

1. Общие сведения по выбору материала детали

Выбор материала детали осуществляется, исходя из условий работы детали в изделии, характера и величины действующей на деталь нагрузки, стоимостных показателей, а так же дополнительных требований, предъявляемых к материалу по техническому заданию на проектирование.

Массивные малонагруженные детали, не испытывающие значительных динамических нагрузок (детали строительных конструкций, сельхозмашин и металлургического оборудования), рекомендуется изготавливать из серого чугуна, как имеющего наиболее низкую стоимость, высокие литейные свойства и обрабатываемость резанием. Выбор конкретной марки чугуна производить, исходя из значения его предела прочности на растяжение σ_B :

$$\sigma_B \geq 2,4 [\sigma]_{\text{доп}},$$

где $[\sigma]_{\text{доп}}$ – допустимое напряжение на детали по техническому заданию.

Высокопрочные чугуны, как обладающие определенной пластичностью и вязкостью, могут быть рекомендованы в качестве материалов зубчатых колес и коленчатых валов автомобильных двигателей.

Тонкостенные детали высокой прочности, подверженные вибрационным и ударным знакопеременным нагрузкам (картеры, фланцы, детали редукторов и муфт), могут изготавливаться из ковких чугунов путем графитизирующего отжига отливок из белого чугуна.

Детали, необходимые физико-механические и технологические свойства которых не могут быть обеспечены при использовании чугунов, рекомендуется изготавливать из углеродистых и легированных сталей.

2. Классификация деталей по условиям работы и выбор необходимой марки стали

Учитывая условия эксплуатации и встречающиеся на практике виды разрушений и износа, основную номенклатуру деталей, изготавливаемых из сталей, можно разбить на 3 – и группы:

Детали группы 1, как работающие в условиях износа: зубчатые колеса, вал-шестерни, шлицевые валы, звездочки, распределительные валы, кулачки, пальцы и т.п.

Материал детали должен обладать высокой твердостью и износостойкостью поверхностного слоя при вязкой и достаточно прочной сердцевине. Такие свойства обеспечивают т. н. цементуемые стали - низкоуглеродистые и легированные стали после цементации, закалки и низкого отпуска. Наиболее часто применяемые цементуемые стали и их свойства представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства цементуемых сталей после цементации, закалки и низкого отпуска

Марка стали	Механические свойства						твёрдость		Прокаливаемость, D_K , мм
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_{-1}	δ	Ψ	сердцевины	поверхности		
	МПа			%		HB, МПа	HRC	вода/масло	
10	400	250	200	25	55	1370	56-62	5-10/ -	
25	620	380	230	17	40	1700	54-62	12-10/ -	
20X	800	650	330	11	40	2500	54-62	- /8-20	
18ХГТ	1000	900	400	9	50	3000	62	30/20-40	
12ХН3А	1000	850	400	12	55	3000	56-62	80/70	
18Х2Н4МА	1150	850	460	12	50	4200	58-62	100/95	

Оптимальная глубина цементованного слоя для большинства деталей машин 1,0-1,4 мм. Рекомендуется газовая цементация при температуре 930-950°C; время цементации зависит от глубины цементованного слоя (скорость цементации 0,1 мм/ч).

Нитроцементация проводится при температурах 820-860°C со

скоростью 0,15 мм/ч; глубина слоя 0,2-0,8 мм.

Режимы термической обработки, используемой после цементации, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Рекомендуемые режимы термической обработки деталей из цементуемых сталей после цементации

Марка стали	Термическая обработка		
	вид *	температура, °С	охлаждающая среда
10	З	770	вода
	О	180	воздух
25	З	770	вода
	О	180	воздух
20Х	З	820	масло
	О	200	воздух
18ХГТ	З	850	масло
	О	200	воздух
12ХН3А**	О	650	воздух
	З	820	масло
	О	200	воздух
18Х2Н4МА**	О	650	воздух
	З	800	масло
	О	200	воздух

- * Вид термической обработки: З-закалка, О-отпуск.
- ** Стали 12ХН3А, 18Х2Н4МА после цементации подвергаются промежуточному высокому отпуску для снижения количества остаточного аустенита в цементованном слое.

Детали группы 2, как работающие в условиях значительных знакопеременных напряжений и ударных нагрузок: валы, оси, шпиндели, коленчатые валы, штоки, шатуны, храповики, плунжеры, гильзы цилиндров, червяки и т.п.

