не более		
					P	S	As
P75, P65	M76	0,71-0,82	0,75-1,05	0,18-0,40	0,035	0,045	0,15
P50	M74	0,69-0,80	0,75-1,05	0,18-0,40	0,035	0,045	0,15

Схемы технологических процессов производства железнодорожных рельсов на различных заводах



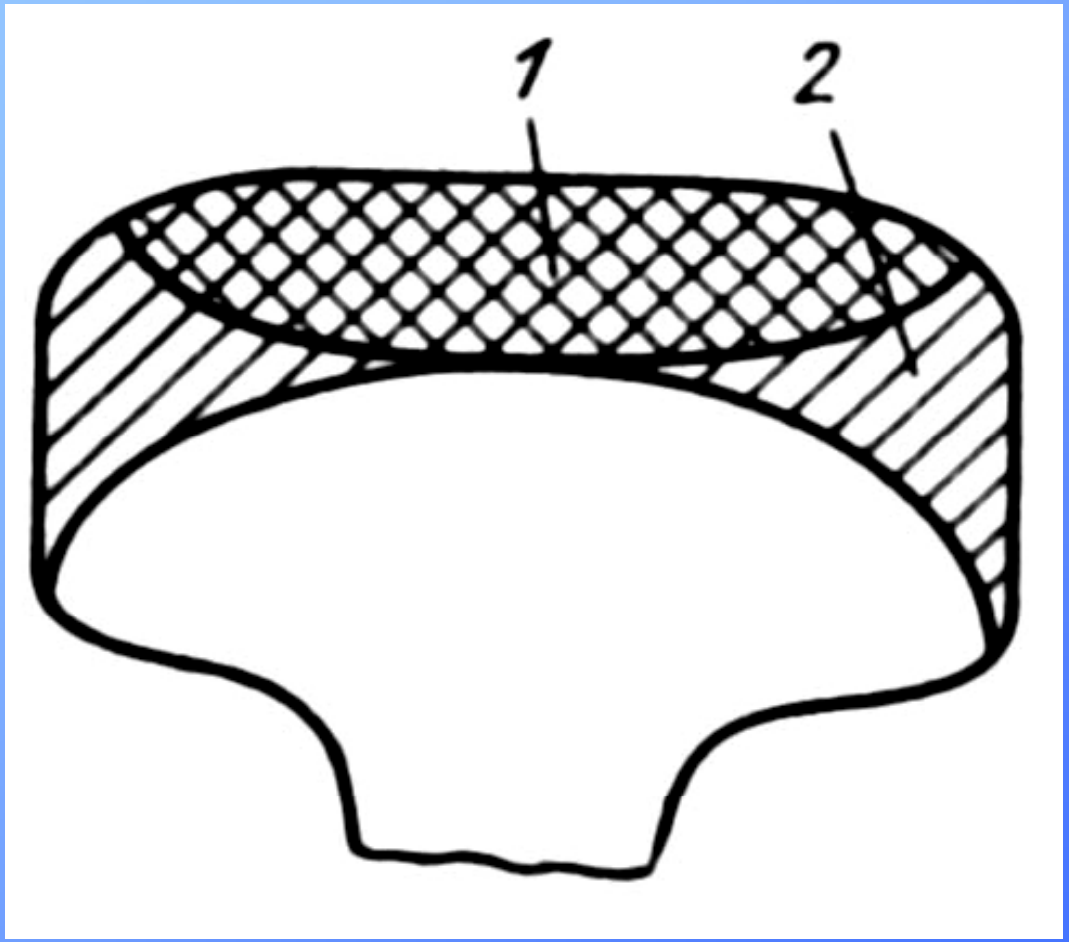
Продолжение

Лекция 14

План лекции

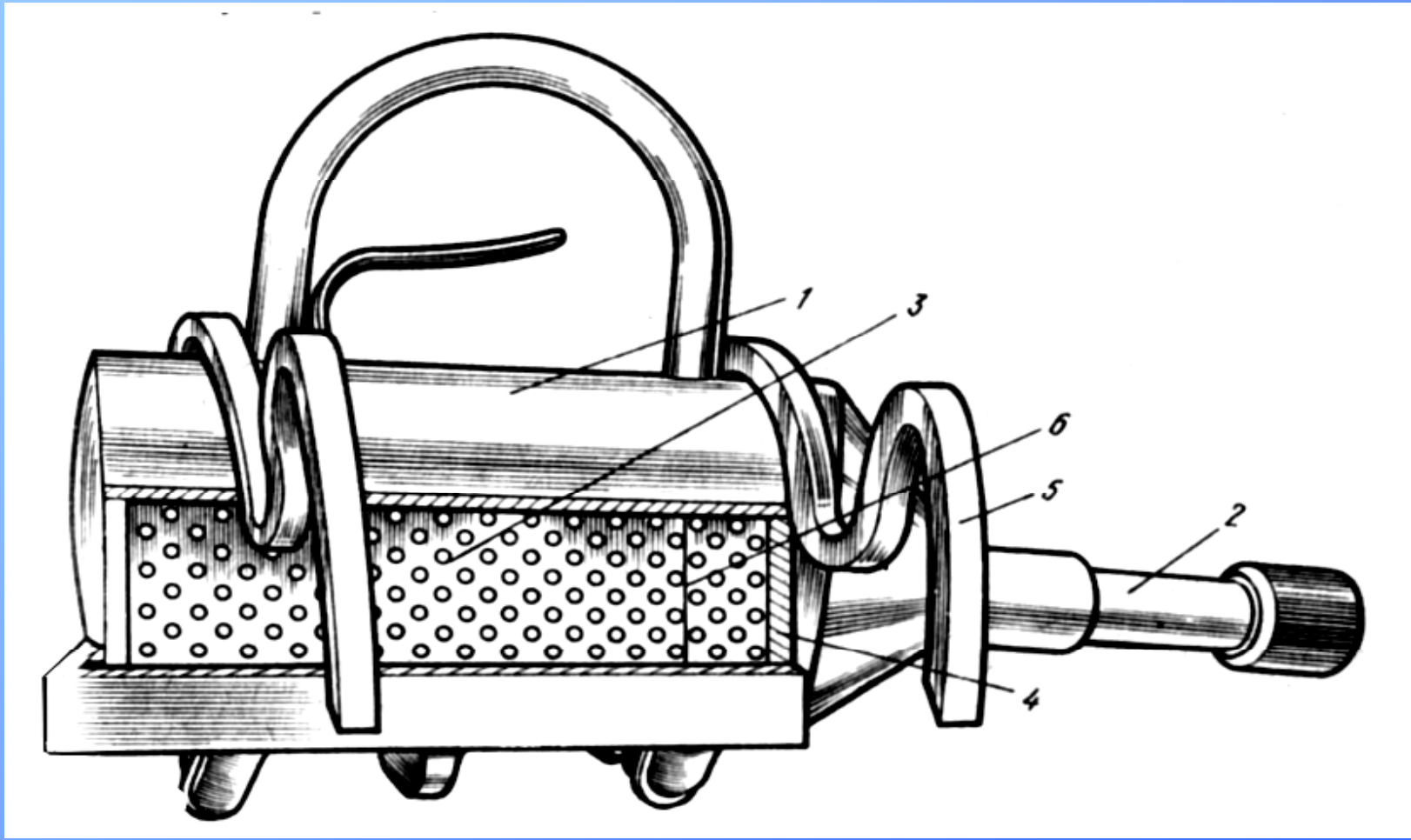
1. Технология окончательной термической обработки железнодорожных рельсов.
2. Противофлокеновая термическая обработка

Схема конфигурации закаленного слоя на концах рельсов

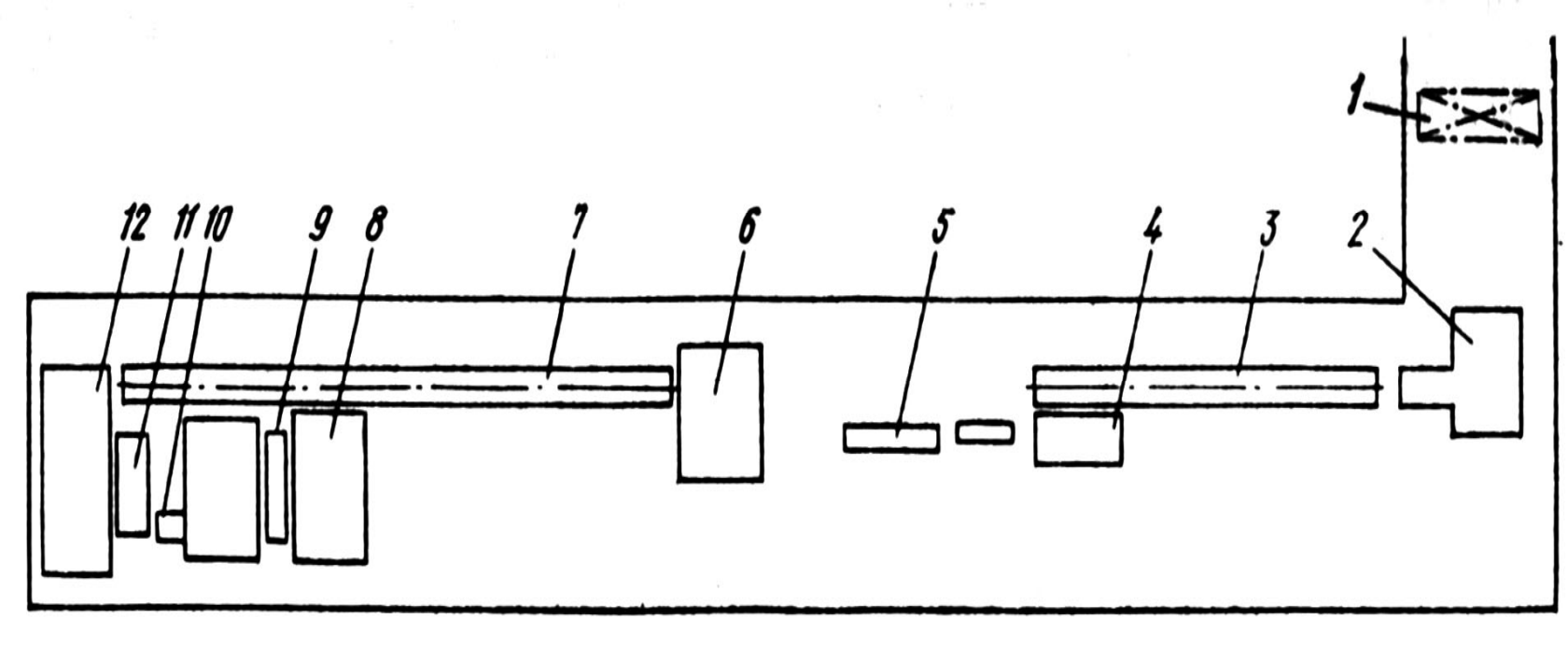


1 – правильная; 2 - неправильная

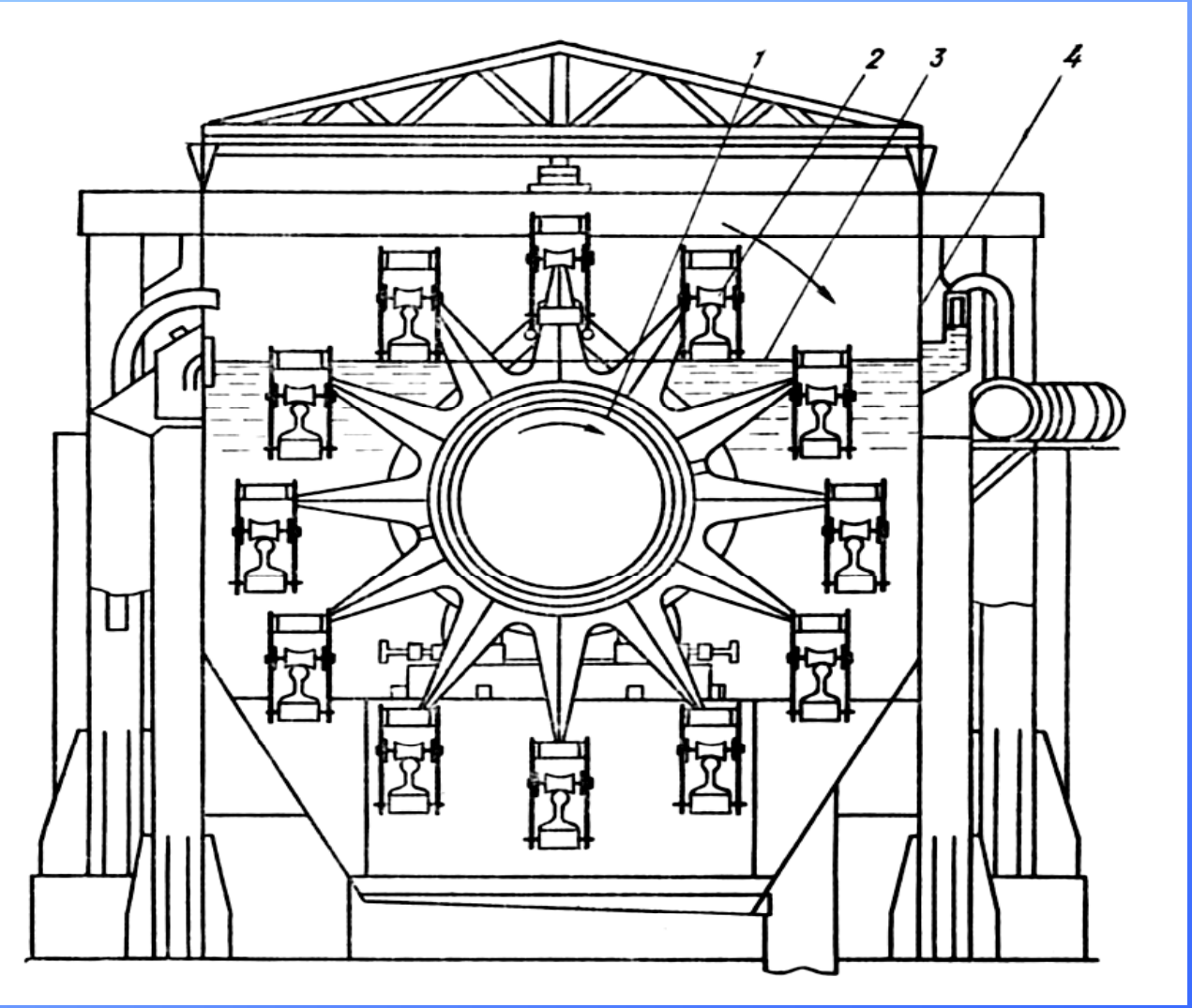
Струйный аппарат для закалки концов рельсов с прокатного нагрева



