

угле с добавлением 10-15% кальцинированной соды.

Нормализация. Процесс нагрева стали на 30-50 °С выше температур, соответствующих линии A_{c3} (см. рис. 1); выдержку при этой температуре и последующее охлаждение на спокойном воздухе называют нормализацией.

2. Температура нагрева сталей при нормализации

Содержание С, %	$t_{\text{норм}}, ^\circ\text{C}$	Содержание С, %	$t_{\text{норм}}, ^\circ\text{C}$
0,1	От 920 до 940	0,8	От 775 до 790
0,2	» 890 » 910	1,0	» 830 » 850
0,4	» 850 » 870	1,2	» 900 » 920
0,6	» 800 » 820	1,4	» 950 » 970

Примечание. С – углерод; $t_{\text{норм}}$ – температура нагрева при нормализации.

Нормализацию применяют, в основном, для снятия внутренних напряжений и улучшения обрабатываемости стали. Практически температуру нормализации углеродистых сталей можно выдерживать в пределах, указанных в табл. 2.

Закалка сталей

Способы закалки. Операцию, при которой доэвтектоидную сталь нагревают на 20-30 °С выше температур, соответствующих линии A_{c3} , а эвтектоидную и заэвтектоидную стали – на 20-30 °С выше линии A_{c1} и после выдержки при этой температуре быстро охлаждают в воде, масле или на воздухе (в зависимости от состава стали), называют *закалкой* (рис. 3).

В результате закалки получают неравномерные структуры, так как быстрое охлаждение препятствует фазовым превращениям. После закалки сталь становится твердой и хрупкой. Структура закаленной стали состоит из мартенсита, нерастворившихся карбидов и остаточного аустенита. Заэвтектоидную сталь не следует нагревать перед закалкой до температур, находящихся на диаграмме выше

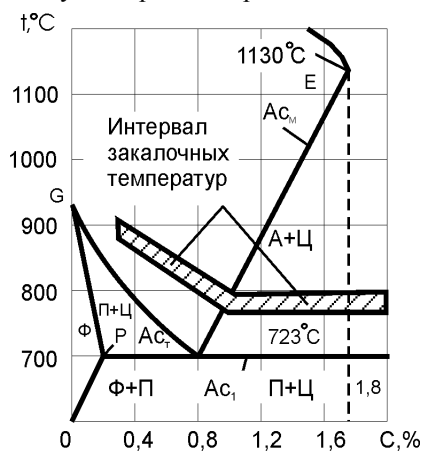


Рис. 3. Диаграмма закалочных температур для углеродистых сталей

линии A_{c_m} , так как при этой температуре происходит перегрев стали и снижается качество технологической оснастки. Способы закалки отличаются условиями нагрева и охлаждения стали. Выбор способа закалки зависит от состава стали, требуемых свойств и сложности изделий.

Различают следующие способы закалки: полную, неполную, с непрерывным охлаждением, изотермическую, ступенчатую, с подстуживанием, проводимую в двух жидких средах или с ограниченным пребыванием в охлаждающей среде, с самоотпуском, сквозную, несквозную, обычную, чистую, светлую, с обработкой холодом. Сочетание способов позволяет создать в закаленной стали структуру,

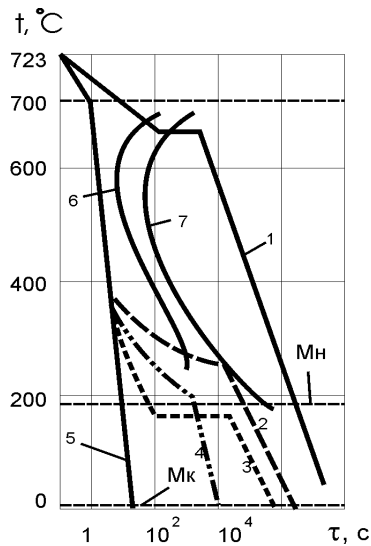


Рис. 4. Кривые охлаждения при различных способах термической обработки стали:
 1 – изотермический отжиг; 2 – изотермическая закалка; 3 и 4 – ступенчатая закалка при температуре соответственно ниже и выше мартенситной точки; 5 – обычная закалка; 6 и 7 – соответственно начало и конец фазовых превращений

наиболее отвечающую требованиям работоспособности изделия.

При *полной закалке* температура нагрева должна быть выше критических точек A_{c3} или A_{c1} ; при *неполной закалке* должна находиться в интервале закалочных температур. Если закалку проводят со скоростью охлаждения выше критической, то структура стали после охлаждения состоит из мартенсита и остаточного аустенита, а если проводят со скоростью охлаждения ниже критической, то – из ферритокарбидной смеси различной степени дисперсности (сорбит и троостит закалки).

Закалку с непрерывным охлаждением проводят в воде, масле и других средах, причем температура среды должна быть ниже точки начала мартенситного превращения M_n (рис. 4); на рисунке M_k – температура конца мартенситных превращений.

Марка стали	Закалка			Отпуск	
	Температура нагрева, °C		Охлаждающая среда	Температура, °C	Охлаждающая среда
	Первая закалка или нормализация	Вторая закалка			
Углеродистые стали					
30	870	-	Вода	250	Воздух
40	840	-		450	
45	830	-		350	
				250	
50	810	-		160	
			500		

Продолжение табл. 3

Марка стали	Закалка			Отпуск	
	Температура нагрева, °С		Охлаждающая среда	Температура, °С	Охлаждающая среда
	Первая закалка или нормализация	Вторая закалка			
Хромистые стали					
15X, 15AX, 20X	880	770-820	Вода или масло	180	Вода или масло
30X	860	-	Масло	500	Вода или масло
30XPA	900	860	Воздух	200	Воздух
35X 38XA 40X	860	-	Масло	500 550 500	Вода или масло
45X 50X	840 830			520 520	
Марганцовистые стали					
15Г, 20Г	880	-	Воздух	-	-
25Г				560	Вода или масло
30Г, 35Г, 40Г	860	-	Вода или воздух	600	Воздух
45Г, 50Г	850	-			
10Г2	920	-	Воздух	-	-
30Г2	880	-	Масло или воздух	600	Воздух
35Г2	870	-		650	
40Г2	860	-			
45Г2	850	-			
50Г2	840	-			
Хромомарганцевые стали					
18ХГ 18ХГТ 20ХГР	880 880-950 880	- 870 -	Масло (при 950 °С – воздух)	200	Воздух или масло
27ХГР	870	-			Воздух
25ХГТ, 30ХГТ 40ХГТР 35ХГФ	850 840 870	850 - -			550 630
25ХГМ	860	-		-	200
Хромокремниевые стали					
33ХС	920	-	Вода или масло	630	Вода или масло
38ХС 40ХС	900	-	Масло	630 540	Масло

Изотермическая закалка при 900-910 °С в селитре при 300-350 °С, затем охлаждение на воздухе.