Материал должен иметь высокий предел выносливости, необходимую прокаливаемость, достаточную ударную вязкость, для некоторых поверхностей высокую износостойкость. Такие свойства обеспечивают улучшаемые среднеуглеродистые и легированные стали (табл. 3).

Таблица 3

Режимы необходимой термической обработки и механические свойства сталей после улучшения

Марка стали	Термическая обработка		Механические свойства			T_{50} , °C	D_K , мм
	Закалка, °C; среда	Отпуск, °C; среда	σ_B	$\sigma_{0,2}$	HV		
			МПа				
35	850; вода	550; вода, масл	700	520	1950	-20	20
45	850; то же	550; то же	800	580	2400	-20	22
40X	860; масло	500; то же	1000	800	2400	-40	30
50X	830; то же	520; то же	1100	850	2900	-35	35
40XH	820; то же	550; то же	1000	800	2500	-60	55
30XГСА	880; то же	540; то же	1100	850	2700	-20	40
40XНМА	850; то же	620; то же	1100	950	2700	-80	75
38XНЗМА	850; то же	600; воздух	1200	1100	2700	-90	150

Для деталей этой группы, работающих в условиях сжатия-растяжения (оси, штоки, шатуны), требуется однородность свойств по всему сечению, для чего необходима сквозная прокаливаемость:

$$D_K \geq D_{\text{детали}};$$

- для деталей, работающих на изгиб и кручение, достаточна прокаливаемость только на четверть:

$$D_K \geq 0,25 D_{\text{детали}}.$$

В массовом производстве для повышения долговечности тех мест, которые должны иметь высокую твердость поверхности и сопротивление износу (шейки коленчатых валов, кулачки, зубья шестерен и т.п.), используют закалку с индукционным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) на толщину закаленного слоя 1-3 мм, что обеспечивает твердость поверхности 45-56 HRC. Однако метод поверхностной закалки малоэффективен для деталей сложной формы. В местах обрыва закаленного слоя, не охватывающего галтели, выточки и другие концентраторы, возникают высокие остаточные напряжения растяжения, снижающие выносливость. Этого недостатка лишена химико-термическая обработка (ХТО), обеспечива-

ющая равномерное упрочнение, высокую выносливость и износостойкость.

Один из видов ХТО – азотирование используют для среднеуглеродистых сталей, легированных, как правило, хромом, алюминием и молибденом (сталь 38ХМЮА), нитриды которых в поверхностном слое детали обладают наивысшей твердостью. Процесс проводят в среде аммиака при 480-520°С. Продолжительность выдержки деталей определяется необходимой глубиной слоя (0,3-0,6 мм); скорость азотирования 0,01 мм/ч; охлаждение с печью до 100-150°С. До азотирования детали подвергают улучшению и чистовой механической обработке, после азотирования детали только шлифуют или полируют.

Недостатки азотирования, в сравнении с цементацией, – большая длительность процесса и значительно меньшее сопротивление контактной усталости. Контактная выносливость – важнейший фактор определяющий ресурс работы зубчатых передач. Кроме того, азотированные зубья хуже переносят перегрузки, ударные, пиковые и вибрационные нагрузки.

Вместо азотирования может быть применена нитроцементация, особенно для нешлифуемых деталей. Нитроцементацию выполняют в среде природного газа и аммиака при температуре 850°С с последующей закалкой и низким отпуском.

Высокую эффективность обеспечивает комбинированное упрочнение – закалка ТВЧ и поверхностное пластическое деформирование (ППД).

Детали группы 3, как работающие при значительных упругих деформациях: рессоры, пружины.

Для обеспечения работоспособности силовых упругих элементов применяют рессорно-пружинные стали, имеющие высокие пределы упругости σ_e , выносливости σ_{-1} и релаксационную стойкость. Этим требованиям удовлетворяют стали с содержанием углерода 0,5-0,7% – углеродистые и легированные, подвергаемые закалке и среднему отпуску на структуру троостит отпуска. Типичные представители различных классов рессорно-пружинных сталей представлены в табл. 4.

Детали должны иметь однородную структуру по всему сечению, поэтому необходима их сквозная прокаливаемость. В результате выбор соответствующей марки стали для рессор и пружин осуществляется на основании значений $\sigma_{0,2}$ и σ_b материалов и их критического диаметра закалки ($D_K \geq D_{детали}$).