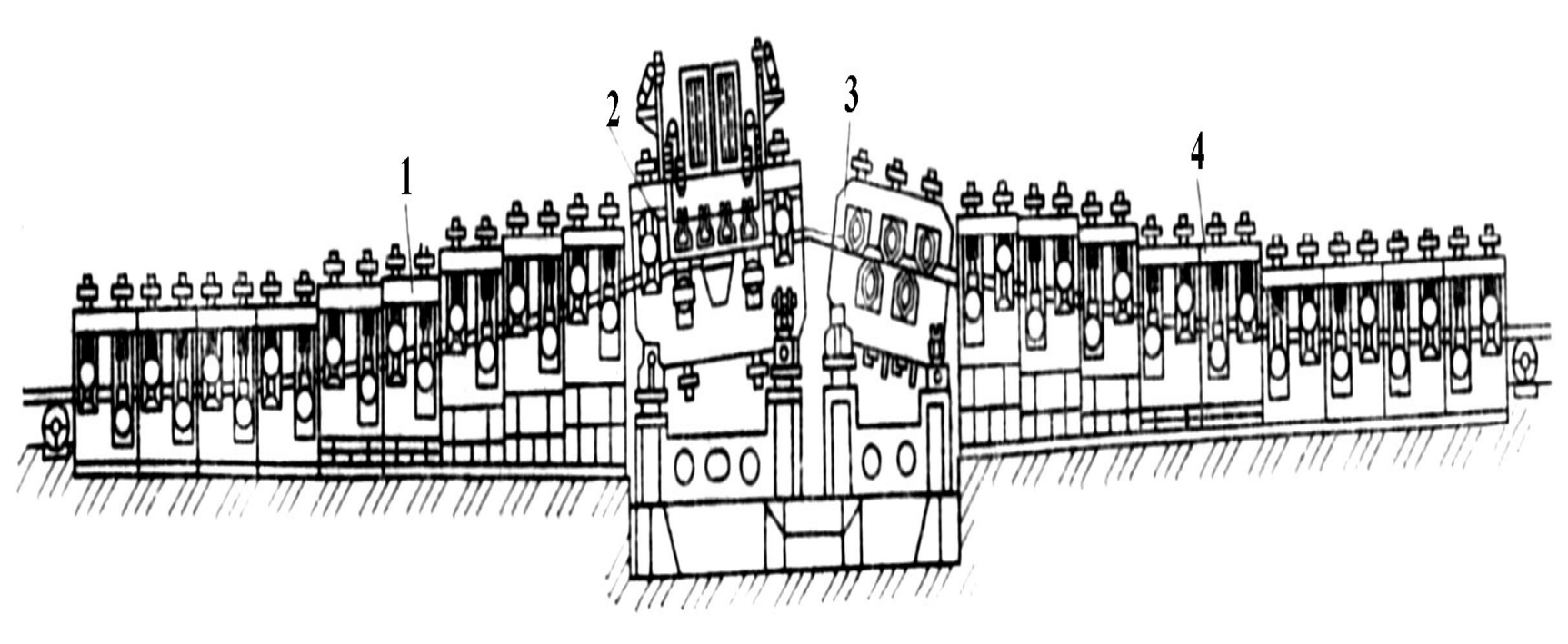
Расположение оборудования в термическом отделении рельсобалочного цеха



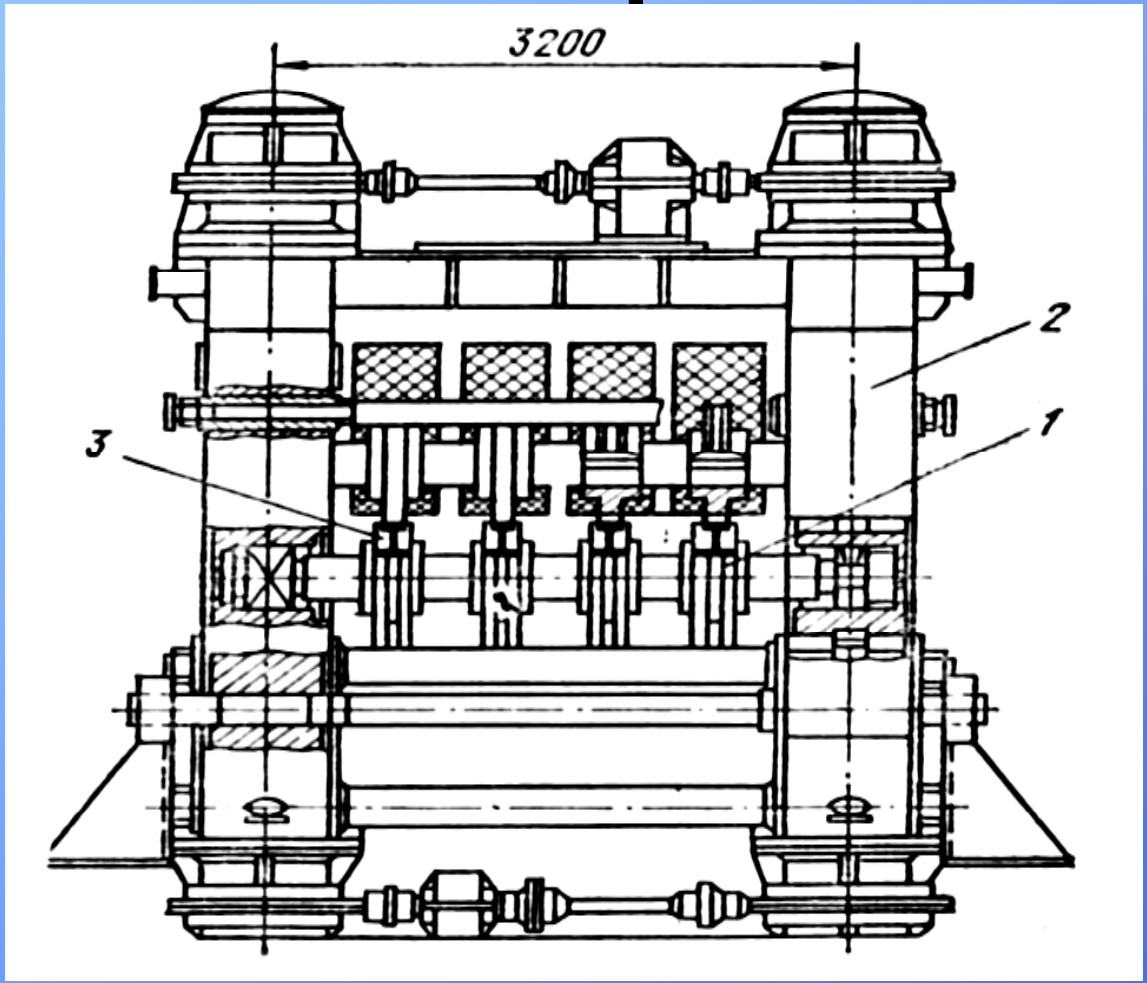
Поперечный разрез закалочной машины



Технологическая схема агрегата для термической обработки головки рельсов по всей длине



Поперечный разрез агрегата для закалки головки рельсов т.в.ч.

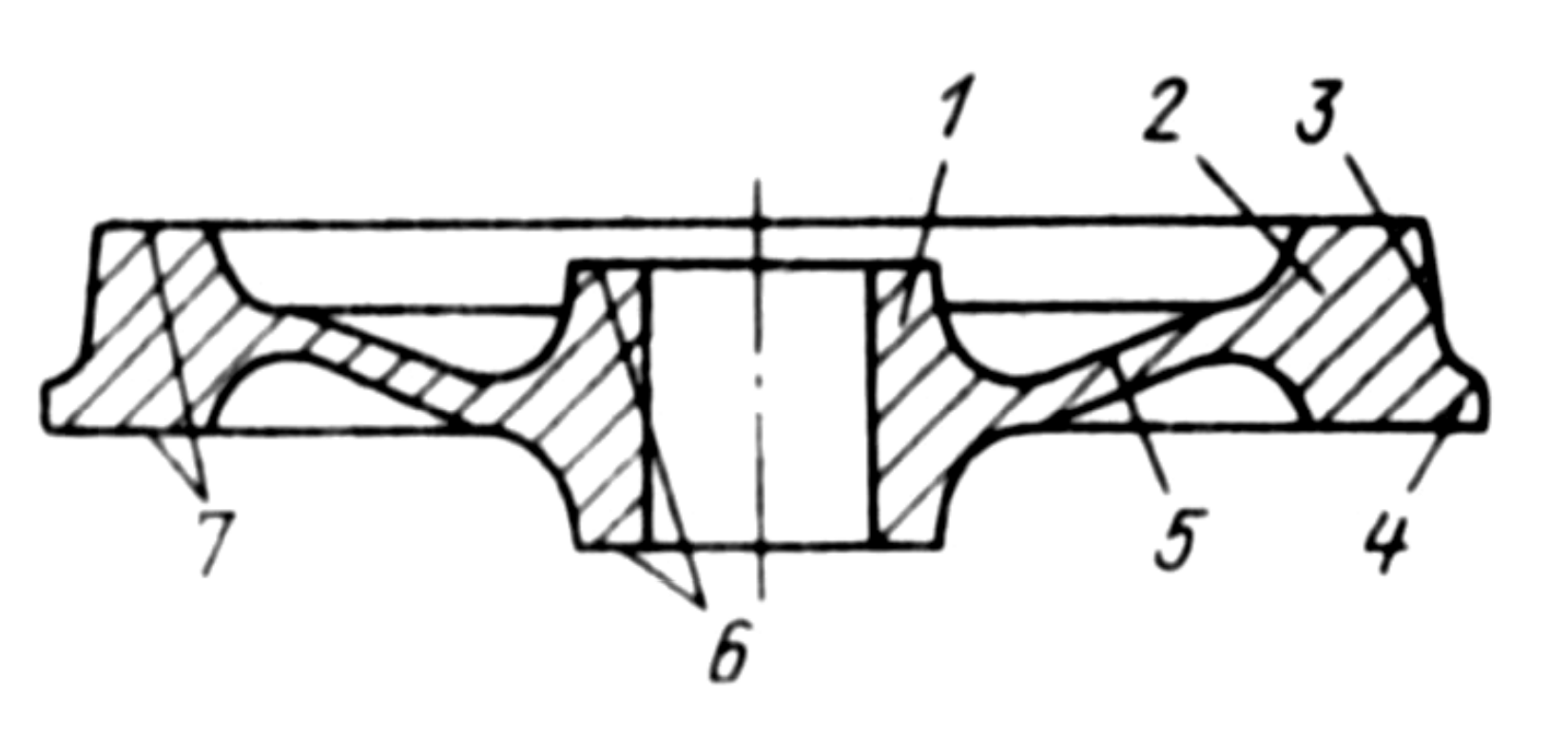


1 – направляющие ролики; 2 – станина; 3 – рельсы

Лекция 15

Стали, условия работы и технология термической обработки железнодорожных колес

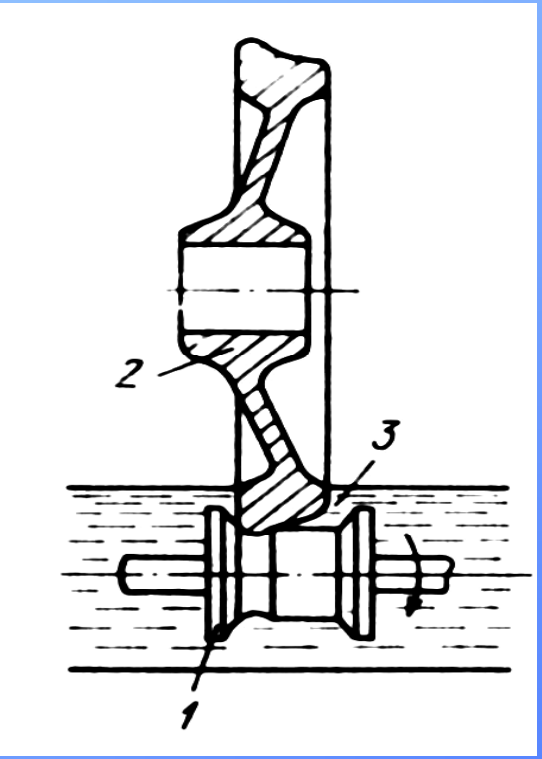
Элементы цельнокатаного железнодорожного колеса



1 – ступица; 2 – обод; 3 – поверхность катания;

4 – гребень; 5 – диск; 6 – торцы ступицы; 7 – боковая поверхность обода

Схема прерывистой закалки обода колеса при его вертикальном расположении



Нагретое колесо -2 подъемным краном устанавливается на опорный ролик -1, помещенный в закалочном баке с водой -3

Требования применяемые к железнодорожным колесам

- $\sigma_в$ = 900-1 130 МПа, δ = 8-12%, ψ = 14-21%, KCU≥0,2-0,3 МДж/м2,

- твердость на глубине 30 мм НВ 248-255,

- разница твердости по периметру одного колеса не должна превышать НВ 20.

