

Лекция №10_Термическая обработка

1. Общие сведения

Термическая термообработка (Т.о.) – *термокинетическое воздействие на металл с целью получения требуемых свойств за счёт изменения внутреннего строения металла.*

Цель любого процесса Т.о. состоит в том, чтобы нагревом до определённой температуры и последующим охлаждением вызвать желаемое изменение строения металла.

Основные факторы воздействия при Т.о. – **температура и время**, поэтому режим любой термической обработки можно представить **графиком в координатах t** (температура) – **τ** (время). На рис. 1 представлен график простой Т.о., состоящей одного нагрева τ_H , одной выдержки τ_B и одного охлаждения τ_O .

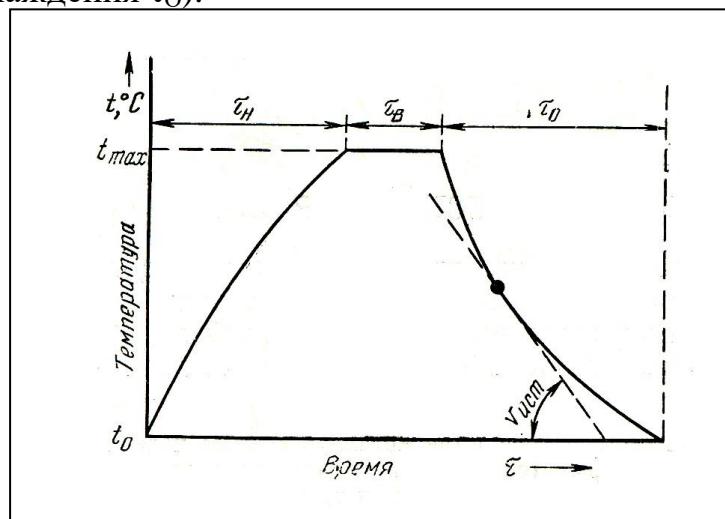


Рис. 1. График (режим) простой термической обработки: τ_H – время нагрева; τ_B – время выдержки; τ_O – время охлаждения; $\nu_{ист}$ – скорость охлаждения истинная

Режим Т.о. характеризуют следующие основные параметры:

- t_{max} – температура нагрева, т.е. максимальная температура, до которой был нагрет при Т.о.;
- τ_B – время выдержки сплава при температуре t_{max} ;
- $\nu_{нагр}$, $\nu_{охл}$ – скорость нагрева и охлаждения.

Научные основы теории Т.о. были заложены в замечательных работах Д.К.Чернова.

2. Виды термической обработки стали

Упрочнению термической обработкой подвергаются до 8-10% общей выплавки стали в стране. В машиностроении объем термического передела составляет до 40% стали, потребляемой этой отраслью. Номенклатура упрочняемых деталей велика – от деталей приборов, разнообразных деталей машин до крупных элементов металлургического, транспортного, энергетического оборудования.

Термическую обработку стали можно разделить на **одинарную** (отжиг, нормализация, закалка) и **двойную** (закалка + отпуск) обработку (табл. 1).

Отжиг применяется для *перевода металла изделия в равновесное (химическое или физическое) состояние*. При этом облегчается обрабатываемость резанием, снимаются остаточные напряжения разной природы (структурные, сварочные и пр.), стабилизируются размеры изделия. При отжиге изделие охлаждается с печью.

Нормализация заключается в *нагреве стали выше критической температуры (A_3 или A_{cm}), непродолжительной выдержке для прогрева и завершения фазовых превращений*

и охлаждения на воздухе. Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию стали и устраняет крупнозернистую структуру, полученную при литье, прокатке, ковке, штамповке.

Таблица 1. Технологические параметры т.о. стали

Наименование	Технологические параметры		Назначение
	Температура, °С	Охлаждение	
1	2	3	4
Одинарная обработка			
Диффузионный отжиг (гомогенизация)	1000-1100	С печью	Устранение дендритной неоднородности (ликвации)
Отжиг I рода	Ниже A_1		Снятие наклепа
Отжиг II рода	Ниже A_3		Перекристаллизация, снятие внутренних напряжений
Нормализация	Выше A_3 или $A_{ст}$	На воздухе	Измельчение структуры
Закалка	$A_3 + 30-50$ $A_1 + 30-50$	Скорость выше критической	Получение структуры мартенсита
Двойная обработка			
Закалка + низкий отпуск	150-200	На воздухе	Снятие закалочных напряжений, стабилизация размеров изделия
Закалка +	300-400		Повышение вязкости

средний отпуск			сти при сохранении упругости
Закалка + высокий отпуск (улучшение)	450-650	На воздухе или в воде	Оптимальное сочетание прочности и вязкости

Назначение нормализации различно в зависимости от состава стали. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. При повышении твердости металла нормализация повышает его обрабатываемость резанием и способствует получению более чистой обработанной поверхности.