Таблица 4

Свойства термически упрочненных пружинно-рессорных сталей

Марка стали	Механические свойства						D_K , мм	$T_{раб}$, °C
	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_{-1}	δ	ψ	HRC		
	МПа			%				
65	980	785	400	10	35	40-45	15	≤ 100
65Г	980	785	400	8	30	42-48	22	≤ 100
60С2	1270	1175	500	6	25	37-47	28	≤ 200
50ХФА	1270	1080	500	8	35	40-47	30	≤ 300

Углеродистые стали 60, 65, 70, 60Г, 65Г, 70Г имеют низкую релаксационную стойкость и малую прокаливаемость и по этой причине применяются для изготовления пружин с сечением проволоки только до 6 мм. Дешевые кремнистые стали 55С2, 60С2, 70С3А применяются для пружин и рессор сечением (толщиной) до 18 мм. Стали 60С2ХА и 60С2Н2А прокаливаются в сечениях соответственно до 50 и 80 мм и применяются для крупных тяжело нагруженных и особо ответственных пружин и рессор.

Для деталей всех трех групп допустимые рабочие напряжения выбираемой стали определяются из неравенств: $\sigma_{0,2}(\sigma_T) \geq 1,6 [\sigma]_{доп}$ и $\sigma_b \geq 2,4 [\sigma]_{доп}$.

3. Варианты заданий (исходные данные)

1. Шлицевой вал $\varnothing 150$ мм рассчитан на $[\sigma]_{доп} = 350$ МПа, твердость поверхности шлицев $HRC \geq 50$.
2. Вал $\varnothing 100$ мм рассчитан на $[\sigma]_{доп} = 400$ МПа.
3. Коленчатый вал с диаметром шеек 80 мм рассчитан на $[\sigma]_{доп} = 220$ МПа, твердость шеек $HRC \geq 50$.
4. Ось $\varnothing 80$ мм рассчитана на $[\sigma]_{доп} = 250$ МПа.

5. Шток $\varnothing 80$ мм рассчитан на $[\sigma]_{\text{доп}} = 250$ МПа.
6. Шатун $\varnothing 100$ мм рассчитан на $[\sigma]_{\text{доп}} = 250$ МПа.
7. Шпиндель $\varnothing 60$ мм рассчитан на $[\sigma]_{\text{доп}} = 250$ МПа.
8. Звездочки цепных передач толщиной 10 мм, $[\sigma]_{\text{доп}} = 250$ МПа, твердость поверхности зуба $\text{HRC} \geq 50$.
9. Вал-шестерня $\varnothing 176$ мм рассчитана на $[\sigma]_{\text{доп}} = 320$ МПа, твердость поверхности зуба $\text{HRC} \geq 50$.
10. Вал $\varnothing 40$ мм рассчитан на $[\sigma]_{\text{доп}} = 350$ МПа.
11. Шестерня $\varnothing 88$ мм рассчитана на $[\sigma]_{\text{доп}} = 320$ МПа, твердость поверхности зуба $\text{HRC} \geq 50$.
12. Червяк $\varnothing 100$ мм рассчитан на $[\sigma]_{\text{доп}} = 340$ МПа, твердость рабочих поверхностей $\text{HRC} \geq 50$.
13. Червяк $\varnothing 60$ мм рассчитан на $[\sigma]_{\text{доп}} = 400$ МПа, твердость рабочих поверхностей $\text{HRC} \geq 50$.
14. Лист рессоры толщиной 25 мм рассчитан на $[\sigma]_{\text{доп}} = 500$ МПа.
15. Лист рессоры толщиной 8 мм рассчитан на $[\sigma]_{\text{доп}} = 400$ МПа.

4. Примеры выполнения задания

Пример 1.

Дано: Шлицевой вал $\varnothing 100$ мм рассчитан на $[\sigma]_{\text{доп}} = 250$ МПа, твердость поверхности шлицев $\text{HRC} \geq 50$.

Порядок выполнения задания:

1. Установление группы детали.

Вал, как элемент, работающий в условиях значительных напряжений и ударных нагрузок, относится к II группе деталей и должен изготавливаться из улучшаемой стали.

2. Выбор марки улучшаемой стали, исходя из величины допустимого напряжения.