- средний балл неметаллических включений ≤ 4, оксидных – ≤ 1.

Хим. состав ж/д колёс ГОСТ 10791-81

Марка стали	Массовая доля элементов %						Пример
	C	Mn	Si	V	S	P	
Сталь 1	0,44-0,52	0,80-1,20	0,40-0,60	0,08-0,15	0,04	0,035	колёса пассажирских вагонов
Сталь 2	0,55-0,65	0,50-0,90	0,20-0,42	-	0,04	0,035	колёса локомотивов и грузовых вагонов

Лекция 16

Технология термической обработки сортового и калиброванного проката.

Маршрутная технология получения калиброванной стали:

1. Приготовление расплава и литье слитков;
2. Горячая прокатка прутков (подкат);
3. Термообработка подката (ПТО);
4. Правка подката и подготовка к волочению;
5. Волочение (калибровка);
6. Термическая обработка калиброванного проката (ОТО);
7. Отделка и контроль качества.

Технология термической обработки

- Стали имеющие мартенситную, ферритомартенситную и перлитную структуру, подвергают отжигу чаще всего отжиг проводят при температуре Ac1+(40-60 °C).

- Стали аустенитного класса для снижения твердости подвергают высокотемпературной закалке с охлаждением в воде или на воздухе. Стали ферритного класса проходят высокий отпуск с быстрым охлаждением.

Параметры проверяемые при контроле качества сортового проката

- твердость
- качество изломов
- макро- и микроструктура
- глубина обезуглероживания
- механические свойства.

Лекция 17

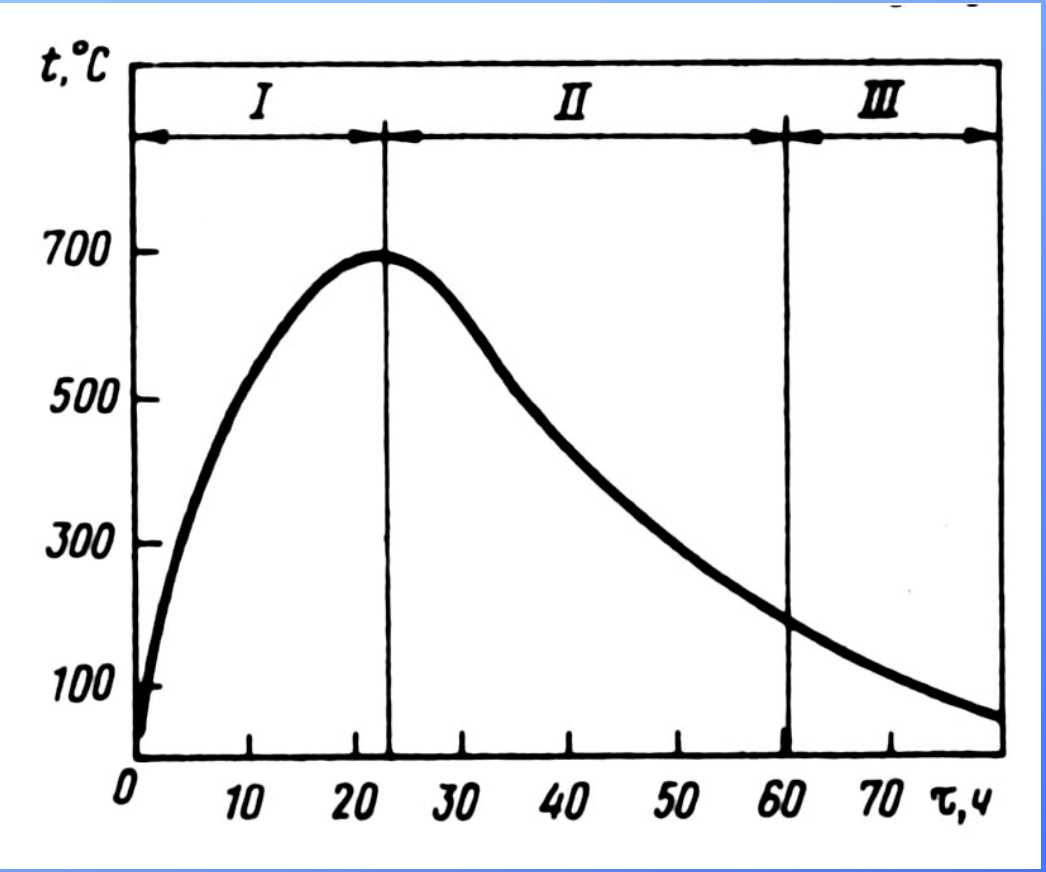
План лекции

1. Технология термической обработки листового проката.
2. Термомеханическая обработка проката.

Технология термической обработки тонкой ленты для глубокой вытяжки

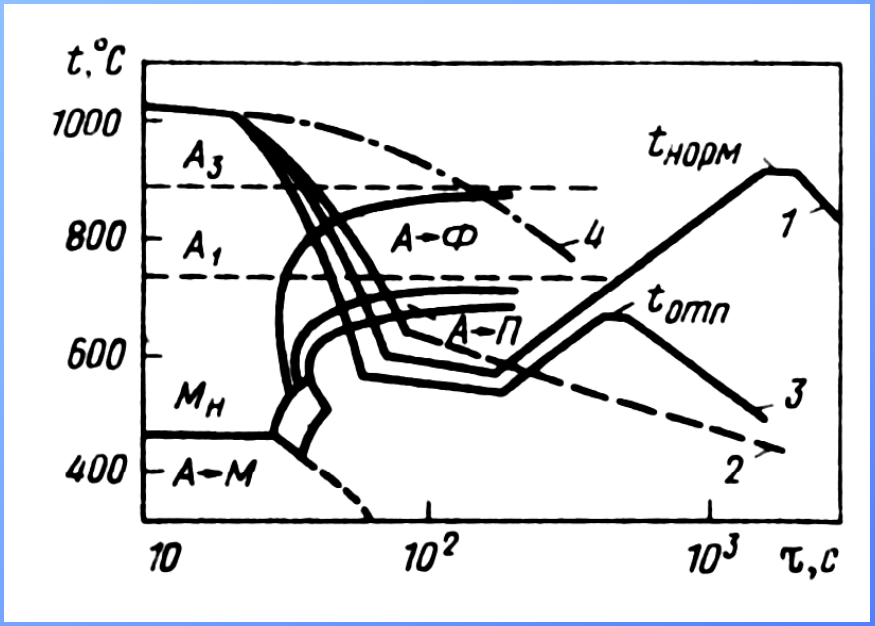
- Степень обжатия в последней клети стана горячей прокатки составляет 15-20%.
- Температура конца прокатки выше критической точки Ac_3 (860-920 °С).
- Быстрое охлаждение в интервале температур 750-550 °С для получения цементита сферической формы.
- Смотка в рулон ленты при 550-650 °С.
- Холодная прокатка при суммарной степени обжатия 50-60 %.
- Рекристаллизационный отжиг ведется в рулонах или при размотке ленты с протягиванием через печь при температурах ниже точки Ac_1 (640-720 °С).

Типичный режим отжига рулонов из стали 10 в одностопной колпаковой печи



1 – нагрев; 2 – охлаждение под муфелем;
3 – охлаждение на воздухе

Способы термической обработки листов из низкоуглеродистой стали (Ст3сп, толщина листа 40 мм)



1 – нормализация с прокатного нагрева;

2, 3 – одинарная и двойная упрочняющие термические обработки;

4 – охлаждение на воздухе

Схемы Т.О. при использовании тепла горячей прокатки

- Нормализация, когда листы принудительно охлаждаются водой до 680-600 °С, а затем на воздухе до 550
- Одинарная термообработка, заключающаяся в ускоренном охлаждении листов водой до 700-650 °С затем на воздухе
- Двойная упрочняющая термическая обработка, состоящая из ускоренного охлаждения водой до 600-300 °С с последующим отпуском при 620-680 °С в печах.

Лекция 18

План лекции

1. Технология термической обработки проволоки и ленты.
2. Патентирование.

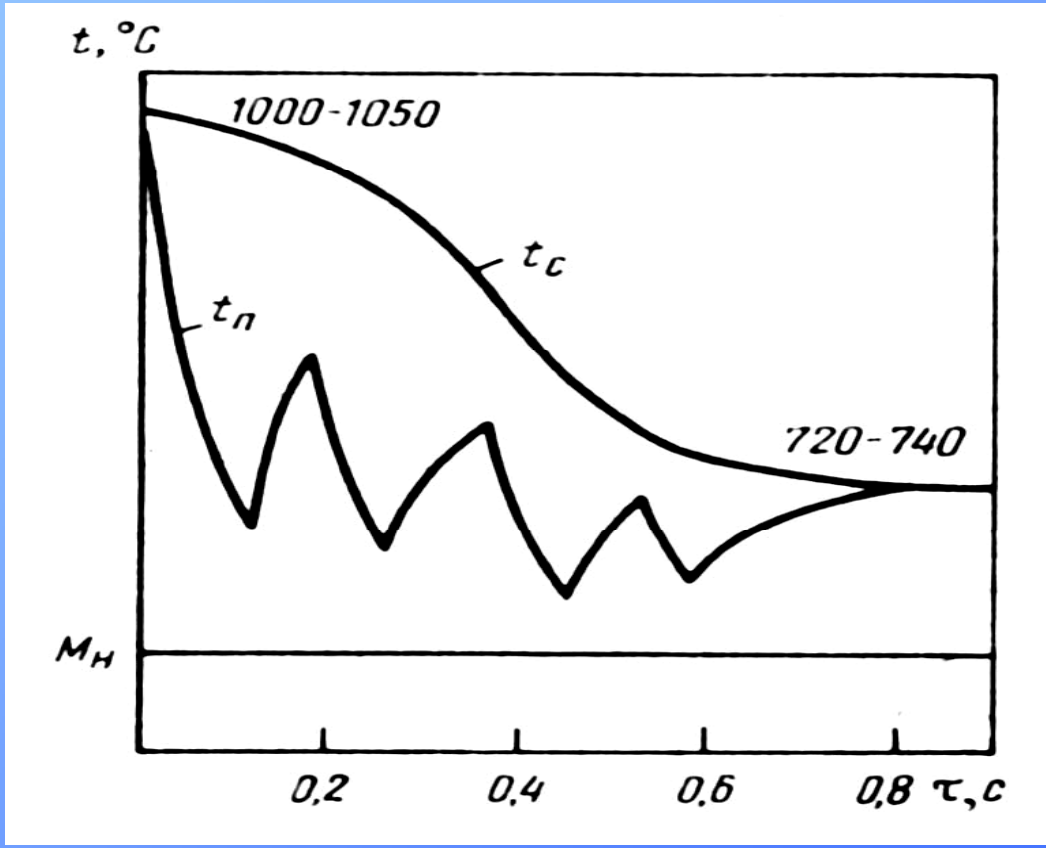
Деление проволоки по диаметру

- Особо толстуя диаметром 8-16 мм;
- Толстая диаметром 6-8 мм;
- Средней толщины диаметром 1,6-6,0 мм;
- Тонкая диаметром 0,4-1,6 мм;
- Тончайшая диаметром 0,1-0,4 мм;
- Наитончайшая (микронную) диаметром меньше 0,1 мм.

Свойства проволоки описанные в нормативной документации

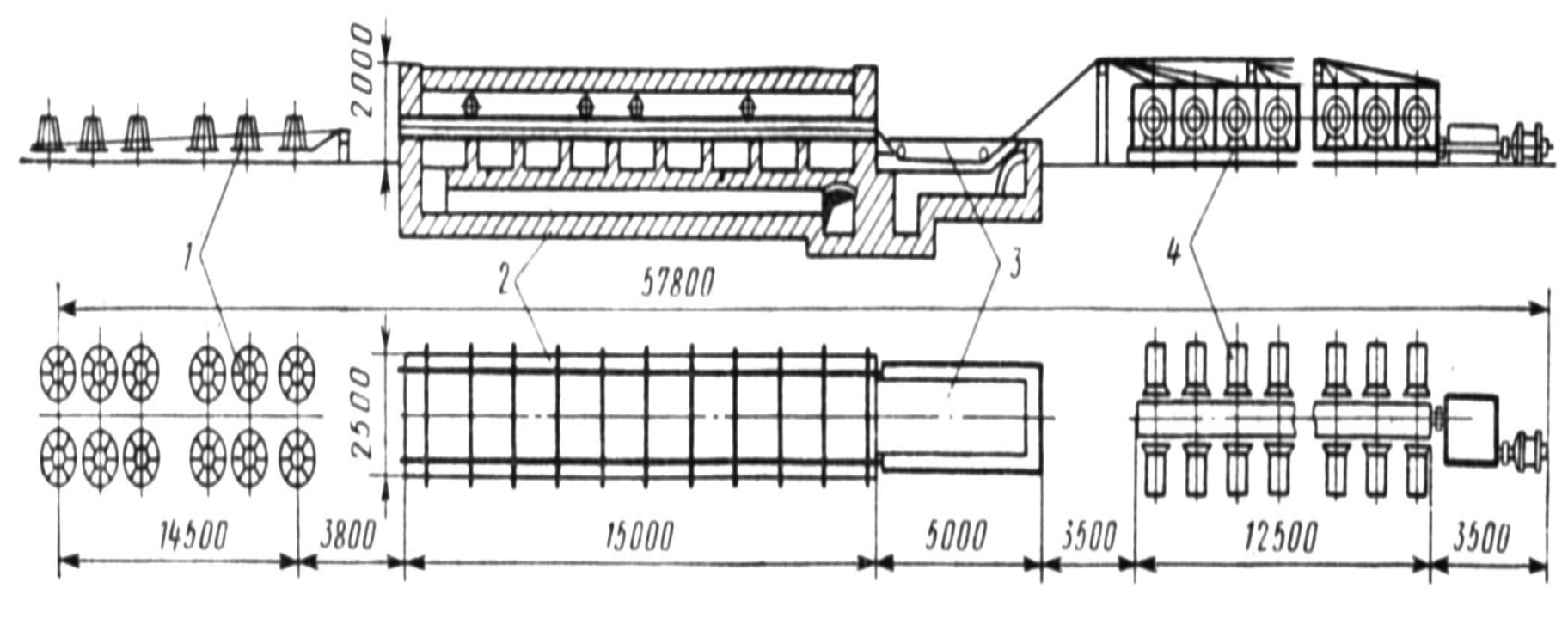
- Механические (σв, число перегибов, число скручиваний, способность выдерживать навивку вокруг стержня определенного диаметра без поломок и растрескивания).
- На разрыв с узлом (канатная диаметром до 0,8 мм).
- По излому, микроструктуре, глубине обезуглероженного слоя, макроструктуре (флокены, пористость, трещины и др.), подшипниковая проволока.
- Не допускаются поверхностные дефекты.