Для отливок из среднеуглеродистой стали нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки и высокого отпуска. Механические свойства в этом случае будут несколько ниже, но изделия подвергнутся меньшим термическим напряжениям, чем это имеет место при закалке, и вероятность появления закалочных трещин практически исключается.

Закалка – термообработка, направленная на максимальное повышение твердости стали, заключающаяся в нагреве стали до температуры фазового превращения, выдержке и охлаждении с большой скоростью.

В результате закалки сталь получает структуру **мартенсита закалки**. Повышение твердости стали при закалке сопровождается снижением пластичности $\delta \rightarrow 0$. Возникают нежелательные закалочные напряжения (коробление и образование трещин).

Типичная структура закаленной стали – **мартенсит и остаточный аустенит**, которые являются неравновесными

фазами. При нагреве закаленной стали неравновесные фазы переходят в ферритно-цементитные смеси. Распад мартенсита и остаточного аустенита при отпуске идет по диффузионному механизму, т.е. связан с перераспределением углерода, и поэтому скорость процесса и структура ферритно-цементитной смеси отпуска в основном обусловлена температурой нагрева.

Закалка не является окончательной операцией термической обработки. Чтобы уменьшить хрупкость и напряжения, вызванные закалкой, и получить требуемые механические свойства, сталь после закалки обязательно подвергают отпуску.

Инструментальную сталь ($C > 0,7\%$) в основном подвергают закалке и отпуску для повышения твердости, износостойкости и прочности, а конструкционную сталь ($C < 0,7\%$) – для повышения прочности, получения достаточно высокой прочности и вязкости, а для деталей из цементуемых сталей также и высокой износостойкости.

3. Влияние отпуска на механические свойства стали

Отпуск – *заключительная операция упрочняющей термообработки, состоящая в нагреве стали до температур 100 – 600⁰С, выдержке 8 – 1 час., охлаждении на воздухе или в воде.*

Термическую обработку, заключающуюся в нагреве закаленной стали до температуры ниже точки A_1 , называют **отпуском**.

Распад мартенсита при отпуске влияет на все свойства стали. При $t_{отп} = 200 \dots 250^0\text{C}$ (**низкий отпуск**) уменьшается склонность стали к хрупкому разрушению. В случае низко-

температурного отпуска твердость закаленной и отпущенной стали не зависит от содержания в ней легирующих элементов и определяется в основном содержанием углерода в феррите.

Прочность и вязкость стали при низком отпуске несколько возрастают, вследствие, уменьшения макро- и микронапряжений и изменения структурного состояния. Повышение температуры отпуска до $t_{отп} = 500-600^0\text{C}$ заметно снижает $HВ, \sigma_T, \sigma_B$ и повышает ψ, KCU .

Формирование свойств при отпуске легированных сталей имеет особенности, обусловленные явлением отпускной хрупкости, состоящим в резком снижении ударной вязкости при определенных температурах отпуска.

Первый вид отпускной хрупкости, называемой **необратимой отпускной хрупкостью**, или **хрупкостью I рода**. Она наблюдается у закаленных легированных сталей при $t_{отп} = 250-400^0\text{C}$. Снижение ударной вязкости вызвано охрупчиванием стали из-за неоднородного распада мартенсита. В связи с этим для легированных сталей отпуск в районе температур 250-400⁰С не проводят.

Второй вид отпускной хрупкости, называемой **обратимой отпускной хрупкостью**, или **хрупкостью II рода**, наблюдается в сталях определенной легированности (30ХГС, 35ХГСА, 35Г2 и др.), если они после отпуска медленно охлаждаются (в печи или на воздухе).