Продолжение табл. 3

Марка стали	Закалка			Отпуск	
	Температура нагрева, °С		Охлаждающая среда	Температура, °С	Охлаждающая среда
	Первая закалка или нормализация	Вторая закалка			

Хромомolibденовые и хромомolibденованадиевые стали

15ХМ	800	-	Воздух	650	Воздух
20ХМ			Вода или масло	500	
30ХМ, 30ХМА			850	-	Масло
35ХМ	560				
38ХМ	580	Воздух			
30Х3МФ	870	620			
40ХМФА	860	-	-	580	Масло

Хромованадиевые стали

15ХФ	880	760-810	Вода или масло	180	Воздух или масло
40ХФА		-	Масло	650	Вода или масло

Никель-мolibденовые стали

15Н2М 20Н2М	860	770-820 -	Масло	180	Воздух
20ХН		760-810	Вода или масло	180	Вода или масло
40ХН	820	-		500	
45ХН, 50ХН				530	

Хромоникелевые и хромоникелевые с бором стали

20ХРН	930-950	780-830	Масло	200	Воздух или масло
12ХН2 12ХН3Л	860	760-810		180	
20ХН3А	820	-	Масло	500	Вода или масло
12Х2Н4А 20Х2Н4А	860	760-800 780		180	Воздух или масло
30ХН3А	820	-		530	Вода или масло

Хромокремнемарганцевые и хромокремнемарганцевоникелевые стали

20ХГСА 25ХГСА	880	-	Масло	500	Вода или масло
30ХГС 30ХГСА				480	
				540	

Изотермическая закалка при 880 °С в смеси калиевой и натриевой селитр, имеющей температуру 280-310 °С; охлаждение на воздухе

Продолжение табл. 3

Марка стали	Закалка			Отпуск	
	Температура нагрева, °С		Охлаждающая среда	Температура, °С	Охлаждающая среда
	Первая закалка или нормализация	Вторая закалка			
35ХГСА	950 700	890	Воздух	230	Воздух или масло
30ХГСН2А	900	-	Масло	260	

Хромомарганцевоникелевые и хромомарганцевоникелевые с титаном и бором стали

15ХГН2ТА	960	840	Масло	180	Воздух или масло
20ХГНР 20ХГНТР	930-950 -	780-830 850		200	Масло
38ХГН	850	-		570	Вода или масло

Хромоникель-молибденовые стали

14Х2Н3МА	880	770	Масло	180	Воздух
20ХН2М	860	780		200	Вода или масло
30ХН2МА		-		530	Воздух
38Х2Н2МА	870	-		580	Воздух или масло
40ХН2МА	850	-		620	Вода или масло
40Х2Н2МА	870	-		600	
38ХН3МА	850	-		590	Воздух
18Х2Н4МА	950	860	Воздух или масло	200	Воздух или масло
25Х2Н4МА	850	-	Масло	560	Масло

Хромоникель-молибденовые и хромоникель-ванадиевые стали

30ХН2МАФА	860	-	Масло	680	Воздух
36Х2Н2МФА 38ХН3МФА	850	-		600	
45ХН2МФА	860	-		460	Масло
20ХН4ФА	850	-		630	Вода

Хромоалюминиевые и хромоалюминиевые с молибденом стали

38Х2Ю	930	-	Вода или масло	630	Вода или масло
38Х2МЮА	940	-		640	

4. Режимы термической обработки коррозионно-стойких, кислотостойких и окалиностойких сталей

Сталь	Закалка		Температура отпуска (охлаждение на воздухе), °С	Твёрдость HRC	
	Температура нагрева, °С	Охлаждающая среда			
12X13	950-1050	Масло	500-550	-	
20X13			550-600	-	
30X13	1000-1050		200-225	48-50	
40X13			200-300	50-55	
95X18	1000-1075		550-600	-	
14X17H2			200-225	57-60	
			275-300	52-55	
17X18H9	1000-1050		Воздух	-	-
	1050-1100				
12X18H9T	1100-1150	Вода	18		
06X18H11 08X18H12T	1050-1100				
					36X18H25C2
45X14H14B2M 40X9C2 40X10C2M	1150-1200	Вода			-
	1000-1050	Масло			800-830
	1100-1150	Вода			750-780

5. Режимы термической обработки теплостойких сталей

Сталь	Температура нагрева, °С	Охлаждающая среда	Температура отпуска или старения, °С
12MX	Нормализация 910-930	Воздух	670-690
12X1MФ	Нормализация 960-980		700-750
20X1M1Ф1TP	Закалка 970-990	Масло	680-720
20X1M1Ф1BP	Нормализация 1030-1050	Воздух	600 (ступенчатый отпуск, 3 ч) 700-720 (6 ч)
25X1MФ	Закалка для варианта: I – 880-900 II – 930-950	Масло	640-660 620-660
25X2M1Ф	Нормализация для варианта: I – 1030-1050 II – 950-970	Воздух	680-720
18X3MB	Закалка 950-970	Масло	660-680
20X3MBФ	Закалка 1030-1060	Масло	660-700
15X5 15X5M 15X5BФ 12X8BФ	Отжиг 840-860	С печью	-

6. Режимы термической обработки пружинных сталей общего назначения (температура, °С)