Изменение температуры поверхности ($t_п$) и сердцевины (t_c) катанки при сорбитизации



Скорость прокатки 50 м/с

Схема установки для непрерывного патентирования проволоки



ЛЕКЦИЯ 19

Технология термической обработки шестерен, зубчатых колес

План лекций

1. Шестерни, упрочняемые химико-термической обработкой (ХТО)

2. Технология азотирования шестерен

Требования к упрочнению шестерен ХТО

Глубина диффузионного слоя при ХТО зависит от модуля зуба и должна соответствовать следующим значениям.

Модуль, мм	1,5-2,25	2,5-3,5	4,0-5,5	6,0-10,0	11,0-12,0	14,0-18,0
Глубина слоя, мм	0,3±0,1	0,5±0,2	0,8±0,3	1,2±0,3	1,5±0,4	1,8±0,5

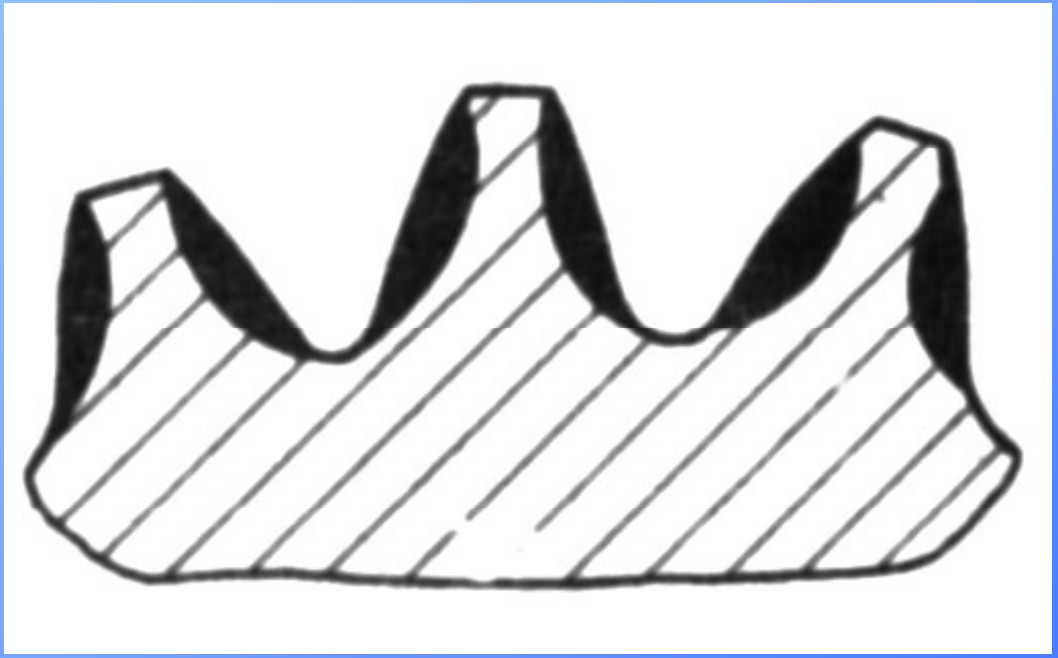
Условия для проведения качественной ХТО

1. Соблюдать указанное соотношение модуля зуба и глубины насыщенного слоя. Концентрация углерода в слое должна быть в пределах 0,8-1,0%, что обеспечит максимальную усталостную прочность при сохранении высокого сопротивления хрупкому разрушению;

2. Твердость поверхности зубьев должна соответствовать HRC 58-65, иметь структуру мелкоигольчатого мартенсита с изолированными участками аустенита остаточного (не более 15-20%). Карбидная сетка и продукты диффузионного распада аустенита в цементованном слое не допускаются;

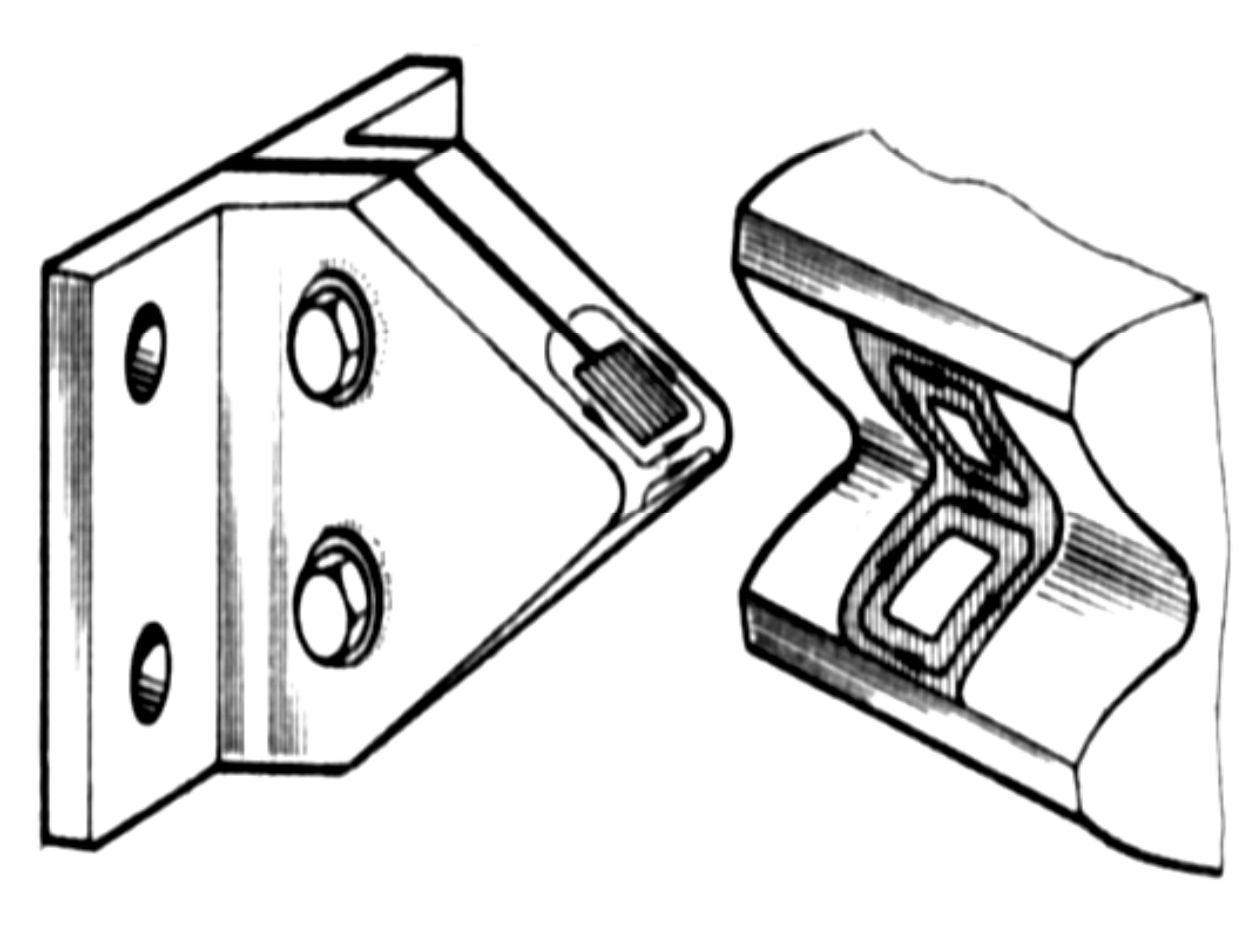
3. Структура сердцевины зубьев должна состоять из низкоуглеродистого мартенсита или нижнего бейнита с твердостью HRC 30-45, присутствие структурно свободного феррита не допустимо.

Конфигурация закаленного слоя на зубьях при закалке «по впадине»



закаленный слой выделен черным цветом

Схема индуктора для закалки зуба шестерни непрерывно-последовательным способом



ЛЕКЦИЯ 20

Технология термической обработки деталей подшипников

План лекций

1. Условия работы подшипников и материалы для их изготовления.

2. Маршрутная технология получения деталей подшипников.

3. Технология ОТО деталей подшипников.

Условия работы подшипников и материалы для их изготовления

1. Подшипники, работающие без высоких ударных нагрузках. Изготавливаются из заэвтектоидных легированных сталей типа ШХ15. Термическое упрочнение обеспечивает высокую твердость по всему сечению деталей;

2. Подшипники, работающие при значительные ударные нагрузки и высокие контактные напряжения (подшипники прокатных станов, буровых установок).
   Изготавливаются из низкоуглеродистых легированных сталей (18ХГТ, 20Х2Н4А) с повышением твердости, износостойкости поверхности путем цементации и последующей термической обработки;

3. Детали крупногабаритных подшипников, работающие в условиях ударного нагружения (подшипники букс железнодорожных вагонов). Изготавливаются из стали ШХ4, эта сталь относится к заэвтектоидным хромистым сталям с регламентированной прокаливаемостью. Упрочняющая термическая обработка стали ШХ4 состоит из объемно-поверхностной закалки с отпуском.

Химический состав подшипниковых сталей

Марка	ГОСТ	Содержание элементов, %							
		C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni*1	Cu*1
ШХ15	801-78	0,96-1,05	0,17-0,37	0,20-0,40	1,30-1,65	0,027	0,020	0,30	0,25
ШХ15СГ	801-78	0,95-1,05	0,40-0,65	0,90-1,20	1,30-1,65	0,027	0,020	0,30	0,25
ШХ20СГ	801-78	0,90-1,00	0,55-0,85	1,40-1,70	1,40-1,70	0,027	0,020	0,30	0,25
18ХГТ	4543-71	0,17-0,23	0,17-0,37	0,8-1,1	1,0-1,3	0,035	0,30	0,30	-
20Х2Н4А	4543-71	0,15-0,22	0,17-0,37	0,3-0,6	1,25-1,75	0,025	0,020	-	0,30
ШХ4	801-78	0,95-1,05	0,15-0,30	0,15-0,30	0,35-0,50	0,027	0,020	0,30	0,25

Маршрутная технология получения деталей подшипников

1. Приготовление расплава, литье слитков на машинах непрерывного литья заготовок;

2. Горячая деформация свободной ковкой, штамповкой на горизонтально-ковочных машинах, раскаткой;

3. ПТО с целью улучшения обрабатываемости резанием и подготовки структуры к ОТО;

4. Предварительная механическая обработка;

5. ОТО предварительно обработанных заготовок;

6. Окончательная механическая обработка (шлифование и доводка);

7. Отжиг для снятия напряжения;

8. Сборка и контроль качества.

Технология ОТО деталей подшипн

1. Завершение образования аустенита и растворение карбидов в нем до содержания углерода 0,55-0,65%;

2. Размер зерна аустенита в пределах 9-10 балла;

3. Однородный аустенит, что позволяет получить в структуре закаленной стали отсутствие продуктов немартенситного превращения.

Длительность нагрева под закалку (τ)

для колец $\tau \approx a \cdot \sqrt{S}$, [мин],

для шариков (роликов) $\tau = a \cdot \sqrt{D}$, [мин],

где a – эмпирический коэффициент,
S – толщина стенки кольца, мм,
D – диаметр шариков (роликов).