Отпускная хрупкость II рода не возникает, если охлаждение изделия с температуры отпуска проводят в воде. Для массивных изделий обеспечить быстрое охлаждение водой не удастся. В этом случае для избежания отпускной хрупкости II рода применяют стали, дополнительно легированные **Mo** или **W** в небольших количествах.

В зависимости от назначения детали отпуск бывает низкий, средний и высокий.

4. Технология термической обработки стали

Подбором режима термообработки можно получить структуру металла, обладающую оптимальным для детали данного вида сочетанием механических свойств.

Режущий инструмент → твердость режущей кромки

Мерительный инструмент → твердость + стабильность размеров

Пружины → упругость + усталостная прочность

Валы, оси и др. → прочность + вязкость.

Упрочняющая термическая обработка стали состоит из **закалки и отпуска.**

Любая операция термической обработки включает три последовательных перехода: нагрев, выдержка и охлаждение.

Выбор режима термообработки предполагает назначение:

- температуры нагрева;
- времени выдержки в печи при температуре нагрева;
- скорости охлаждения (выбором соответствующего охладителя).

Режим закалки

Температура закалки t_3 выбирается с учетом полной аустенизации при нагреве доэвтектоидной стали и неполной аустенизации заэвтектоидной стали.

Доэвтектоидная сталь ($C < 0,8 \%$)

$$t_3 = A_{c3} + 30 \dots 50^0$$

линия GS $t_{\text{ауст}} = t_{G-S} = A_{c3}$

Заэвтектоидная сталь ($C > 0,8 \%$)

$$t_3 = A_{c1} = 30 \dots 50 \quad t_{\text{ауст}} = t_{SK} = A_{c1} = 727^0C$$

линия SK

Время выдержки τ изделия в печи зависит от габаритов закаливаемого изделия

$$\tau = k \cdot d, \text{ мин}$$

$k = 1$ мин/мм - углеродистая сталь, $k = 1,5$ мин/мм - легированная сталь, d - линейн. размер закаливаемого изделия, мм

Охладителем при закалке может быть вода, масло, воздух

Сталь 40, 45, 50 - вода

Сталь 65, 70 - масло

Сталь У7 – У12 - вода или масло для пружин.

Режим отпуска

Отпуск стали после закалки необходим для стабилизации структуры и размеров изделия, повышения пластичности и уменьшения внутренних напряжений.

Отпуск обеспечивает получение требуемого сочетания механических свойств металла за счет регулируемого температурой нагрева снижения прочности и повышения пластичности стали.

После отпуска изделие охлаждают на воздухе. Стали, склонные к отпускной хрупкости (30ХГС, 35Г2 и др.), после отпуска охлаждают в воде.

Низкий отпуск - $t_{\text{отп}} = 150 - 200^0C$ $\tau_{\text{отп}} = 8$ часов

Цель: снятие внутренних напряжений при сохранении высокой твердости.

Изделия: измерительный, режущий и деформирующий инструмент ($C > 0,8 \%$); детали после цементации и закалки ($C = 0,1 \dots 0,3 \%$)

Средний отпуск - $t_{отп} = 300 - 400^{\circ}\text{C}$, $\tau_{отп} = 1$ час.

Цель: повышение вязкости при сохранении высокой упругости.

Изделия: рессоры, пружины ($C = 0,5 - 0,65\%$).

Высокий отпуск - $t_{отп} = 450 - 650^{\circ}\text{C}$, $\tau_{отп} = 1$ час.

Цель: получение оптимального сочетания прочности и вязкости стали. **Изделия:** силовые детали машин (валы, оси, зубчатые колеса и др.)

Закалка + высокий отпуск называется **улучшением**. Улучшаемые стали - $C = 0,3 - 0,5\%$.

Оборудование для термообработки

Для выполнения термообработки необходимо иметь:

- нагревательную печь;
- охлаждающую ванну;
- твердомер для контроля твердости закаленных и отпущенных изделий;
- инструменты и приспособления (клещи кузнечные, контейнеры для мелких изделий и др.)

5. Поверхностное упрочнение стальных изделий

Некоторые детали (шейки шатунных валов, поршневые пальцы, зубчатые колеса и др.) должны иметь твердую поверхность и вязкую сердцевину. Твердая поверхность обеспечивает шатунной шейке износостойчивость, а вязкая сердцевина – сопротивление динамическим нагрузкам.