Сталь	Температура закали	Охлаждающая среда (температура среды)	Температура отпуска
65	840	Масло	480
70	830		
75	820		
85			
У9А	760-790	Масло (790-810) или вода (760-770)	300-420
У10А, У12А	770-810		
60Г	840	Масло	480
65Г, 70Г	830		
55ГС, 50С2, 55С2, 55С2А	870	Масло или вода	460
60С2, 60С2А		Масло	420
70С3А	460		
50ХФА, 50ХГФА	520		
60С2ХФА	410		
65С2ВА	420		
60С2Н2А			
70С2ХА			
	880		
	870		

7. Режимы термической обработки конструкционных цементуемых сталей

Сталь	Операция	Температура нагрева, °С	Сталь	Операция	Температура нагрева, °С
10	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 780-800 180-200	18ХГ	Цементация Закалка в масле Отпуск	880-900 800-820 180-200
20	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 780-800 180-200	15ХФ	Цементация Закалка в масле Отпуск	920-940 850-860 180-200
15Г	Цементация Закалка в масле Отпуск	880-900 780-800 180-200	20ХГР	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-930 830-850 180-200
20Г	Цементация Закалка в масле Отпуск	880-900 780-800 180-200	18ХГТ	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 800-820 180-200
15Х	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 780-820 150-180	18Х2Н4МА	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 850-870 180-200
12ХН2	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 790-800 180-200	12Х2Н4А	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 750-870 180-200
12ХН3А	Цементация Закалка в масле Отпуск	900-920 790-800 180-200	20Х2Н4А	Цементация Закалка в масле Отпуск	920-930 780-800 150-160

При *изотермической закалке* (см. рис. 4) детали нагревают на 10-20 °С выше обычной температуры закалки, охлаждают в масле, в расплавленных солях или щелочах, имеющих температуру выше мартенситной точки M_n с выдержкой, достаточной для полного распада аустенита. В результате изотермической закалки уменьшаются напряжения и деформация, т.е. резко снижаются трещинообразование и коробление. Такую закалку применяют при изготовлении деталей сложной формы, больших размеров или большой длины.

Режимы изотермической закалки конструкционной стали некоторых марок приведены в табл. 8.

При *ступенчатой закалке* охлаждение от высокой температуры ведут в горячей среде (ванне) при температуре выше точки M_n до выравнивания температуры по всему сечению. Дальнейшее охлаждение проходит на воздухе. При этом происходит превращение аустенита в мартенсит. Ступенчатую закалку проводят двумя способами:

1-й способ – нагретое изделие охлаждают в горячей среде, температура которой на 20-30 °С выше температуры мартенситного превращения, а затем охлаждают на воздухе; после извлечения из горячей среды в период аустенитных превращений изделие можно править;

2-й способ – нагретое изделие охлаждают в горячей среде ниже температуры мартенситного превращения примерно на 160-190 °С, а затем – на воздухе; при этом способе закалки править изделия невозможно из-за быстрого образования мартенсита, но по сравнению с обычной закалкой процент брака из-за образования трещин и коробления снижается.

На рис. 4 приведены кривые охлаждения, характеризующие различные способы термической обработки стали; режимы ступенчатой закалки инструментальных сталей некоторых марок даны в табл. 9.

Закалка с подтуживанием состоит в том, что перед погружением в охлаждающую среду изделие выдерживают на воздухе. Время выдержки устанавливают опытным путем с таким расчетом, чтобы превращение аустенита не началось до погружения изделия в охлаждающую среду.

Во время *закалки в двух жидких средах* происходит быстрое охлаждение стали до температуры, которая выше мартенситной точки, и замедленное охлаждение – при температуре ниже этой точки. Этого достигают при погружении изделия в воду и последующем переносе его в масло (закалка “через воду в масло”). Время охлаждения в воде устанавливают для каждого вида деталей опытным путем.

Закалку с ограниченным пребыванием в охлаждающей среде и дальнейшим охлаждением на воздухе проводят с таким расчетом, чтобы температура изделия при извлечении его из охлаждающей ванны была ниже мартенситной точки.

Закалку с самоотпуском применяют в основном для ударного инструмента, изготовленного из углеродистой стали, твердость которого должна уменьшаться от рабочей части к хвостовику. Пребывание инструмента в охлаждающей среде ограничивают настолько, чтобы внутренняя часть сечения сохранила количество теплоты, достаточное для отпуска наружных закалившихся слоев стали после извлечения инструмента из охлаждающей среды на воздух. На практике часто инструмент вторично погружают в охлаждающую среду, чтобы не допустить излишнего нагрева поверхности. При этом для оценки режима термического процесса руководствуются цветами побежалости (например, при закалке зубил)

8. Режимы изотермической закалки некоторых конструкционных сталей

Сталь	Максимальная толщина или диаметр изделия, мм	Температура, °С		Выдержка в ванне, мин
		Нагрева	Среды закалочной ванны	
25ХГН2ТА	15 (изделия типа труб и пластин)	870-880	200-260	30-40
40Х2Н2МА	30 (цилиндрические изделия)		315-325	20-30
38Х2Н2МА	25 (изделия типа труб и пластин), 30 (цилиндрические изделия)		300-325	30-40
30ХГСН2А	80-100	890-910	280-320 270-300 240-280	60

9. Режимы ступенчатой закалки инструментальных сталей

Сталь	Температура, °С		Твердость НRC
	Закалки	Изотермической выдержки в соляной ванне	
У7А У8А, У9А У10А, У12А У13А 11ХФ	800-820 780-790 790-810 810-830 810-830	150-180	59-61 60-62 61-62 62-64 62-63
9ХС ХВСГ	870-880 860-875	160-200	62-64 62-63
ХГС ХВГ	860-870 830-850	160-180 160-200	61-63
Х 6ХС	845-855 860-875	160-180 250-300	61-64 45-50
Р9 Р18	1280-1300 1240-1250	400-500 (250-350) 400-500 (250-350)	60-61

Примечание. В скобках указана температура второй выдержки.