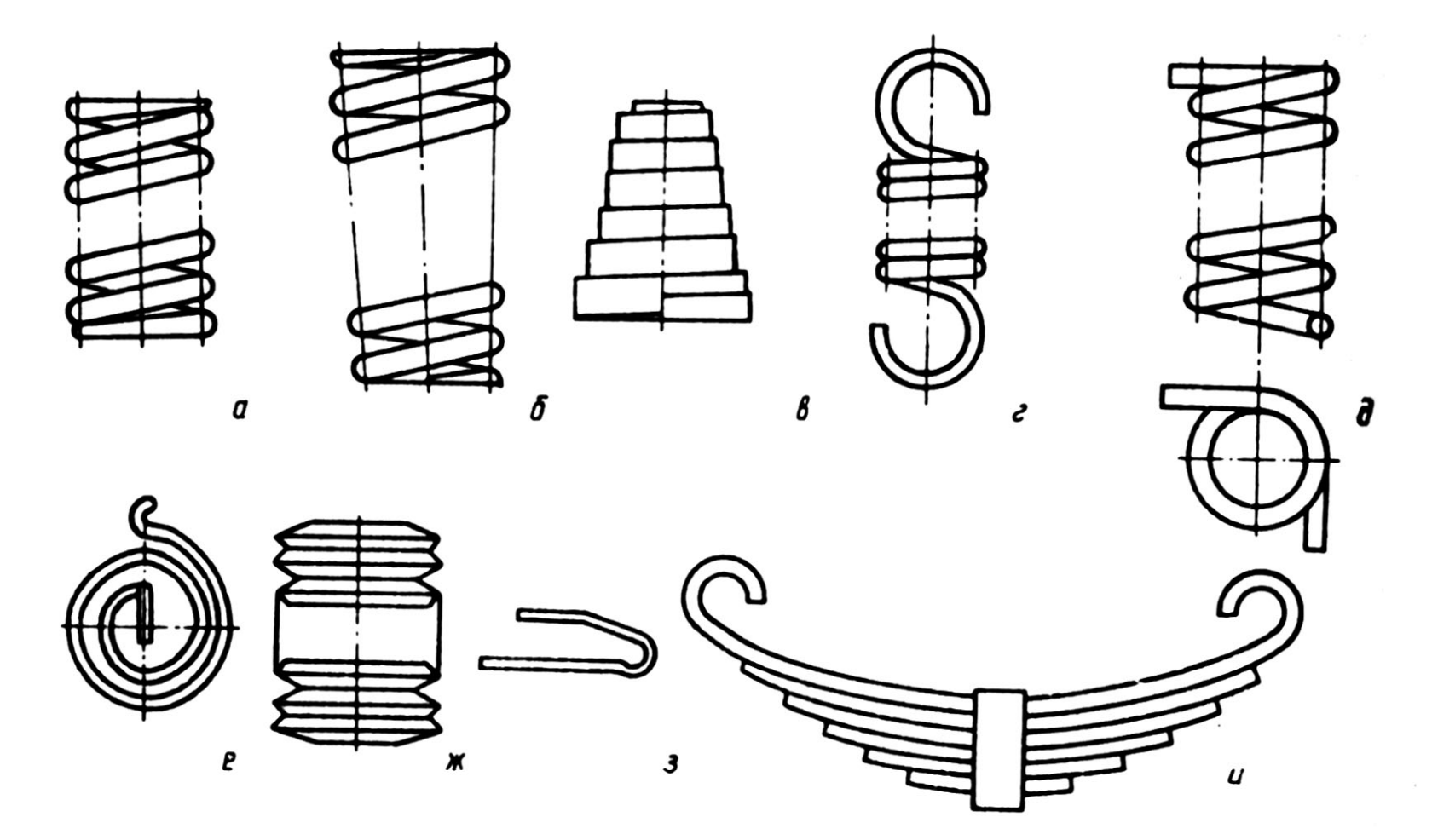
ЛЕКЦИЯ 21

Технология термической обработки рессор и пружин.

План лекции

1. Условия работы пружин и рессор. Требования к рессорно-пружинным материалам.
2. Термическая обработка пружин из сталей общего назначения, упрочняемых закалкой с отпуском.
3. Технология термической обработки рессор

Различные виды пружин



а – пружина сжатия цилиндрическая; б - пружина сжатия коническая круглого сечения; в – пружина сжатия телескопическая из заготовки прямоугольного сечения; г – пружина цилиндрическая растяжения; д – пружина кручения; е – пружина спиральная плоская; ж – пакет тарельчатых пружин; з – пружина изгиба пластинчатая; и – листовая рессора

Факторы, влияющие на долговечность и надежность пружин и рессор

1. Химический состав и структура стали после термической обработки, а также его изменение в процессе работы.

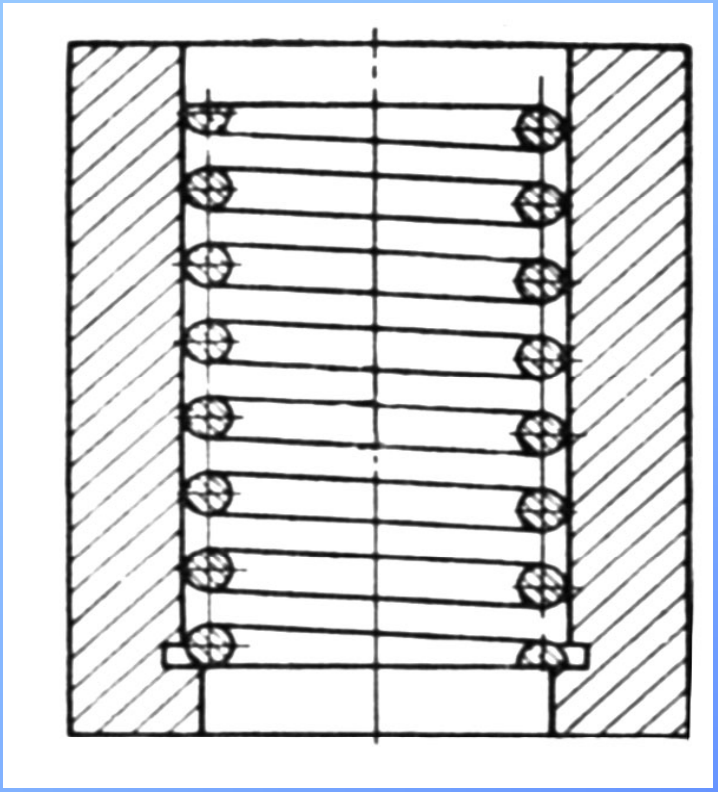
2. Металлургическое качество стали (количество неметаллических включений, неоднородность состава и структуры).

3. Качество поверхности проката (лист, полоса, лента, проволока). Наличие дефектов поверхности в готовых пружинах и рессорах.

4. Наличие и глубина обезуглероженного слоя;

5. Величина и распределение внутренних остаточных напряжений.

Термическая обработка пружин упрочняемых закалкой с отпуском

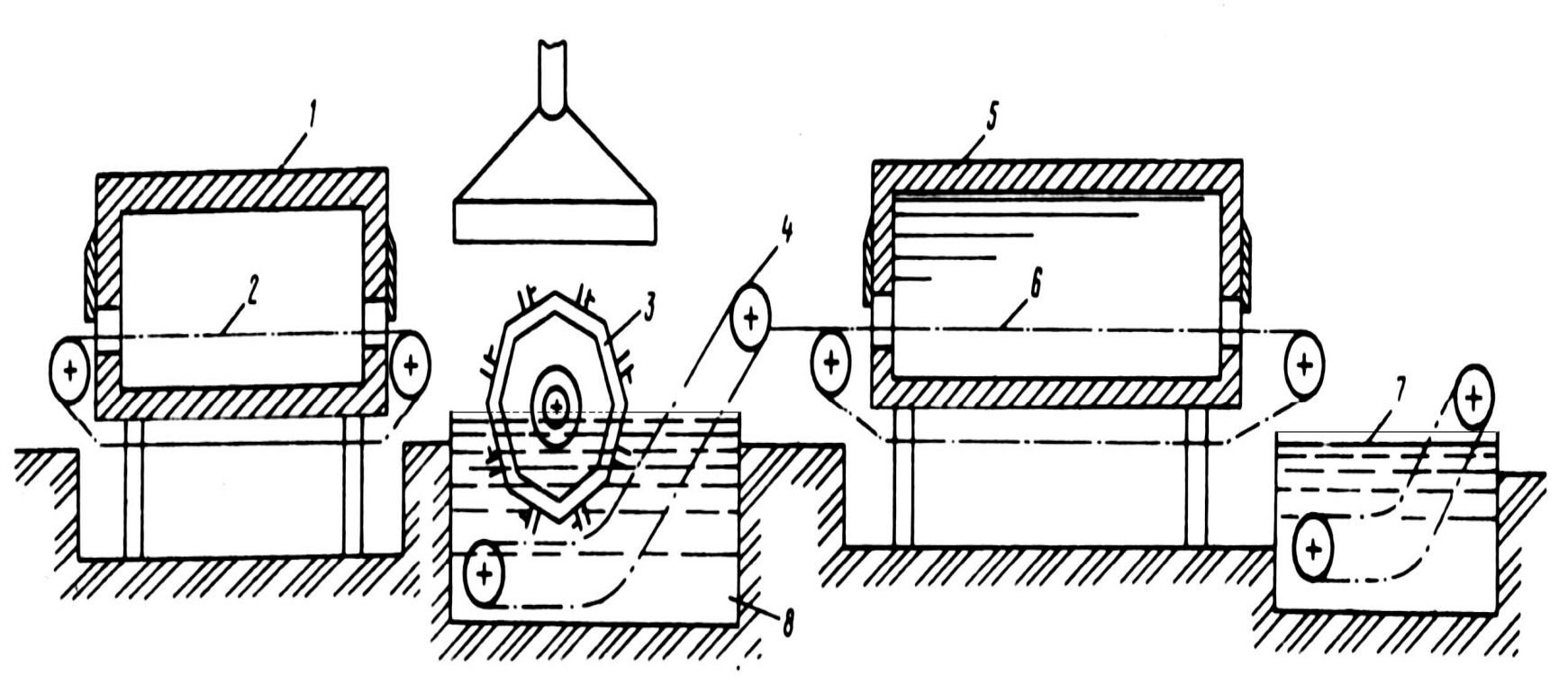


приспособление для закалки на оправке пружин сжатия

а б в

а – после закалки;
б – на оправке перед отпуском;
в – после отпуска

Схема линии для термической обработки рессорных листов



1 – конвейерная печь для нагрева под закалку; 2 – конвейер закалочной печи; 3 – гибозакалочный барабан; 4 – конвейер закалочного бака; 5 – отпускная печь; 6 – конвейер отпускной печи; 7 – бак с водой; 8 – бак с маслом

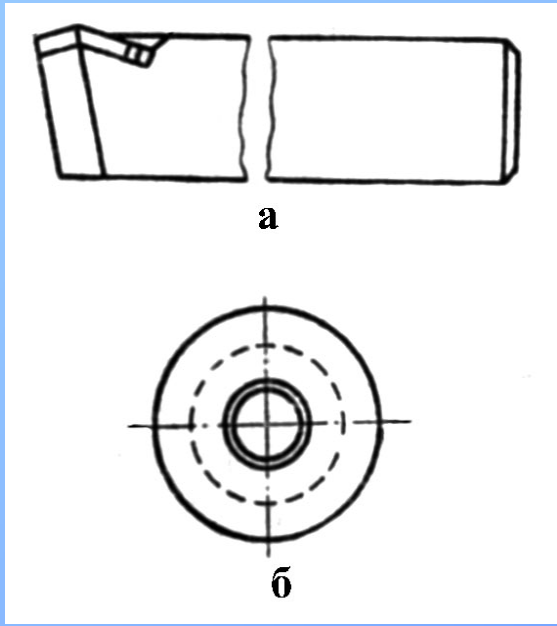
ЛЕКЦИЯ 22

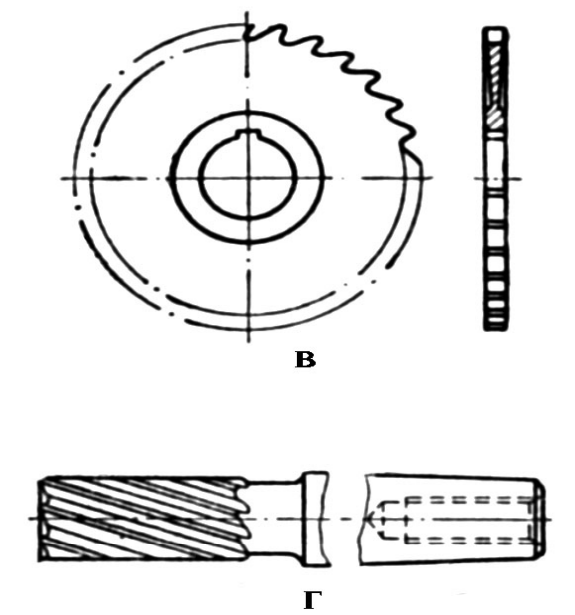
Технология термической обработки инструмента

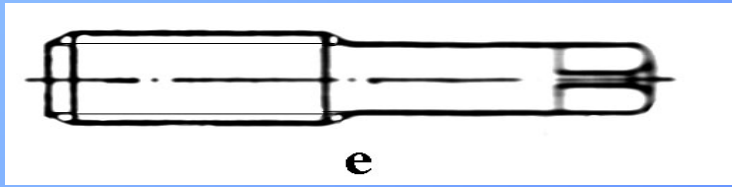
План лекции

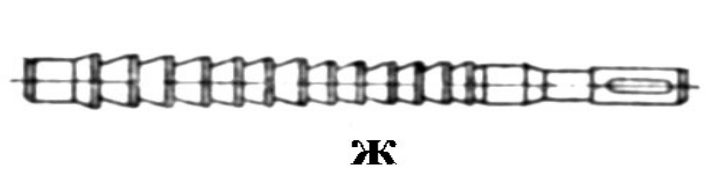
1. **Технология термической обработки режущего инструмента.**
2. **Характеристика инструментальных сталей для режущего инструмента.**
3. **Технология ПТО заготовок инструмента.**
4. **Контроль качества инструмента.**