Для такого типа деталей применяют поверхностное упрочнение: поверхностную закалку, химико-термическую обработку и др.

Поверхностная закалка – закалка с нагревом до температуры закалки только поверхностного слоя детали.

Методы поверхностной закалки различаются способом нагрева поверхностного слоя детали:

- в расплавленных металлах или солях;
- пламенем ацетилено-кислородной или газовой горелки (пламенная закалка);
- в электролитах;
- вихревыми токами, индуцируемыми в детали переменным магнитным полем (закалка ТВЧ).

Пламенная закалка применяется для упрочнения крупногабаритных деталей (прокатные валки и др.) и при работе в полевых условиях.

Закалка ТВЧ наиболее широко применяется в автомобилестроении.

Глубина слоя металла, закаленного ТВЧ, зависит от частоты тока f , Гц

$$\delta \approx \frac{500}{\sqrt{f}}, \text{ мм}$$

В слое δ выделяется $\approx 87\%$ всей тепловой энергии.

Для стали 45 при 850°C

f , Гц	50; 10000; 70000; 400000
δ , мм	80; 5,5; 2,1; 0,9

Ток высокой частоты получают от специального машинного генератора ($f = 500 - 15000$ Гц) или от лампового генератора (f до 10^6 Гц).

Закаливаемая деталь или участок детали помещается в индуктор специальной формы. Каждое изделие имеет свой индуктор.

Охлаждение производится душевым устройством – спрейером.

Процесс закалки ТВЧ поддается механизации.

Закалка ТВЧ применяется для углеродистых сталей, содержащих более 0,4 % С и чугунов. Для легированных сталей закалку ТВЧ не применяют.

6. Химико-термическая обработка

ХТО называется процесс изменения химического состава поверхности изделия насыщением элементами (С, N, Al, Cr и др.) из внешней среды при высокой температуре. Процесс насыщения имеет диффузионную природу.

Цементация – процесс насыщения низкоуглеродистой стали (0,12 – 0,23% С) углеродом. В результате в поверхностном (диффузионном) слое содержание углерода повышается до 0,8–1,2% С. В диффузионном слое толщиной $\delta = 0,5 - 2$ мм получается высокоуглеродистая сталь, сердцевиной остается низкоуглеродистой.

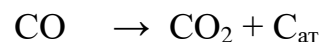
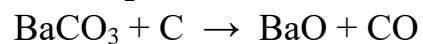
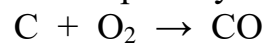
Температура цементации

$$T_{\text{цем}} = A_{\text{с}_3} + 50 - 70^{\circ}\text{C}$$

Стали: 10 – $A_{\text{с}_3} = 870^{\circ}\text{C}$; 15 – $A_{\text{с}_3} = 860^{\circ}\text{C}$, 20 – $A_{\text{с}_3} = 850^{\circ}\text{C}$; 15X – $A_{\text{с}_3} = 838^{\circ}\text{C}$; 20X – $A_{\text{с}_3} = 825^{\circ}\text{C}$

Для цементации изделие помещают в цементационный ящик с карбюризатором (богатая углеродом смесь). Карбюризатором является порошкообразная смесь: 70% древесный уголь, 20-25% BaCO_3 (углекислый барий), 3-5% Na_2CO_2 (кальцинир. сода).

При высокой температуре ($\approx 930^{\circ}\text{C}$) в цементационном ящике образуется атомарный углерод



$\text{C}_{\text{ат}}$ диффундирует в аустенит и образуется диффузионный слой требуемой толщины.

Выдержка $\tau_{\text{выд}}$ в печи изделия складывается из времени $\tau_{\text{нагр}}$ нагрева ящика до температуры цементации и времени $\tau_{\text{цем}}$ процесса цементации

$$\tau_{\text{выд}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{цем}}$$

$$\tau_{\text{нагр}} = R \cdot l, \text{ мин}$$

$R = 9$ мин/см; l - минимальный размер цементационного ящика, $\tau_{\text{цем}}$ зависит от требуемой толщины δ диффузионного слоя и размеров ящика l_{min}

L min	Время $\tau_{\text{цем}}$, час для δ (мм)	
	0,7-0,9	1,2-1,5
15 см	5,5-6,5	9-11
25 см	7,5-8,5	11-14

После цементации ящики охлаждают на воздухе до $400-500^{\circ}\text{C}$ и раскрывают.