Закалку с самоотпуском проводят в такой последовательности: нагревают инструмент до температуры закалки, опускают рабочую часть в воду до потемнения, вынимают инструмент, быстро зачищают рабочую часть шлифовальной шкуркой или напильником. При появлении цвета побежалости, соответствующего заданной температуре отпуска, инструмент охлаждают в масле или воде.

При *сквозной закалке* изделие прокаливают насквозь. Оно имеет практически однородную структуру (мартенсит и остаточный аустенит) и одинаковые свойства по сечению. При *несквозной закалке* сечение имеет неоднородную структуру (неравномерное распределение продуктов распада аустенита при температуре, располагающейся на диаграмме выше точки M_n) и разные свойства.

Обычная закалка характеризуется наличием оксидов на поверхности.

Чистая закалка проводится при нагреве в печах с контролируемой

атмосферой. При этом на поверхности изделий могут образоваться пригары масла или цвета побежалости.

Преимущество *светлой закалки* с охлаждением нагретой стали в расплавленных щелочах заключается в том, что деталь, прошедшая такой вид термообработки, имеет светлую поверхность, меньшее коробление и более высокую твердость.

Состав охлаждающей ванны выбирают в зависимости от требуемой рабочей температуры. Для закалки инструментальных сталей наиболее целесообразно применять смесь из 75% едкого калия и 25% едкого натра. Щелочь расплавляют в тигле из углеродистой стали. Коррозионно-стойкую сталь для тиглей применять не рекомендуется. Закаливающая способность ванны, работающей при температуре до 250 °С, повышается при перемешивании и зависит от количества введенной воды. Наибольшей охлаждающей способностью обладает смесь, содержащая 6-10% воды.

При светлой закалке в расплавленной щелочи выполняют такие операции: подогрев в расплавленной поваренной соли при температуре 800-840 °С; нагрев под закалку в ванне при температуре, превышающей на 10-20 °С соответствующую температуру закалки (ванны, имеющие в составе хлористый барий, для светлой закалки применять нельзя, так как последний загрязняет щелочную ванну, целесообразнее использовать хлористый кальций); охлаждение в расплавленной щелочи до полного выравнивания температуры при ступенчатой закалке и до окончания превращения – при изотермической (время выдержки в щелочной ванне при ступенчатой закалке принимают равным 15 с на 1 мм сечения); промывка в воде, имеющей температуру 70-90 °С; промывка в проточной воде; окупание в 2-5%-ный водный раствор нитрита натрия, предохраняющего от коррозии.

Детали с твердостью 60 HRC₃ и выше не следует после закалки в щелочной ванне сразу промывать в горячей воде, так как это может привести к растрескиванию и значительному короблению. В этом случае детали необходимо охлаждать примерно до 100 °С на воздухе, а затем промывать в горячей воде. Детали, подвергаемые светлой закалке, не должны иметь следов жира во избежание появления в этих местах темных пятен.

В результате такого метода термообработки можно повысить качество детали благодаря минимальной деформации, снизить трудоемкость процесса и сократить время на термообработку.

Закалку с последующей обработкой холодом применяют для более полного разложения аустенита. При этом закаленную деталь дополнительно охлаждают ниже 0 °С.

Закалку с обработкой холодом выполняют в такой последовательности: нагрев до температуры закалки, закалка, дополнительное охлаждение до температур ниже 0 °С, отпуск.

Особенности закалки инструментов. Определяя необходимость разложения остаточного аустенита, нужно учитывать, что при наличии в структуре стали более 25% остаточного аустенита твердость стали заметно снижается, а износостойкость возрастает. Положительное влияние на износостойкость оказывают мелкозернистая структура, наличие остаточного аустенита и отсутствие нерастворенных карбидов. Для обеспечения высокой абразивной износостойкости хрупкая и твердая структуры не должны иметь карбидов: в мягкой и пластичной структуре должны содержаться высокодисперсные карбиды, распределенные по

всей матрице.

Достаточно широко применяют быстрорежущие стали с 1,05-1,15% С. Эти стали подвергают аустенизации при температуре 1190-1210 °С и отпуску при 540-570 °С (67-70 HRC_э). Второй отпуск проводят при температуре на 30 °С ниже, чем первый. Перед аустенизацией эффективен нагрев с выдержкой при 950 °С в течение 30 мин. Для повышения качества быстрорежущей стали карбиды в ее структуре должны быть дисперсными и равномерно распределенными. Температура нагрева должна точно регулироваться на всех стадиях термической обработки.

Закалка кобальтовых сталей типа Р9К5, Р9К10, Р12К8Ф2М3, Р6К8Ф2М5 с температур, более близких к верхнему пределу оптимальной температуры, и выдержка при нагреве под закалку не менее 8 с/мм сечения обеспечивают высокие режущие свойства инструментов, например, резцов и фрез. Инструменты, закаленные с пониженных температур (на 15-20 °С ниже оптимальной температуры), имеют низкие режущие свойства. Уменьшение времени выдержки при оптимальной температуре до 4 с на 1 мм сечения приводит к резкому снижению вторичной твердости и стойкости инструмента.

Нагрев сталей под закалку. Температуру нагрева под закалку выбирают в зависимости от формы, размеров, назначения и условий нагружения детали. Температура нагрева зависит от состава стали, а также от положения критических точек A_{c1} и A_{c3} на диаграмме интервалов за-калочных температур железоуглеродистых сплавов.

Нагрев под закалку проводят преимущественно в электропечах-ваннах в расплавах солей. Реже применяют печи сопротивления, газовые печи или установки ТВЧ. Данные для выбора параметров процессов термической обработки стальных изделий и составы соляных ванн для нагрева сталей приведены в табл. 10-12.

Для безопасной работы соляных ванн (устранения разбрызгивания расплавленных солей при загрузке влажных или холодных деталей) применяют ступенчатый нагрев под закалку. Инструмент из углеродистой и легированной стали подогревают один раз для подсушивания и сокращения времени окончательного нагрева; инструмент из быстрорежущей стали подогревают дважды: первый раз – для подсушивания инструмента, второй – для предотвращения его деформации в процессе закалки.