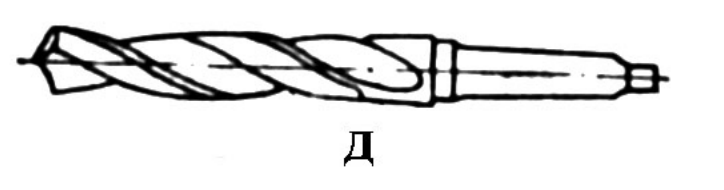
Виды режущего инструмента





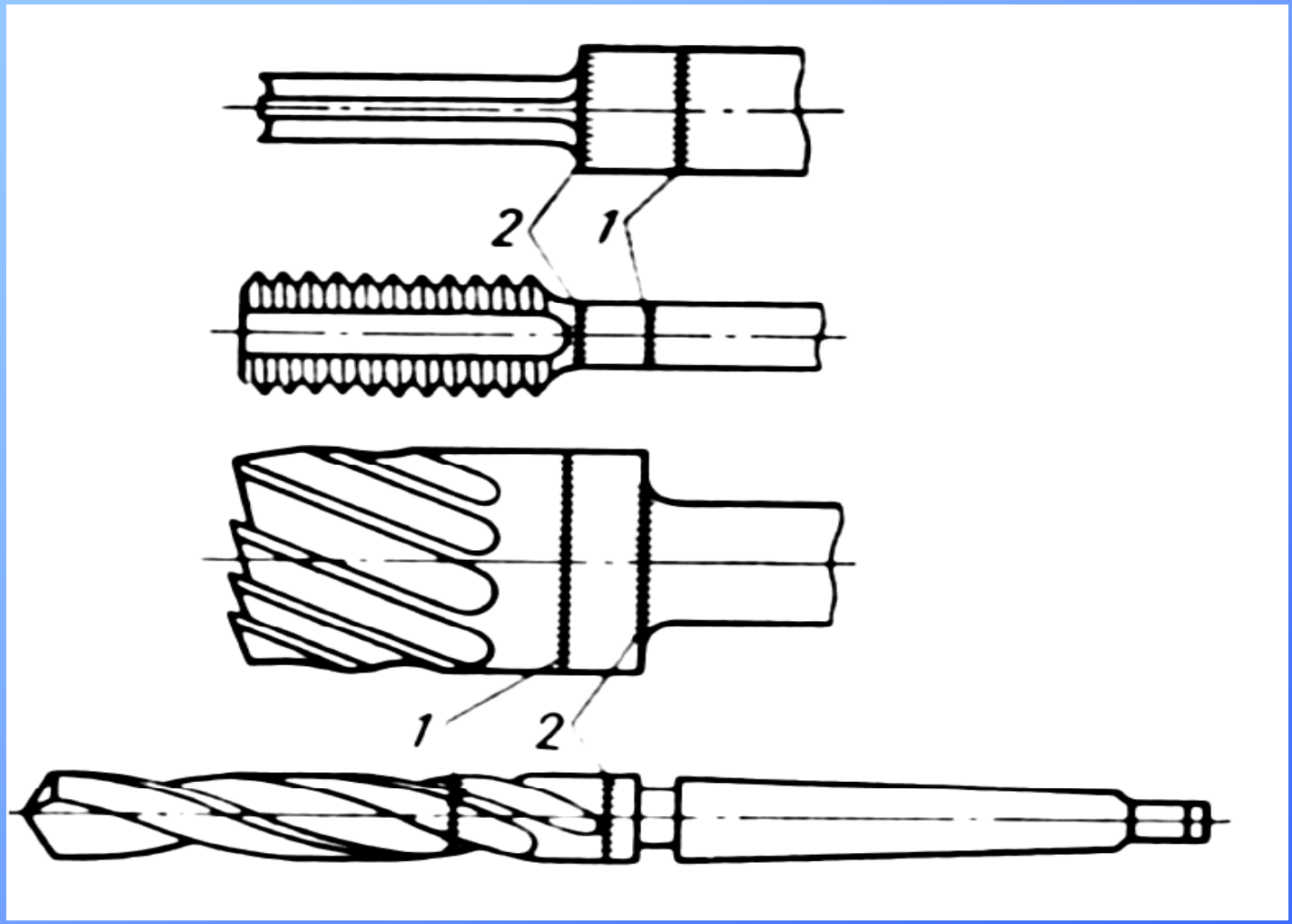






а,б – резцы плоский и круглый соответственно; в,г – фрезы отрезная и концевая соответственно; д – сверло спиральное; е – метчик; ж – протяжка

Место сварки режущего инструмента



1 – правильно; 2 – неправильно

Маршрутная технология получения режущего инструмента

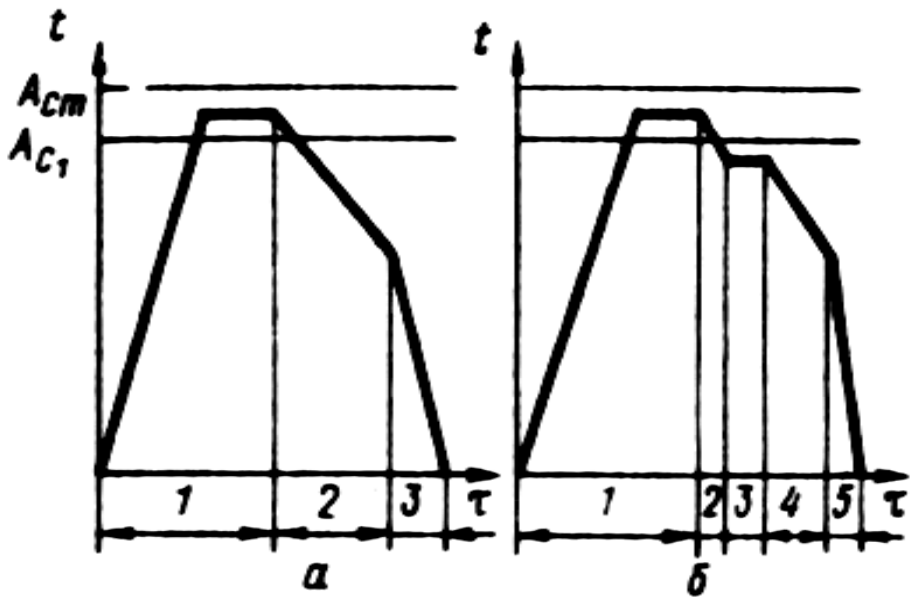
- Приготовление расплава и литье слитков.

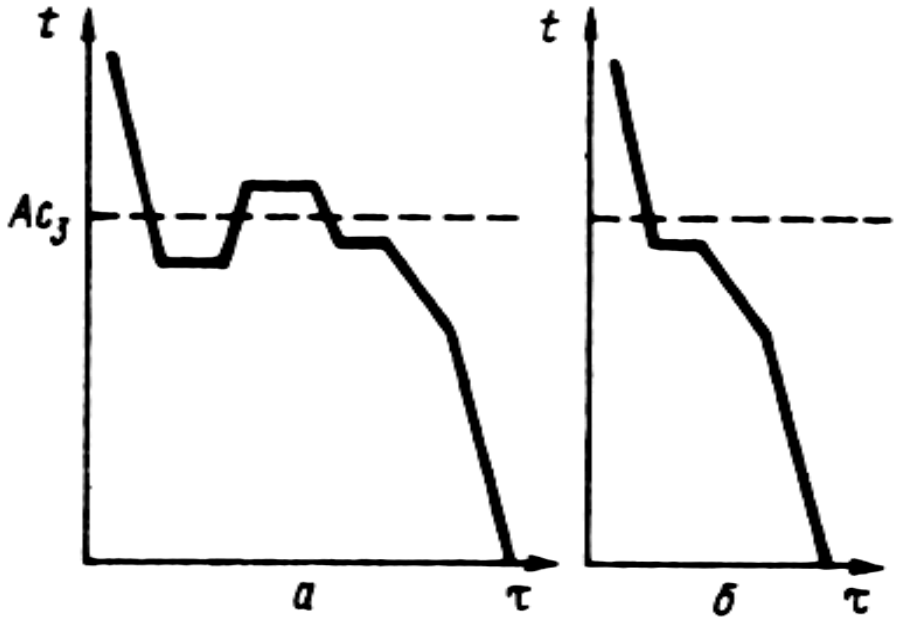
- Горячую деформацию слитков (прокатка или ковка).

- Резку в меру и изготовление заготовок (предварительное формообразование) с применением сварки, горячей и холодной пластической деформации.

- Предварительную смягчающую термическую обработку (ПТО) для улучшения обрабатываемости стали и подготовки структуры для ОТО.

Схема режимов отжига





инструментальных сталей:
а – с непрерывным охлаждением;
б – с изотермическим охлаждением

изотермического с использованием остаточного тепла после горячей деформации:
а – отжиг с повторной перекристаллизацией;
б – отжиг без повторного нагрева

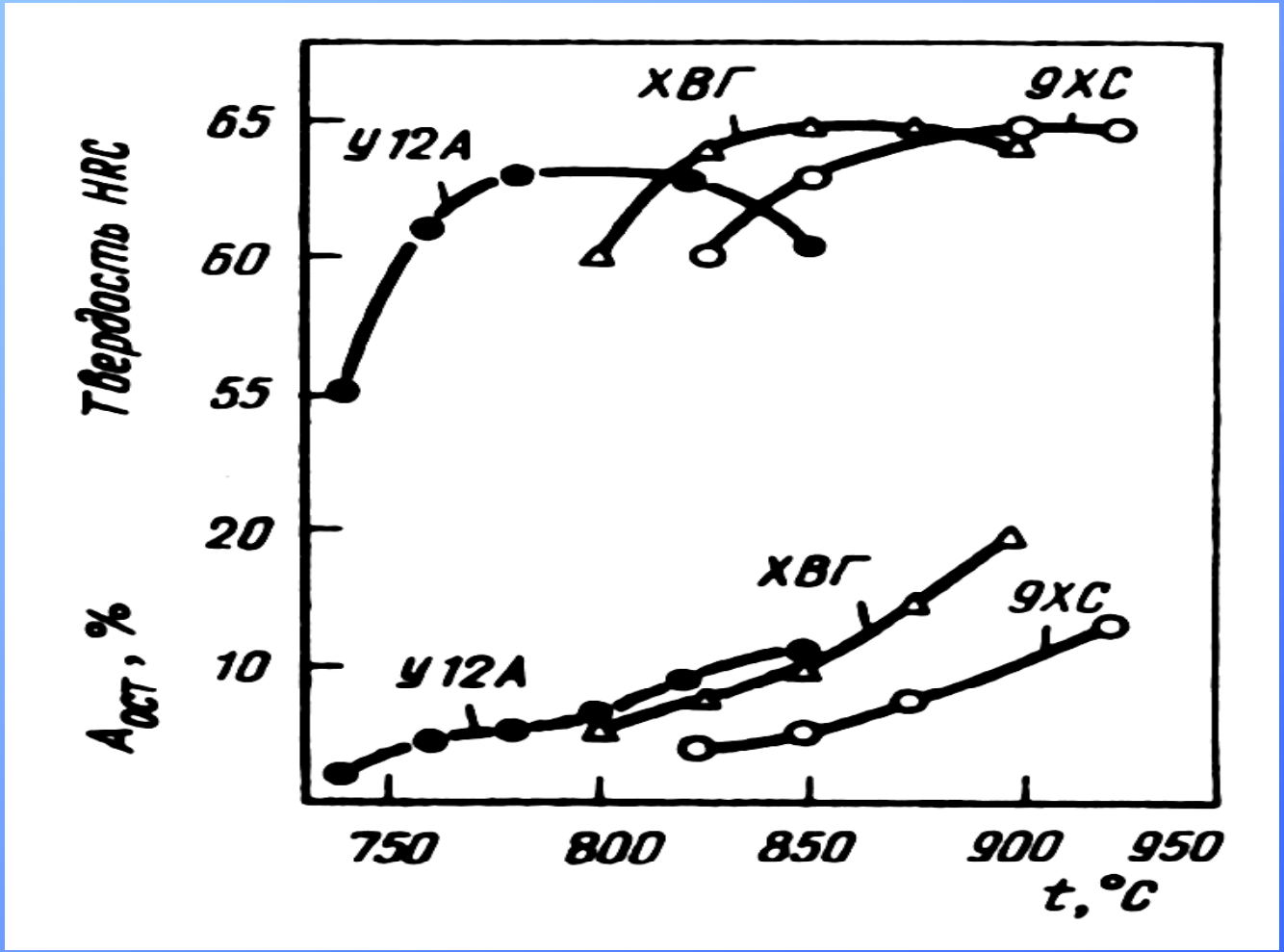
Режимы отжига с непрерывным охлаждением

Номер этапа	Наименование операции	Марка инструментальной стали	Температура, °С	Время выдержки, скорость охлажд.
1	Нагрев и выдержка (аустенизация)	Углеродистые (У7-У13) Легированные (ХВГ) Легированные с Si (9ХС, ХВСГ) Быстрорежущие	760-780 770-790 790-810 850-870	1-2 ч 1-3 ч 1-2 ч 2 -3 ч
2	Медленное охлаждение (распад аустенита)	Углеродистые Легированные Быстрорежущие	≤500 ≤500 ≤500	50 °С/ч 50 °С/ч 30 °С/ч
3	Окончательное охлаждение	Все стали	<18-20	На воздухе

Режимы изотермического отжига инструментальных сталей

№ этапа	Наименование этапа	Тип стали	t, °C	Выдержка, $V_{охлаждения}$
1	Нагрев (аустенизация)	Углеродистые Легированные Легированные Si Быстрорежущие	760-780 770-790 790-810 850-870	1-2 ч 1-2 ч 1-2 ч 2-3 ч
2	Подстуживание до изотермической выдержки	Все стали	-	С печью
3	Изотермическая выдержка	Углеродистые Легированные Быстрорежущие	680-700 700-720 730-750	1-2 ч 3-4 ч 4-6 ч
4	Замедленное охлаждение	Углеродистые Легированные Быстрорежущие	≤500 ≤500 <500	50 °C/ч 50 °C/ч 30 °C/ч
5	Окончательное охлаждение	Все стали	< 18-20	На воздухе

Твердость и $A_{ост}$ в сталях в зависимости от температуры нагрева под закалку



Температура нагрева под закалку инструментальных сталей

Марка стали	t, °C	HRC после закалки	Марка стали	t, °C	HRC после закалки
Углеродистые			Быстрорежущие		
У8А, У9А	760-770 [1]	63-65	Р18	1270-1290	62-65
У10А, У13А	780-790[2]	60-62	Р12	1240-1260	62-65
	770-790[1]	63-65	Р6АМ5 (Р6М5)	1200-1300	62-65
	790-810[2]	61-63	Р14Ф4	1240-1260	63-66
Легированные			Р9К5, Р9К10	1210-1235	63-66
			Р9М4К8	1215-1235	63-66
11ХФ, 13Х	800-820	63-65	Р8М3К6С	1200-1220	63-66
ХВГ	830-850	63 -66	Р9М5К5	1200-1230	63-66
ХВГС	850-870	63-64	6Х6В3МФС	1050-1075	60-62
9ХС	860-880	63-64			

1 При охлаждении в воде и водных растворах.
2 При охлаждении в масле и горячих средах.