Цементованные изделия подвергают закалке и низкому отпуску. Температуру закалки выбирают, ориентируясь на количество углерода в диффузионном слое.

7. Закаливаемость и прокаливаемость стали.

Торцовая закалка

Закаливаемость - способность стали повышать твердость в результате закалки.

Закаливаемость стали определяется в первую очередь содержанием в стали углерода. Чем больше в мартенсите углерода, тем выше его твердость (см. формулу 1). Легирующие элементы оказывают относительно небольшое влияние на закаливаемость стали.

Прямая задача закаливваемости: зная содержание углерода в стали, определить твёрдость мартенсита (формула 1).

Обратная задача закаливваемости: зная необходимую твёрдость закалённой стали (HRC_M), определить содержание углерода, обеспечивающее требуемую твёрдость мартенсита

$$C = 13,9 - 1,35855156 \cdot HRC_M + 0,0487592 \cdot HRC_M^2 - 0,0007566 \cdot HRC_M^3 + 0,00000432 \cdot HRC_M^4, \% \quad (4)$$

здесь твёрдость мартенсита углеродистой и легированной стали $HRC_M = 30 \dots 65$.

Прокаливаемость - способность стали получать закаленный слой с мартенситной или троосто-мартенситной структурой и высокой твердостью на ту или иную глубину. Прокаливаемость определяется критической скоростью охлаждения, зависящей от состава стали.

За глубину закаленного слоя условно принимают расстояние от поверхности до зоны с полумартенситной структурой (50% мартенсита + 50% троостита). Твердость полумартенситной структуры $HRC_{ПМ}$ (**полумартенситная твердость**) зависит в основном от содержания углерода и в меньшей степени от легирования стали.

Прямая задача прокаливаемости: определение $HRC_{ПМ}$ по заданному количеству углерода в стали $HRC_{ПМ} = 18,756 + 20,011 \cdot C + 198,63 \cdot C^2 - 230,07 \cdot C^3$, (5) здесь $HRC_{ПМ}$ – искомое значение полумартенситной твёрдости; C – известное значение содержания углерода в стали, %.

Обратная задача прокаливаемости: определение требуемого содержания углерода в стали C для достижения заданного значения $HRC_{ПМ}$

$$C = 0,3776 - 0,0281 \cdot H + 0,001H^2 - 7E-06 \cdot H^3, \quad (6)$$

здесь C – искомое значение содержания углерода в стали, %; H – известное значение полумартенситной твёрдости $HRC_{ПМ}$.

Прокаливаемость стали по ГОСТ5657–69 определяют методом **торцовой закалки**.

При этом цилиндрический образец, нагретый до температуры закалки, помещают в специальную установку, где он охлаждается водой с торца (рис. 2).

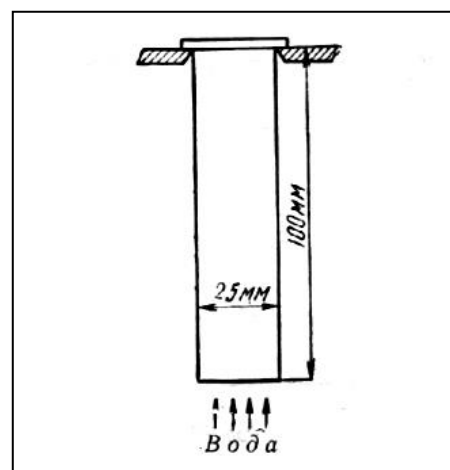


Рис. 2. Схема закалки образца при испытании на прокаливаемость методом торцовой закалки

После охлаждения образца до комнатной температуры измеряют твердость его поверхности по образующей цилиндра (на лыске).

По этим данным определяют **характеристическое расстояние** $X_{ПМ}$ для стали, из которой изготовлен образец. $X_{ПМ}$ представляет собой расстояние по образующей от торца цилиндрического образца для торцовой закалки до точки, в которой твердость металла равна $HRC_{ПМ}$ (рис. 3).