Для крупногабаритного сложнофасонного инструмента применяют третий подогрев (при температуре 1050 °С), после которого сокращается продолжительность окончательного нагрева при закалке, а следовательно, уменьшается обезуглероживание.

Первый подогрев при закалке сталей Р12, Р18, Р18Ф2, Р18К5Ф2, Р14Ф4, Р10К5Ф5, Р9К5, Р9К10, Р6М3, У7, У7А, У8, У8А, У10, У10А, У12, У12А, Х12М, ХВГ, 9ХС проводят до температуры 400-500 °С, второй подогрев при закалке сталей Р12, Р18, Р18Ф2, Р14Ф2, Р10К5Ф5, Р9К5, Р9К10, Р6М5 – до 840-860 °С, а сталей Х12Ф1, Х12М – до 800-820 °С.

Данные для расчета времени нагрева инструмента под закалку приведены в табл. 13-17, время прогрева заготовок в пламенной печи – табл. 18.

Повышение стабильности режущих свойств и износостойкости инструмента, изготовленного из вольфрамомолибденовых сталей типа Р6М5, достигается при использовании следующего способа термической обработки [а.

10. Влияние частоты электрического тока на прокаливаемость стали

Рекомендуемая частота электрического тока для нагрева под закалку на заданную глубину

Частота тока	Частота тока (Гц) при глубине закаливания, мм						
	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	10,0
Наивысшая	250000	100000	60000	30000	15000	8000	2500
Наинизшая	15000	7000	4000	1500	1000	500	150
Оптимальная	60000	25000	15000	7000	4000	1500	500

Глубина проникновения электрического тока в сталь в зависимости от частоты тока

Частота тока, Гц	Глубина (мм) проникновения тока при температуре, °С	
	15	800
50	10,0 – 5,0	70,8
500	3,0 – 1,5	22,0
2 500	1,5 – 0,7	10,0
10 000	0,70 – 0,35	5,0
50 000	0,30 – 0,15	2,2
250 000	0,15 – 0,07	1,0

11. Температура нагрева ТВЧ некоторых предварительно отожженных, нормализованных и улучшенных сталей в зависимости от времени аустенизации

Сталь	Температура нагрева (°С) при суммарном времени аустенизации, с		
	10	3	1
35	880-900	900-940	940-980
	860-880	880-920	920-960
	840-860	860-900	900-940
40	860-880	880-920	920-960
	840-860	860-900	900-940
	820-840	840-880	880-920
45, 50	850-870	870-910	910-950
	830-850	850-890	890-930
	810-830	830-870	870-910
45Г2, 50Г	840-860	860-900	880-920
	820-840	830-870	860-900
	800-820	810-850	840-880
65Г	820-840	840-880	860-900
	800-820	810-850	850-890
	790-820	790-830	830-870
40Х, 45Х	880-920	920-960	940-980
40ХНМ	840-880	860-900	880-920
40ХН, 45ХН	860-880	900-940	920-960
	820-840	840-880	860-900
ШХ15, ШХ12 9Х	890-930	920-960	940-980
	850-870	880-920	900-940
ШХ6, ШХ9	880-920	900-940	920-960
	840-860	860-900	880-920
У8, У9, У10, У11, У12	780-800	820-860	840-880
	760-780	800-840	820-860
ХВГ	860-880	840-880	860-900
	820-840	820-860	840-880

12. Составы соляных ванн для нагрева сталей

Назначение	Содержание, % (мас. доля)						$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	$t_{раб}, ^\circ\text{C}$
	BaCl ₂	MgBF ₄	NaCl	KCl	K ₂ CO ₃	CaCl ₂		
Предварительный нагрев быстрорежущей и высоколегированной сталей	78	-	22	-	-	-	635	700-950
	65	-	35	-	-	-	670	730-930
	50	-	-	50	-	-	640	680-870
	80	-	-	20	-	-	640	680-1060
Окончательный нагрев под закалку быстрорежущей и высоколегированной сталей	100	-	-	-	-	-	-	1020-1320
	96	-	4	-	-	-	-	1000-1310
	95	-	5	-	-	-	-	-
	90	-	10	-	-	-	-	950-1300
Окончательный нагрев под закалку углеродистой и легированной сталей	-	-	100	-	-	-	800	850-920
	-	-	-	100	-	-	776	820-920
	-	-	44	56	-	-	655	700-900
	22	-	37	41	-	-	552	500-800
	5	-	25	70	-	-	500	540-870
	-	-	50	-	-	50	620	720-900
Отжиг и нормализация	50	-	50	-	-	-	700	750-920
	75	-	25	-	-	-	704	760-925
	53	-	20	27	-	-	550	680-1150

Примечание. $t_{пл}$, $t_{раб}$ – температуры соответственно плавления состава и рабочая расплава солей.

13. Отношение продолжительностей предварительного подогрева и окончательного нагрева стали под закалку

Сталь	Первый подогрев		Второй подогрев	
	Температура, $^\circ\text{C}$	Отношение	Температура, $^\circ\text{C}$	Отношение
Углеродистая и легированная Высокохромистая и быстрорежущая Быстрорежущая	400-500	1 : 1	-	-
	400-500	2 : 1	840-880	2 : 1
	400-500	2 : 1	1040-1060	1 : 1

14. Зависимость времени нагрева в различных средах от температуры среды и отношения объема заготовки V (см^3) к площади ее поверхности F , см^2

Среда	Температура, $^\circ\text{C}$	Отношение	Время нагрева, мин
Расплав поваренной соли	850	0,50	4
		1,00	15
		1,50	32
	950	0,50	3
		1,00	11
		1,50	22
	1050	0,50	2
		1,00	7
		1,50	14