Температура нагрева под закалку инструментальных сталей

Марка стали	t, °C	HRC после закалки	Марка стали	t, °C	HRC после закалки
Углеродистые			Быстрорежущие		
У8А,	760-770 [1]	63-65	Р18	1270-1290	62-65
У9А	780-790[2]	60-62	Р12	1240-1260	62-65
У10А,	770-790[1]	63-65	Р6АМ5 (Р6М5)	1200-1300	62-65
У13А	790-810[2]	61-63	Р14Ф4	1240-1260	63-66
Легированные			Р9К5, Р9К10	1210-1235	63-66
11ХФ, 13Х	800-820	63-65	Р9М4К8	1215-1235	63-66
ХВГ	830-850	63 -66	Р8М3К6С	1200-1220	63-66
ХВГС	850-870	63-64	Р9М5К5	1200-1230	63-66
9ХС	860-880	63-64	6Х6В3МФС	1050-1075	60-62

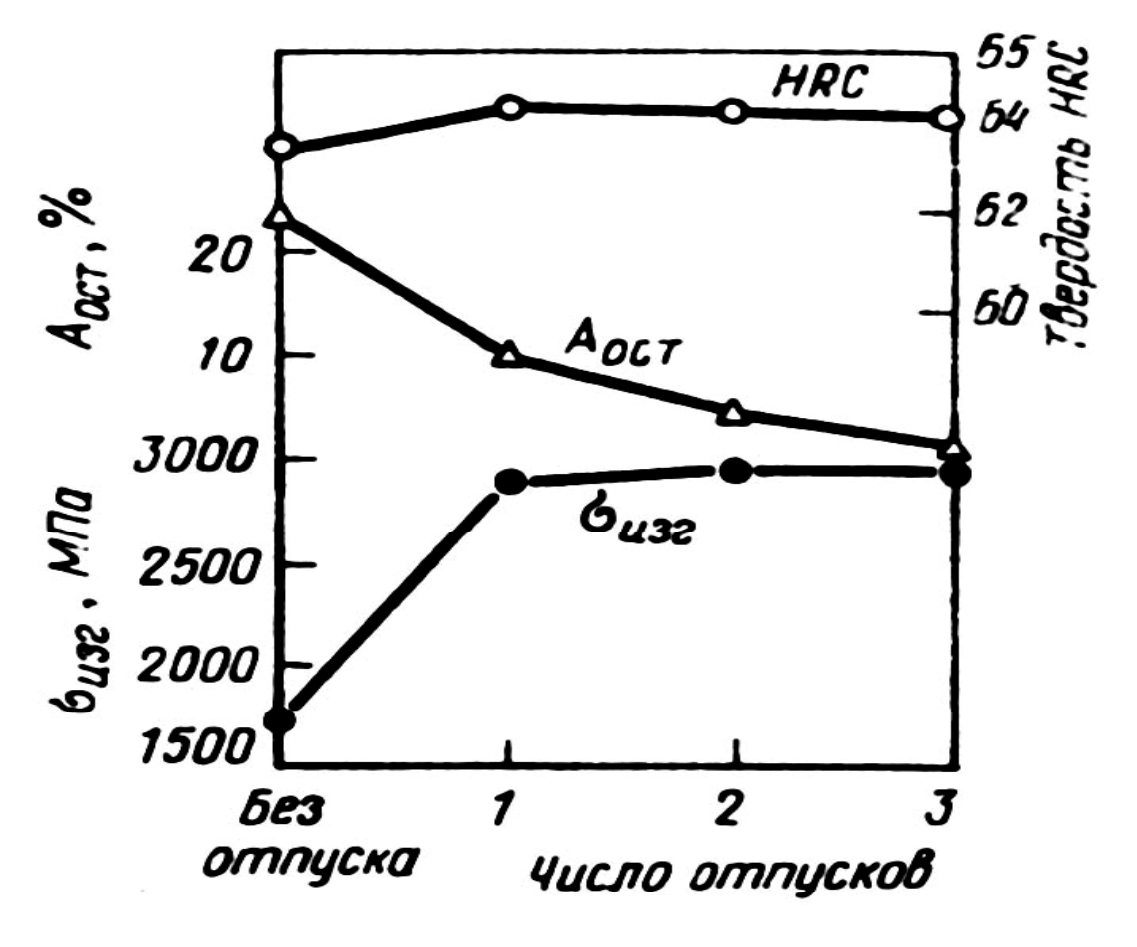
1 При охлаждении в воде и водных растворах
2 При охлаждении в масле и горячих средах

Нормы выдержки при нагреве инструмента

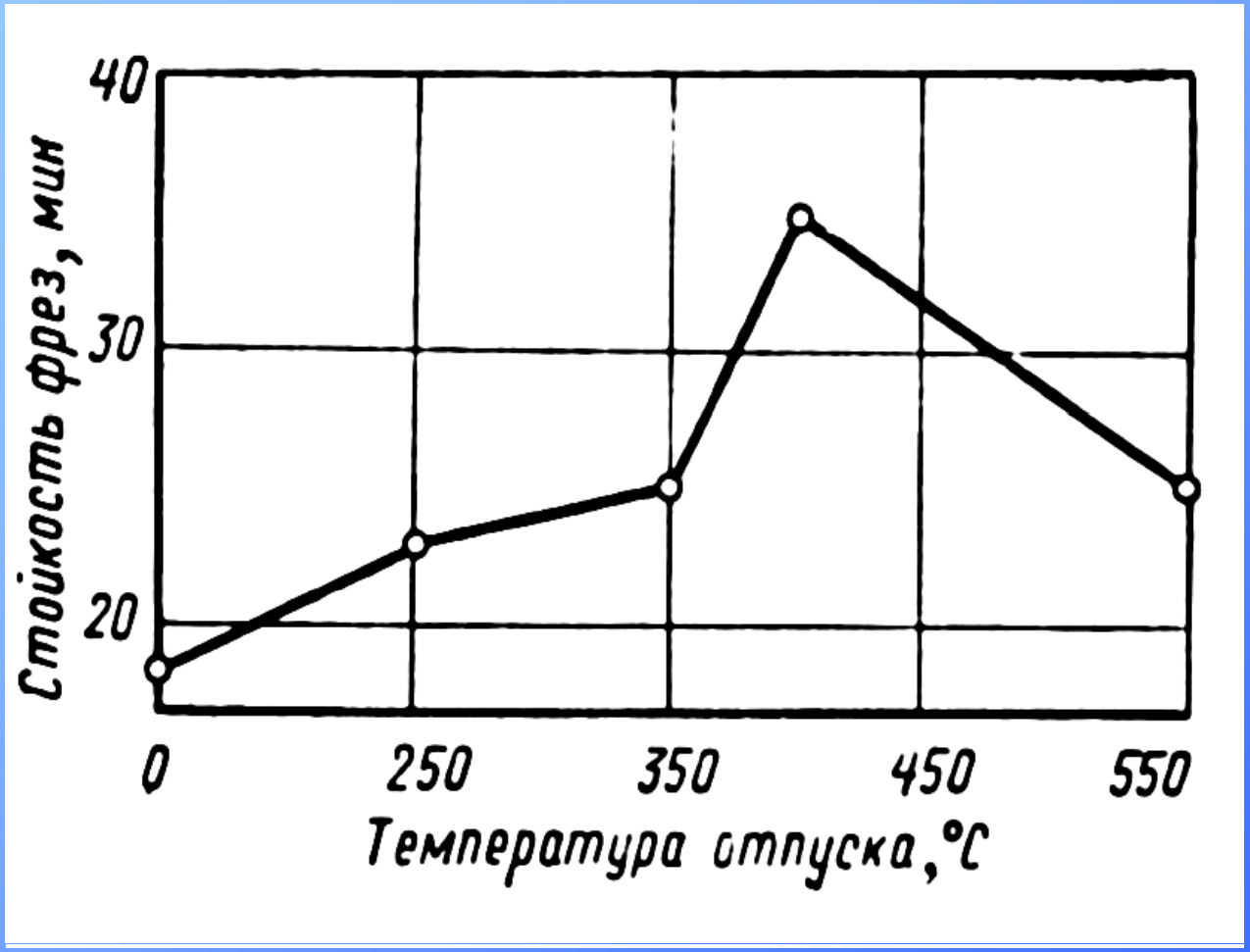
Оборудование для нагрева	Выдержка (с/мм) при нагреве до температур, °С		
	750-900	950-1 100	1 250-1 300
Соляная ванна	25-30	12-15	8-10
Пламенная печь	-	-	10-12
Электрическая печь	70-90	-	-

Нормы выдержки на 1 мм диаметра (толщины) при нагреве инструмента размером 3 – 75 мм из быстрорежущих сталей

Влияние числа отпусков при 560°С, 1 ч на твердость, количество остаточного аустенита и прочность стали Р18



Влияние отпуска на стойкость фрез из стали Р18



ЛЕКЦИЯ 23

Технология термической обработки штампов холодного деформирования.

Стали для штампов холодной деформации должны обладать:

1. Высоким сопротивлением пластической деформации и износостойкостью, что обеспечивается высокой твердостью HRC 52-60. Оптимальной структурой является мелкоигольчатый (бесструктурный) мартенсит, содержащий избыточные карбиды легирующих элементов. Зерно аустенита при нагреве под закалку должен быть равным 11-10 баллу.

2. Достаточной вязкостью, обеспечивающей высокое сопротивление хрупкому и усталостному разрушению при динамических нагрузках.

3. Повышенной теплостойкостью до 400 – 500 °С при условии штамповки высокопрочных твердых материалов.

Классификация и назначение штамповых сталей

Группа стали	Марка стали	$P_м$, МПа	Основное назначение
Повышенной износо-стойкости	Х12М Х12Ф1 Х12ВМ	1 400-1 600	Вырубные штампы повышенной точности и сложной формы. Инструменты для чеканки, калибровки, высадки, накатные ролики
	Х6ВФ 9Х5ВФ	1 400-1 600	Матрицы и пуансоны холодного прессования, инструменты для накатки резьбы
Вторично-твердеющие с высоким сопротивлением смятию	8Х4В2С2МФ 8Х4В3М3Ф2	2 200-2 300	Тяжелонагруженные пуансоны и матрицы холодного и полугорячего деформирования (прессование, высадка)
	11Х4В2СФ3М	2 200-2 300	Тяжелонагруженный инструмент для прессования, вырубки, высадки при повышенном износе
	Х5С4В2Ф2НМ	2 600	Тяжелонагруженные пуансоны сечением более 25 мм
Высокопрочные с повышенной вязкостью	7ХГ2НМ 7Х3ВМФС	1 400-1 600	Инструмент сложной формы для вырубки, вытяжки и формовки при повышенных динамических нагрузках
	6Х6В3МФС 6Х4М2ФС	1 400-1 600	Высадочные пуансоны и матрицы, ножи гильотин, резьбо-, зубо- и шлиценакатные ролики, работающие при ударных нагрузках

Режимы ПТО штамповых сталей для холодного деформирования

Марка стали	Изотермический отжиг			Полный отжиг		Высокий отпуск	
	$t_н$, °С	$t_в$, °С	НВ	t, °С	НВ	t, °С	НВ
Х12М	850 870	700-720	207-255	850-870	241-255	750-780	255
Х12Ф1	850-870	680-700	207-255	850-870	241-255	750-780	255
Х12ВМ	830-850	700-720	241-255	830-850	255	750-780	255
Х6ВФ	830-850	700-720	207-241	830-850	207-241	760-790	241
9Х5ВФ	820-840	700-720	229-241	820-840	229-241	750-770	241
8Х4В2С2МФ	880-900	740	207-229	880-900	217-235	750-78-	229
8Х4В3М3Ф2	850-870	710-730	229-255	850-870	241-255	750-770	255
7ХГ2ВМ	770-790	600-620	265-269	770-790	269	680-700	269
6Х6В3МФС	860-880	760-780	241-255	860-880	255	760-780	269
6Х4М2ФС	850-870	720-740	201-217	850-870	217-235	700-730	255

Температурные режимы закалки и отпуска при ОТО

Марка стали	Закалка			Балл зерна	HRC	Отпуск	
	$t_п$, °C	$t_н$, °C	охлаж. среда			t, °C	HRC
Х12М	650-700	1000-1030	Масло, селитра	10-11	63-65	190-210 320-350	60-62 57-58
Х12Ф1	650-670	1030-1050	То же	10-11	62-64	180-200 400-420	60-62 56-58
Х12ВМ	650-700	1000-1030	Масло	10	63-65	350-400	58-59
Х6ВФ	650-700	980-1000	Масло, селитра	11	63-65	150-170 280-300	62-63 56-58
9Х5ВФ	650-700	950-1000	Масло	10-11	58-60	280-300 400-420	57-58 54-56
8Х4В2С2МФ	700-750	1060-1090	То же	10-11	62-64	530-540[1]	62-63[1]
8Х4В3М3Ф2	860-880	1150-1175	-"-	10-11	60-62	550-560[1]	60-62
7ХГ2ВМ	650-700	850-860	Масло, воздух	10-11	61-62	140-160 $200^{\pm 10}$	59-60 57-58
6Х6В3МФС	800-850	1050-1070	Селитра, масло	11	60-62	540-560[2] 480-500[3]	- 58-60
6Х4М2ФС	800-850	1050-1070	Масло	11	60-62	520-540	59-61

ЛЕКЦИЯ 24

Термическая обработка инструмента для горячего деформирования.