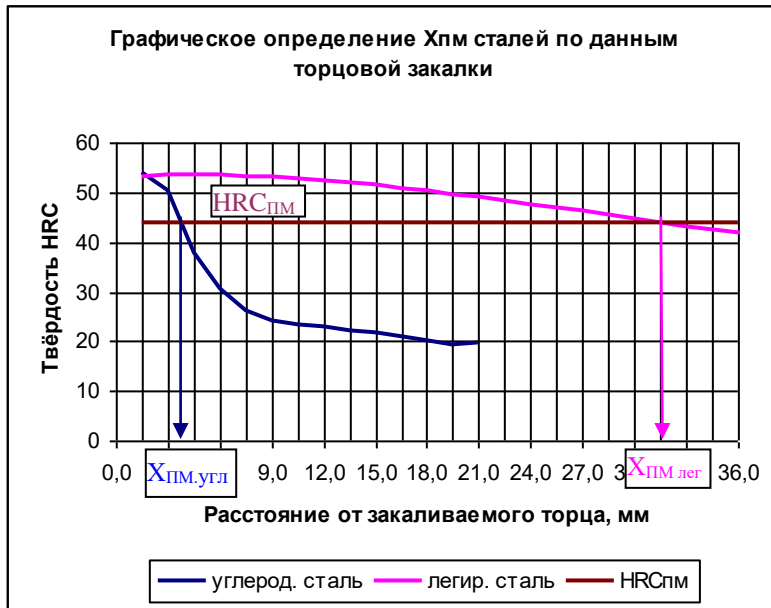


Рис. 3. Графическое определение характеристического расстояния стали по данным торцевой заковки.

10. Определение критического диаметра изделия по номограмме М.Е. Блантера

Диаметр заготовки, в центре которой после заковки в данной охлаждающей среде образуется полумартенситная структура, называют **критическим диаметром** D_K ($D_{КВ}$, $D_{КМ}$, $D_{КВОЗ}$). Для определения критического диаметра используется номограмма прокаливаемости М.Е. Блантера.

Пользование номограммой: На номограмме нанесены линии, позволяющие значение идеального критического диаметра D_{∞} перевести в критические диаметры в воде $D_{КВ}$, в масле $D_{КМ}$, на воздухе $D_{КВОЗ}$ для тел, указанных выше геометрических форм. Этот переход в виде шагов 1→2→3 вы-

полняется по номограмме графически (см. ключ номограммы).

- Шаг 1 → $X_{пм}$ откладывается на линии характеристического расстояния (определяется по данным торцевой заковки (см. рис. 17));
- Шаг 2 → $D_{К\infty}$ определяется по номограмме перенесением значений $X_{пм}$ на ось абсцисс идеального критического диаметра $D_{К\infty}$;
- Шаг 3', 3'' → $D_{КВ}$ (критический диаметр в воде), $D_{КМ}$ (критический диаметр в масле), определяются по номограмме перенесением соответствующих точек на линии критических диаметров для тел заданной геометрической формы (пластина, шар, вал).

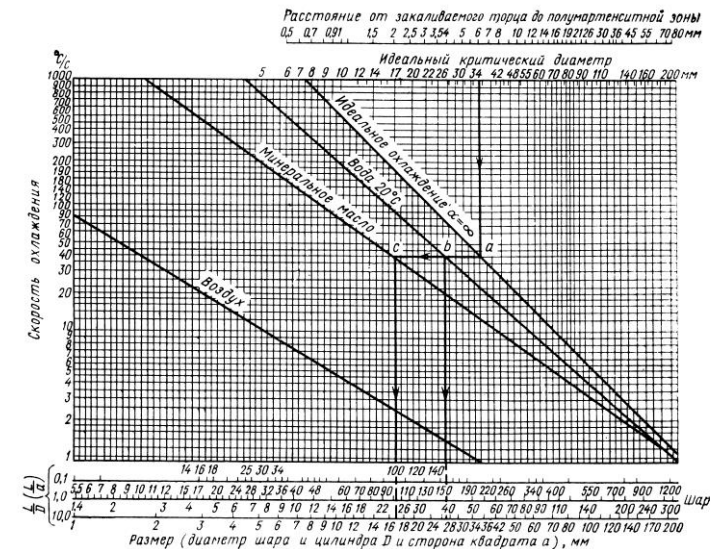


Рис. 4. Номограмма прокаливаемости М.Е.Блантера