Продолжение табл. 14

Среда	Температура, °С	Отношение	Время нагрева, мин
Масло	100	0,50	14
		1,00	23
		1,50	32
	200	0,50	11
		1,00	18
		1,50	24
	300	0,50	8
		1,00	14
		1,50	19
Расплав солей NaNO ₃ и KNO ₃ (содержание 1 : 1)	300	0,50	3,5
		1,00	8
		1,50	14
	450	0,50	2,5
		1,00	6
		1,50	10
	600	0,50	1,4
		1,00	4
		1,50	7
Расплав свинца	650-850	0,25	0,6-0,8
		0,50	1,2-1,6
		1,00	3-4
		1,50	5,1-6,8
		2,00	7,8-11,0
		2,50	11-15
Атмосфера электрической печи	500	0,12	25
		0,08	45
	750	0,12	20
		0,08	26
	900	0,12	15
		0,08	22

15. Продолжительность τ (мин) подогрева и окончательного нагрева инструментов и технологической оснастки под закалку

Инструмент	Подогрев до температуры, °С		Окончательный нагрев под закалку
	550-600	800-850	
Метчики, развертки, сверла, круглые протяжки и другой стержневой инструмент	$\tau = bD$	$\tau = cD$	$\tau = aD$
Фрезы, насадные развертки и зенкеры при $0,5 (D - d) < h$ Круглые, а также накатные плашки и фрезы при $0,5 (D - d) < h$	$\tau = b \frac{D - d}{2}$	$\tau = c \frac{D - d}{2}$	$\tau = a \frac{D - d}{2}$
Круглые протяжки из легированных сталей, нагреваемые в электрической печи	$\tau = b (d + 4)$	-	$\tau = d + 4$

Продолжение табл. 15

Инструмент	Подогрев до температуры, °С		Окончательный нагрев под закалку
	550-600	800-850	
Шпоночные протяжки	$\tau = b(h + 4)$	-	$\tau = h + 4$
Молотковые штампы и штампы для холодного деформирования стали	$\tau = b h$	$\tau = c h$	$\tau = a h$

Обозначения: D – диаметр режущей части инструмента, мм; d – диаметр отверстия инструмента, мм; h – высота и толщина, мм; a, b, c – коэффициенты (см. табл. 16).

**16. Значения коэффициентов a, b, c (мм/мин)
для расчета продолжительности нагрева инструмента под закалку**

Материал	Коэффициент	Соляная ванна	Печь периодического действия
Углеродистая сталь	a	0,10-0,17 0,30-0,35 (без подогрева)	0,7-0,8 1,2-1,5 (без подогрева)
	b	0,30-0,40	1,4-2,5
Легированная сталь	a	0,15-0,20	1,0-1,2
	b	0,30-0,40	1,4-2,5
Высоколегированная сталь типа X12, X12M	a	0,17-0,18	0,4-0,5
	b	0,30-0,40	1,4-2,5
	c	0,30-0,35	0,8-1,1
Быстрорежущая сталь типа P18 и P9	a	0,9-0,12	0,25-0,35

Примечание. Если ванна не соляная, а свинцовая, то для углеродистой стали коэффициент $a = 0,1$ (без подогрева).

**17. Продолжительность (мин) нагрева и выдержки при закалке
в зависимости от сечения заготовки из углеродистой стали**

Размер прогреваемого сечения, мм	Пламенная печь		Соляная ванна		Размер прогреваемого сечения, мм	Пламенная печь		Соляная ванна	
	Нагрев	Выдержка	Нагрев	Выдержка		Нагрев	Выдержка	Нагрев	Выдержка
25	20	5	7	3	12	100	25	40	20
50	40	10	17	8	150	120	30	50	25
75	60	15	24	12	175	140	35	55	30
100	80	20	33	17	200	160	40	65	35

Примечания: 1. Для легированной стали продолжительность нагрева и выдержки должна быть увеличена на 25-40%.
2. Температура печи должна быть на 10-30 °С выше заданной температуры закалки.

18. Продолжительность (мин) подогрева цилиндрических и квадратных заготовок в пламенной печи

Температура печи и заготовки, °С	Диаметр цилиндра (сторона квадрата), мм							
	25	50	75	100	150	200	250	300
300	20/-	37/-	62/-	-/-	-	-	-	-
500	14/-	32/-	47/-	-/-	-/-	-	-	-
650	13/-	31/-	47/-	-/-	-	-	-	-
750	11/14	21/35	47/50	70/70	200	250	350	400
900	9/13	25/25	32/42	70/70	120	160	200	250
1000	-/-	25/-	35/-	60/-	90	120	180	200
1100	7/11	23/25	31/32	40/40	80	110	160	180
1200	-/-	20/-	30/-	40/-	70	100	120	150

Примечания: 1. В числителе дроби продолжительность операции для цилиндрической заготовки, в знаменателе – для квадратной.
2. Заготовки с размерами 150-300 мм – цилиндрические.

Время выдержки при первом нагреве для различных диаметров (толщине) инструмента:

Диаметр, мм 1-10 20-40 50-100
Время выдержки, с 10-30 35-45 50-60

Такая термическая обработка приводит к гомогенизации аустенита, равномерной по величине зерна структуре и стабильным механическим и эксплуатационным свойствам инструмента.

Износостойкость инструмента при точении и фрезеровании труднообрабатываемых материалов повышается на 25-30%.

Для предупреждения окисления и обезуглероживания, а также для уменьшения коробления и трещинообразования нагрев и охлаждение технологической оснастки, в том числе инструментов из углеродистой стали, проводят в соляных ваннах (исключение составляют отдельные виды специального инструмента; например, длинные протяжки, для которых нет стандартных электрических ванн необходимого размера). Во избежание обезуглероживания поверхности в процессе нагрева необходимо проверять химический состав солей, не применять соли, имеющие отклонения по составу от предлагаемого стандартом или ТУ, и периодически добавлять в ванну раскислители (буру, борную кислоту, фтористый магний).