Классификация и назначение штамповых сталей

Группа сталей	Марка стали	Предельная температура, °С	Назначение
Умеренной теплостойкости и повышенной вязкости	5ХНМ, 5ХНВ	500 – 550 500 – 550	Молотовые штампы и вставки для них
	4ХМФС	>550	Штампы повышенной теплостойкости со стороной до 350 мм
	5Х2МНФ	>550	Крупные молотовые и прессовые штампы с повышенной стойкостью
Повышенной вязкости и теплостойкости	4Х5МФС 4Х5МФ1С 3Х3М3Ф	620 – 650	Прессовые матрицы, вставки, инструмент для высадки и выдавливания. Пресс-формы литья под давлением Zn, Mg, Al-сплавов
Высокой теплостойкости	3Х2В8Ф 5Х3В3МФС 2Х6В8М2К8	660 – 680 660 – 680 720 – 750	Матрицы прессования, вставки тяжелонагруженных штампов, пресс-формы литья Cu-сплавов

Режимы ПТО штамповых сталей

Марка стали	Изотермический отжиг			Полный отжиг		Высокий отпуск	
	$t_н$, °С	$t_в$, °С	НВ	t, °С	НВ	t, °С	НВ
5ХНМ	760-790	650-660	197-220	760-790	197-241	680-700	207-241
5ХНВ	760-790	650-660	209-229	760-790	207-241	700-720	207-241
4ХМФС	810-830	670-700	197-241	810-820	197-255	700-750	241
4Х5МФС 4Х5МФ1С	840-860	670-690	187-241	840-860	229-241	760-780	241-255
3Х2В8Ф	860-880	660-700	229-269	860-880	229-269	750-780	269
5Х3В3МФС	840-880	690-700	229-255	840-880	229-255	750-780	269
2Х6В8М2К8	880-900	640-705	241-269	880-900	241-269	780-820	269

$t_н$ – температура нагрева; $t_в$ – температура изотермической выдержки.

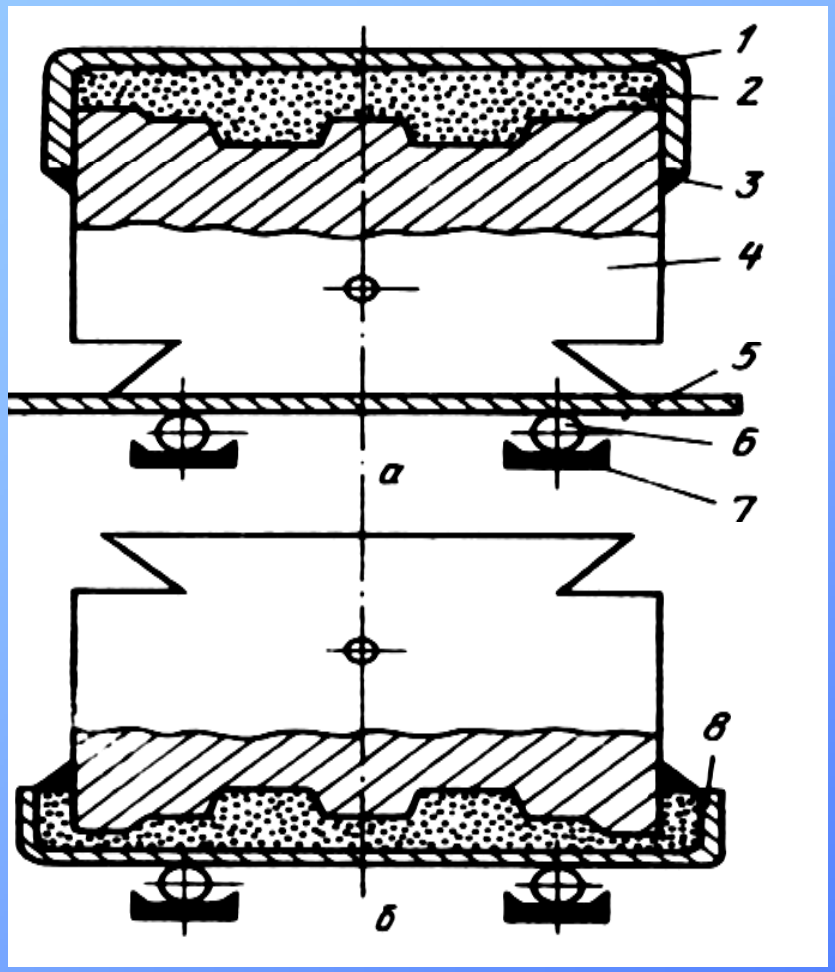
Температурные режимы ОТО штамповых сталей

Марка стали	Закалка			Отпуск гравюры		Отпуск хвостовика	
	Температура, °С		HRC	t, °С	HRC	t, °С	HRC
	подогрева	окончательн нагрева					
5ХНМ 5ХНВ 4ХМФС	700-750 700-750 700-750	840 860 840-860 910-930	56-60 56-59 53-55	560-580 500-550 400-480 520-550 400-500 580-600	36-39 38-42 42-46 38-42 42-45 44-46	580-610 620-640 650-680 - - -	33-37 30-37 25-30 - - -
4Х5МФС	700-750	1 000-1 020	50-52	530-560	47-49	-	-
3Х2В8Ф 5Х3В3МФС 2Х6В8М2К8	700-750 850-870 840-860	1 070-1 100 1 120-1 150 1 180-1 220	48-52 53-56 52-54	600-620 660-680 660-680 700-720	42-4842-46 54-56 50-51	- - - -	- - - -

Температурные режимы ОТО штамповых сталей

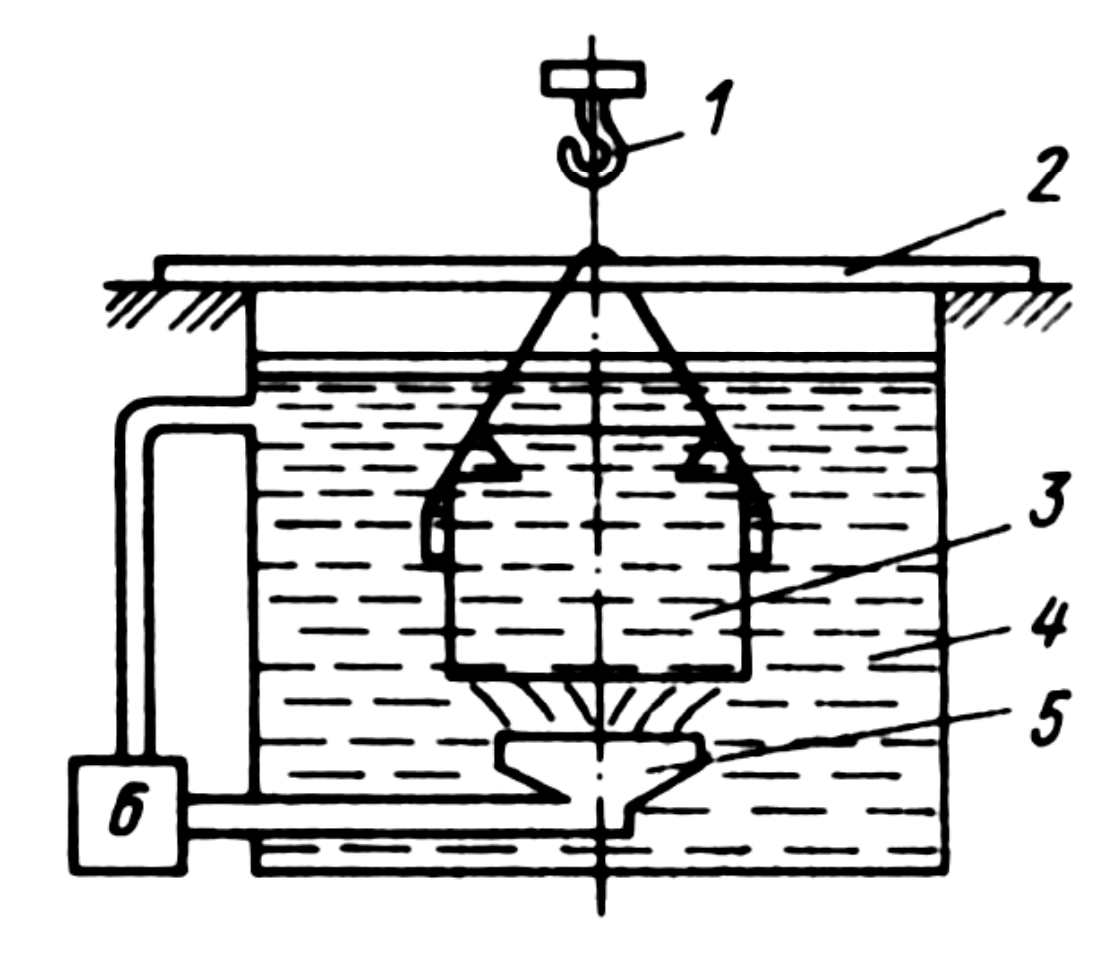
Марка стали	Закалка			Отпуск гравюры		Отпуск хвостовика	
	Температура, °С		HRC	t, °С	HRC	t, °С	HRC
	подогрева	оконч. нагрева					
5ХНМ 5ХНВ 4ХМФС	700-750 700-750 700-750	840 860 840-860 910-930	56-60 56-59 53-55	560-580 500-550 400-480 520-550 400-500 580-600	36-39 38-42 42-46 38-42 42-45 44-46	580-610 620-640 650-680 - - -	33-37 30-37 25-30 - - -
4Х5МФС	700-750	1 000-1 020	50-52	530-560	47-49	-	-
3Х2В8Ф 5Х3В3МФС 2Х6В8М2К8	700-750 850-870 840-860	1 070-1 100 1 120-1 150 1 180-1 220	48-52 53-56 52-54	600-620 660-680 660-680 700-720	42-4842-46 54-56 50-51	- - - -	- - - -

Схема упаковки для защиты гравюры штампа от окисления при нагреве под закалку



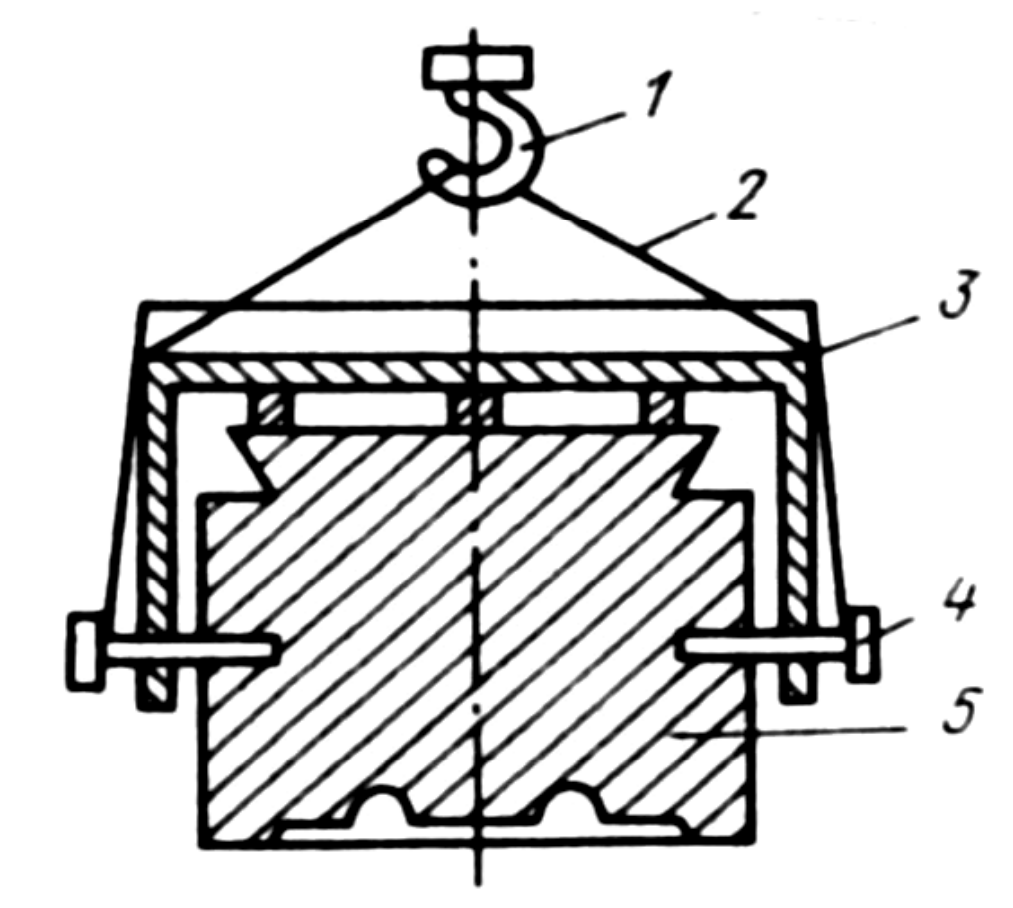
а – гравюрой вверх;
б - гравюрой вниз;
1 – крышка;
2– защитная смесь;
3 – огнеупорная обмазка;
4 – штамп;
5 – плита;
6 – шары;
7 – направляющие;
8 – поддон

Схема закалочного охлаждения крупногабаритного штампа



1 – крюк подъемно-транспортного устройства; 2 - стержень для подвески штампа;
3 – штамп;
4 – масляная ванна;
5 – устройство масляного душа;
6 - насос

Приспособление для односторонней закалки крупных штампов



1 – крюк подъемно-транспортного устройства;
2 – трос;
3 – короб с ребрами жесткости;
4 – штыри;
5 - штамп

ЛЕКЦИЯ 25

Термическая обработка измерительного инструмента

Режимы термической обработки инструментальных сталей на высокую твердость

Марка стали	Закалка			t, °С обработки холодом	Отпуск	
	t, °С	охлажд. среда	HRC		t, °С	HRC
Х	850-860	Масло	62-63	–70	120-130	65-66
12Х1	855-870	То же	63-65	–70	120-130	65-66
ХВГ	820-830	-"-	62-64	–70	120-130	64-66
ШХ15	830-850	-"-	62-64	–70	120-140	63-65
У10А-У13А	770-790	Вода	63-65	–50	120-130	64-66
50, 50Х, 55	840-890	То же	58-60	–50	150-180	60-62
Х12	1000-1030	Масло	63-65	–70	190-210	62-65
Х12М	1000-1030	То же	63-65	–70	180-200	62-65