Исходя из выполнения неравенств

$$\sigma_{0,2}(\sigma_T) \geq 1,6 [\sigma]_{\text{доп}} \text{ и } \sigma_b \geq 2,4 [\sigma]_{\text{доп}}$$

значение условного предела текучести (предела текучести) выбранной стали должно быть не менее 400 МПа, а предела прочности не менее 600 МПа. Такому требованию удовлетворяет качественная углеродистая сталь марки 35 после улучшения со значениями $\sigma_{0,2}$ и σ_b 520 МПа и 700 МПа (табл. 3), соответственно.

3. Проверка выбранной марки стали на прокаливаемость.

Вал, как элемент, передающий крутящий момент, работает в условиях изгиба и кручения, когда механическим нагрузкам подвергаются только наружные слои детали. Поэтому изделие достаточно прокаливать на глубину $\geq 0,25D$. Таким образом, критический диаметр выбранной стали должен быть не меньше четверти диаметра вала.

Для вала диаметром 100 мм требуется сталь с критическим диаметром закалки не менее 25 мм. Поскольку у стали 35 величина $D_K = 20$ мм (табл. 3) эта сталь для изготовления данного вала не подходит. Выбираем сталь из табл. 3 со значением $D_K \geq 25$ мм. Это сталь 40X с величиной $D_K = 30$ мм. Химический состав стали по справочным данным представлен ниже.

Содержание C – 0,36-0,44%; Si – 0,17-0,37%; Mn – 0,50-0,80%; Ni, Cu $\leq 0,35\%$; S, P $\leq 0,35\%$.

4. Проверка стали на необходимую величину твердости.

Согласно заданию шлицевая часть вала должна иметь твердость не менее 50HRC, что составляет $HV \geq 4810$ МПа. Согласно табл. 3 твердость стали 40X составляет только 2400 МПа и, следовательно, шлицевые участки требуют дополнительной упрочняющей обработки, например, поверхностной закалки токами высокой частоты.

5. Определение температурных и временных параметров окончательной термической обработки.

В соответствии с данными п. 2 операции термической обработки стали проводим при следующих температурах:

- закалку - при $T_3 = 860^\circ\text{C}$,
- высокий отпуск - при $T_0 = 500^\circ\text{C}$.

Охлаждение детали при закалке и после отпуска проводим в масле ($V_{\text{охл}} = 50^\circ\text{C}/\text{с}$).

Время нагрева до температуры аустенизации под закалку определим по формуле, известной из курса лекций

$$t_{\text{н зак}} = K \cdot D = 75 \cdot 100 = 7500 \text{ с} = 125 \text{ мин}$$

при $K = 75 \text{ с}/\text{мм}$ (для легированных сталей).

Время выдержки для осуществления процесса аустенизации

$$t_{\text{в зак}} = 0,2 \quad t_{\text{н зак}} = 0,2 \cdot 125 = 25 \text{ мин}$$

Время охлаждения детали в процессе закалки (в масле) от $T_3 = 860^\circ\text{C}$ до комнатной температуры $T_{\text{комн}} = 20^\circ\text{C}$

$$t_{\text{охл зак}} = (T_3 - T_{\text{комн}}) / V_{\text{охл}} = (860 - 20) / 50 = 17 \text{ с} = 0,3 \text{ мин.}$$

Время нагрева детали до температуры высокого отпуска $t_{\text{н отп}}$ и время необходимой выдержки при этой температуре $t_{\text{в отп}}$ определим из формулы

$$t_{\text{н отп}} = t_{\text{в отп}} = 10 + \delta = 10 + 100 = 110 \text{ мин,}$$

где δ – характерный размер (для нашего случая диаметр) детали, мм.

Время охлаждения детали от температуры $T_0 = 500^\circ\text{C}$ до комнатной температуры $T_{\text{комн}} = 20^\circ\text{C}$

$$t_{\text{охл отп}} = (T_0 - T_{\text{комн}}) / V_{\text{охл}} = (500 - 20) / 50 = 9,6 \text{ с} = 0,16 \text{ мин.}$$