Охлаждение при закаливании сталей. Выбор среды для охлаждения зависит от марки стали, требуемой твердости формы и размеров детали. По составу и свойствам все закалочные среды подразделяют на четыре группы: вода и водные растворы, масла, расплавленные соли и щелочи, воздух. Скорость охлаждения стали в различных средах приведена в табл. 19. Воду и водные растворы применяют при закалке деталей простой формы диаметром или толщиной 8-12 мм из углеродистой стали. Температуру воды необходимо поддерживать примерно 18-25 °С. При температуре ниже 18 °С увеличивается скорость структурных превращений, что ведет к трещинообразованию. В случае повышения температуры воды свыше 25 °С и загрязнения ее маслами и мылом резко снижается охлаждающая способность в интервале температур 550-650 °С, что приводит к образованию мелких пятен на поверхности закаленного инструмента. Детали сложной конфигурации из углеродистой стали охлаждают в двух средах: в воде до 250-300 °С, а затем в масле. Продолжительность выдержки

19. Скорость охлаждения стали в различных закаливающих средах

Закаливающая среда	Скорость охлаждения (°C/с) при температуре, °C	
	650-550	300-200
Вода при температуре, °C:		
18	600	270
25	500	270
50	100	270
75	30	200
Мыльная вода	30	200
Эмульсия масла в воде	70	200
Вода, насыщенная углекислотой	150	200
10%-ный водный раствор при 18 °C: едкого натра поваренной соли соды	1200 1100 800	300 300 270
5%-ный раствор марганцевокислого калия	450	100
Керосин	160-180	40-60
Индустриальное масло	120	25
Спокойный воздух	3	1
Сжатый воздух	30	10

в воде до перенесения в масло составляет 1-2 с на каждые 6 мм диаметра или толщины изделия. Переносить деталь из воды в масло следует быстро во избежание отпуска. Масла имеют более низкую скорость охлаждения, чем вода. Охлаждение в масле проводят в интервале температур от 18 °C до температуры, которая на 40-50°C ниже температуры вспышки масла.

Для сталей с устойчивым аустенитом (P18, P9, X12M, X12Ф1) охлаждающей средой служит воздух, подаваемый компрессором или вентилятором, либо спокойный воздух. При охлаждении воздухом, подаваемым компрессором или вентилятором, перед закалкой проверяют, нет ли в воздухопроводе воды, так как попадание ее на изделие может быть причиной появления трещин. Поэтому на выходе воздухопровода устанавливают осушитель воздуха (химический с адсорбентом, электрический с тепло-электронагревателями – ТЭНами; тепловой – пароперегреватель) или устраивают сифонное колено.

Критические диаметры заготовок из некоторых марок инструментальных сталей при закалке в различных средах приведены в табл. 20; назначение и рекомендуемые составы соляных ванн – в табл. 21.

Нагрев можно выполнять в **псевдооживленном слое**. Для этого на под печи укладывают трубчатый змеевик для подачи газовой смеси. Печь оборудуют вытяжной системой вентиляции. Под печи заполняют частицами корунда размером 0,3-0,4 мм так, чтобы на поверхности змеевика образовался слой толщиной, равной 1,5-2 толщине одного ряда обрабатываемых заготовок. Частицы во время работы находятся во взвешенном состоянии в газовой смеси. Смесь сжигают с коэффициентом избытка воздуха 0,6-1,2. Высота

20. Критический диаметр заготовок из инструментальных сталей при закалке в различных средах

Сталь	Критический диаметр (мм) при закалке			
	в воде	в масле	в селитре	на воздухе
У7, У7У, У8, У8А У10, У10А У11, У11А	15-20	4-6	4-6	Не закаливаются
У12, У12А У13, У13А	10-12 10-20			
11ХФ	15-25	7-10	4-10	Не закаливается при диаметре инструмента более 20 мм
Х, ШХ15	—	8-35	8-27	Не закаливаются
ХВСГ Х6ВФ	—	80 80-100	80 80-100	25-30
Р9	—	—	—	До 10
Сталь	Критический диаметр (мм) при закалке			
	в воде	в масле	в селитре	на воздухе
Х12М	Сплошная прокаливаемость	80-100	80-100	50-60
Х12Ф1		80-100	80-100	50-60
9ХС		15-50	12-35	Не закаливаются
ХВГ		15-70	15-40	
Р18		сплошная прокаливаемость		15-40

Примечание. Критический диаметр соответствует твердости 60 HRC₃ в глубине образца и твердости 62 HRC₃ и более на его поверхности.

плотного слоя обычно составляет 60-250 мм. Нагреваемые твердые частицы корунда, “бомбардируя” поверхность нагреваемого металла, ускоряют нагрев (скорость нагрева достигает 15 мм/мин). Коэффициент теплоотдачи составляет 550-600 Вт/(м².с). В процессе нагрева поверхностные слои металла выгорают. Угар металла в псевдоожигенном слое составляет 0,2-0,25%, а при нагреве в электропечах 1,0-1,7%.

Высокое качество термической обработки обеспечивается **при нагреве заготовок из инструментальных сталей в вакууме**. Так, нагрев в вакууме при давлении 10 Па и менее практически исключает окисление, науглероживание и обезуглероживание поверхности стальных заготовок, благодаря чему этот способ нагрева особенно предпочтителен при технической обработке сталей, легированных хромом, титаном, цирконием, алюминием и марганцем.

Разработаны специальные установки, которые наряду с отжигом в вакууме дают возможность проводить при необходимости цементацию с последующей закалкой в различных средах. В современных вакуумных печах, работающих при температурах до 3000 °С, можно проводить термическую обработку различного инструмента из углеродистых, легированных и быстрорежущих сталей с высокой экономической эффективностью. Для закалки инструмента в жидких средах применяют многокамерные вакуумные печи шлюзового типа.

Преимущества термической обработки в вакууме инструментальных

21. Рекомендуемые составы ванн для термообработки инструмента

Выполняемая операция	Температурный интервал ванн, °С	Соляные ванны, % (мас. доля)						t _{пл} , °С
		BCl ₂	MgF ₂	NaCl	NaNO ₂	NaOH	KNO ₃	
<i>Быстрорежущие стали</i>								
Второй подогрев под закалку	840 – 860	68	2	30	-	-	-	650
	840 – 860	78	-	22	-	-	-	654
	1040 – 1060	97	3	-	-	-	-	950
	1040 – 1060	100	-	-	-	-	-	960
Окончательный подогрев под закалку	1200 – 1300	95	5	-	-	-	-	940
	1200 – 1300	100	-	-	-	-	-	960
Нагрев под светлую закалку	150 – 250	-	-	-	-	25	-	140
Охлаждение при ступенчатой закалке	180 – 240	-	-	-	50	-	50	145
Отпуск	150 – 300	-	-	-	45	-	55	137
<i>Высокохромистые инструментальные стали</i>								
Второй подогрев под закалку	840 – 860	68	2	30	-	-	-	650
	840 – 860	78	-	22	-	-	-	654
Окончательный нагрев под закалку	980 – 1050	68	2	30	-	-	-	650
	980 – 1050	78	-	22	-	-	-	654
Охлаждение при ступенчатой закалке	360 – 600	-	-	-	-	-	100	335
	350 – 700	-	-	-	-	100	-	322
Отпуск	400 – 560	-	-	-	-	-	100	335
	400 – 560	-	-	-	-	15	85	226
	400 – 560	-	-	-	-	100	-	328
<i>Углеродистые и легированные инструментальные стали</i>								
Нагрев под закалку	770 – 900	68	2	30	-	-	-	650
	770 – 900	78	-	22	-	-	-	654
	790 – 900	-	-	70	-	-	-	730
	700 – 900	-	44	-	-	56	-	655

Щелочные ванны для охлаждения сталей

Выполняемые операции	Содержание, % (мас. доля)					Температура, °С	
	KOH	NaOH	KCl	K ₂ CO ₂	NaCl	t _{пл}	t _{раб}
Светлая закалка быстрорежущей и высоколегированной сталей	-	100	-	-	-	318	350-400
	75	25	-	-	-	140	150-250
	65	35	-	-	-	155	180-350
	100	-	-	-	-	360	400-650
	-	85	15	-	-	296	330-600
Светлый отпуск	-	62	-	38	-	238	290-600
	63	37	-	-	-	159	130-350
-	60	-	-	40	450	550-700	

Составы для безщелочных ванн при нагреве и охлаждении металлов

Выполняемые операции	Содержание, % (мас. доля)					Температура, °С	
	KNO ₃	NaNO ₂	NaNO ₃	NaCl	NaOH	t _{пл}	t _{раб}
Ступенчатая и изотермическая закалка углеродистой и легированной сталей	80	-	20	-	-	145	180-240
	20	-	80	-	-	230	260-550
	50	45	5	-	-	140	145-590
	-	100	-	-	-	317	325-600
	55	-	45	-	-	220	260-480
Ступенчатая закалка быстрорежущих и высоколегированных сталей	-	45	45	-	-	221	250-550
	100	-	-	-	-	335	360-600
-	95	5	-	-	304	380-520	

Продолжение таблицы 21

Выполненные операции	Содержание, % (мас. доля)					Температура, °С	
	KNO ₃	NaNO ₂	NaNO ₃	NaCl	NaOH	t _{пл}	t _{раб}
Отпуск закаленных сталей	-	100	-	-	-	271	300-350
	40	60	-	-	-	172	220-550
	30	65	-	5	-	-	290-550
Изотермическая закалка и отпуск сталей, совмещенных с оксидированием поверхности	-	20	-	-	80	250	280-550
	-	10	15	-	75	250	280-600
	-	15	25	-	60	280	300-500
	-	25	30	-	45	280	300-500
Отжиг алюминиевых сплавов	45	-	55	-	-	218	250-590
	53	40	7	-	-	410	180-540
Нагрев под закалку алюминиевых сплавов	65	-	35	-	-	215	250-600
	33	-	67	-	-	232	260-540
	53	40	7	-	-	140	180-540

Примечания: 1. Для раскисления соляных ванн применяют буру 0,8-1% или ферросилиций 0,5-1,5% массы соли.
 2. Для раскисления щелочных ванн используют желтую кровяную соль 0,2-0,5% массы щелочи.
 3. В расплаве, применяемом для нагрева под закалку при 790-900 °С для углеродистых и легированных инструментальных сталей, содержится дополнительно к указанному количеству NaCl примерно 25% KCl и 5% примесей, а в расплаве для нагрева под светлую закалку при 150-250 °С, кроме 25% NaOH, содержится еще 75% KOH.
 4. Обозначения: t_{пл} и t_{раб}. – температуры плавления и рабочая.

сталей: чистая поверхность, сниженное содержание газов, хорошая воспроизводимость результатов, меньшее коробление, повышенная стойкость инструмента.

Инструментальные стали подвергают термической обработке в вакууме 0,13-66,5 Па. При термической обработке в вакууме возможно испарение легирующих элементов, в особенности Мо и Сг. Скорость испарения зависит от глубины вакуума. Для стали с 14% Сг при температуре 990 °С и вакууме 0,01 Па наблюдается снижение содержания Сг от 0,5 до 13,5%. Поэтому в процессе термической обработки быстрорежущей стали вакуум 0,013 Па поддерживается только при нагреве до температуры 850 °С; при температуре закалки 1220 °С в печь подводят азот при давлении 13,3-66,5 Па.

Тепловую изоляцию вакуумных печей осуществляют с помощью графитоволокнистых материалов. Необходимая скорость охлаждения при закалке достигается принудительной циркуляцией атмосферы. Снижение температуры от 1220 до 550 °С при давлении 0,15-0,175 МПа достигается за 2 мин. Для закалки быстрорежущей стали необходима большая скорость охлаждения, чем при закалке штамповой стали, поэтому давление газа должно быть большим.

Температура нагрева быстрорежущей стали при закалке в вакуумной печи должна быть на 10-20 °С ниже; 12%-ные Сг-содержащие стали с W или Мо можно также закалывать в вакуумной печи. Для ускорения отпуска в вакуумных печах детали нагревают и охлаждают в циркулирующем инертном газе. При охлаждении в поток газа автоматически вводят теплообменник. При необходимости отпуск может быть совмещен с операцией азотирования, которая проводится в смеси аммиака и эндогаза (50 : 50); при этом образуется слой карбонитридов в несколько микрон, обладающий высокой износостойкостью, под которым лежит диффузионный слой толщиной 100-200 мкм, обогащенный