6. Построение диаграммы окончательной термической обработки

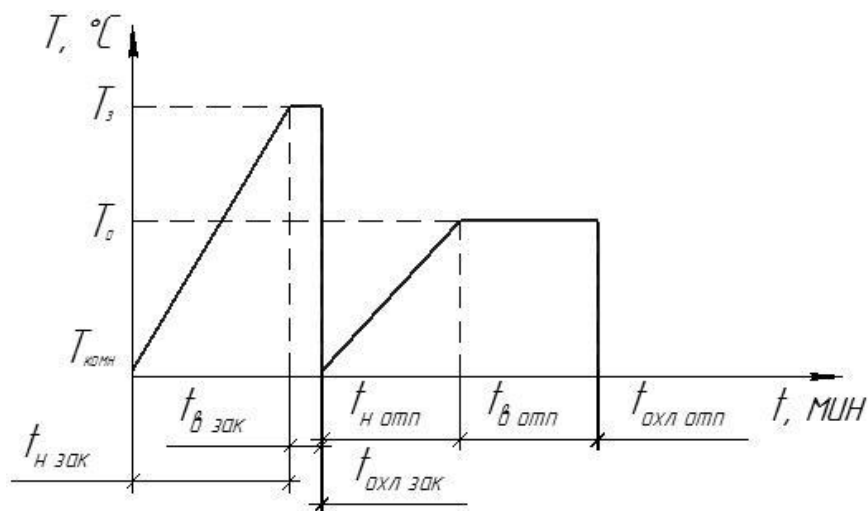


Рис.1 Диаграмма термической обработки стали 40Х

Пример 2.

Дано: звездочка цепной передачи толщиной 20 мм, $[\sigma]_{\text{доп}} = 350$ МПа, твердость поверхности зуба $HRC \geq 50$.

Порядок выполнения задания:

1. Установление группы детали.

Звездочка, как элемент, работающий в условиях трения, относится к I группе деталей, должна изготавливаться из низкоуглеродистой или низколегированной цементуемой стали и подвергаться цементации, закалке и низкому отпуску.

2. Выбор марки цементуемой стали, исходя из величины допустимого напряжения.

Исходя из выполнения неравенств

$$\sigma_{0,2}(\sigma_T) \geq 1,6 [\sigma]_{\text{доп}} \text{ и } \sigma_B \geq 2,4 [\sigma]_{\text{доп}}$$

значение условного предела текучести (предела текучести) выбранной стали должно быть не менее 560 МПа, а предела прочности не

менее 840 МПа. Такому требованию удовлетворяет сталь марки 18ХГТ после цементации, закалки и низкого отпуска со значениями $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{\text{в}}$ 900 МПа и 1000 МПа (табл. 1), соответственно.

3. Проверка выбранной марки стали на прокаливаемость.

Все детали из цементуемых сталей должны прокаливаться насквозь. Поэтому критический диаметр выбранной стали должен быть не меньше характерного размера (для нашего случая толщины) детали.

Для звездочки толщиной 20 мм требуется сталь с критическим диаметром закалки не менее 20 мм. Поскольку у стали 18ХГТ величина $D_{\text{км}} = 20 - 40$ мм (табл. 1) эта сталь для изготовления данной звездочки подходит. Химический состав стали по справочным данным представлен ниже.

Содержание $C - 0,17-0,23\%$; $Si - 0,17-0,37\%$; $Mn - 0,8-1,1\%$; $Ti - 0,03 - 0,09$; $Ni, Cu \leq 0,30\%$; $S, P \leq 0,35\%$.

4. Проверка стали на величину твердости.

Согласно заданию поверхность зуба звездочки должна иметь твердость не менее 50HRC. Согласно табл. 1 твердость поверхности деталей из стали 18ХГТ после цементации, закалки и низкого отпуска составляет 62HRC и, следовательно, с точки зрения обеспечения необходимой твердости, сталь 18ХГТ подходит.

5. Определение температурных и временных параметров окончательной термической обработки.

В соответствии с данными п. 2 за температуры операций микро-термической обработки принимаем:

- при цементации $T_{\text{ц}} = 930^{\circ}\text{C}$,
- при закалке $T_{\text{з}} = 850^{\circ}\text{C}$,
- при низком отпуске $T_{\text{о}} = 200^{\circ}\text{C}$.

Охлаждение детали после цементации и низкого отпуска проводим на спокойном воздухе ($V_{\text{охл}} \sim 3^{\circ}\text{C}/\text{с}$), после закалки - в масле ($V_{\text{охл}} = 50^{\circ}\text{C}/\text{с}$).

Время нагрева до температуры цементации $t_{\text{н цем}}$ примем равным времени нагрева под закалку $t_{\text{н зак}}$ и определим по формуле, известной из курса лекций

$$t_{\text{н цем}} = t_{\text{н зак}} = K D = 75 \cdot 20 = 1500 \text{ с} = 25 \text{ мин}$$

где K - коэффициент, равный для легированных сталей 75 с/мм,
 D – характерный размер, соответствующий для данного случая толщине детали (20 мм).

Время выдержки при цементации $t_{в\text{ цем}}$ рассчитаем, исходя из скорости цементации ($V_{ц} = 0,1$ мм/ч) и необходимой толщины цементованного слоя ($\delta_{ц} = 1,2$ мм)

$$t_{в\text{ цем}} = \delta_{ц} / V_{ц} = 1,2 / 0,1 = 12 \text{ час} = 720 \text{ мин}$$

Время охлаждения после цементации (среда воздух)

$$t_{охл\text{ цем}} = (T_{ц} - T_{комн}) / V_{охл} = (930 - 20) / 3 = 303 \text{ с} = 5,1 \text{ мин.}$$

Время выдержки для осуществления процесса аустенизации перед закалкой

$$t_{в\text{ зак}} = 0,2 \quad t_{н\text{ зак}} = 0,2 \quad 25 = 5 \text{ мин}$$

Время охлаждения детали в процессе закалки (в масле) от $T_3 = 850^{\circ}\text{C}$ до комнатной температуры $T_{комн} = 20^{\circ}\text{C}$

$$t_{охл\text{ зак}} = (T_3 - T_{комн}) / V_{охл} = (850 - 20) / 50 = 17 \text{ с} = 0,3 \text{ мин.}$$

Время нагрева детали до температуры низкого отпуска $t_{н\text{ отп}}$ и время необходимой выдержки при этой температуре $t_{в\text{ отп}}$ определим из формулы

$$t_{н\text{ отп}} = t_{в\text{ отп}} = 120 + \delta = 120 + 20 = 140 \text{ мин,}$$

где δ – характерный размер (для нашего случая толщина) детали, мм.

Время охлаждения после низкого отпуска (среда воздух)

$$t_{охл\text{ отп}} = (T_о - T_{комн}) / V_{охл} = (200 - 20) / 3 = 60 \text{ с} = 1 \text{ мин.}$$

6. Построение диаграммы окончательной термической обработки

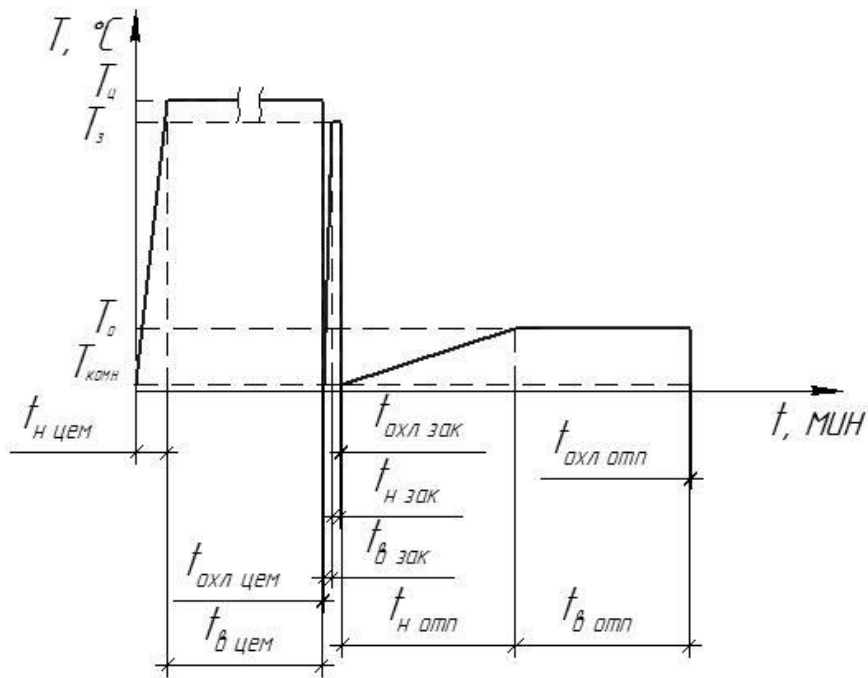


Рис.2 Диаграмма термической обработки стали 18ХГТ