

УДК 621.78.669.14.018.298

Л.П. Казанский, В.Л. Сивков, Л.М. Бистина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПРОКАТА ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ МАРОК 26Г2СБА И 25ХГМНТБА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследованы различные режимы термической обработки проката из сталей 26Г2СБА и 25ХГМНТБА и выбран оптимальный вариант, обеспечивающий требования МАКО<sup>1</sup> и Регистра РФ к якорным цепям, изготовленным из этих марок сталей.

*Ключевые слова:* сталь конструкционная низколегированная, термообработка – нормализация, закалка, отпуск; критические точки, структурные превращения, структура сорбитообразная после улучшения, кинетика фазовых превращений.

В настоящее время известно много исследований по закалке конструкционных сталей из межкритического интервала температур  $A_{c1} - A_{c3}$  [1-3]. Такая термическая обработка позволяет в ряде случаев повысить пластические и вязкие свойства, не снижая при этом прочностные свойства сталей.

Повышение пластических и вязких характеристик при сохранении достаточно высоких прочностных свойств – основная задача при разработке режима. Термической обработки сталей 26Г2СБА и 25ХГМНТБА.

С этой целью определены критические точки  $A_{c3}$  и  $A_{c1}$ , склонность стали к росту зерна при нагреве, а также кинетика фазовых превращений переохлажденного аустенита.

Исследования проводили на образцах, изготовленных из горячекатаного металла стали 26Г2СБА (№1) и 25ХГМНТБА (№2). Критические точки определяли на цилиндрический образцах диаметром 2 мм и длиной на 20 мм методом измерения электросопротивления на потенциометре. На основании температурной зависимости электросопротивления образцов установлено, что для стали 26Г2СБА критические точки  $A_{c3}=830\pm 5^\circ\text{C}$ ,  $A_{c1}=760\pm 5^\circ\text{C}$ . Для стали 25ХГМНТБА точка  $A_{c3}=800\pm 5^\circ\text{C}$ ,  $A_{c1}=740\pm 5^\circ\text{C}$ .

Склонность к росту зерна аустенита изучали на стандартных образцах размером 3x3x72 мм методом высокотемпературной металлографии на установке ИМАШ-5С. Образцы нагревали электроконтактным способом до 1100°C со скоростью 20 град/мин. Кривые зависимости роста, аустенитного зерна от температуры нагрева представлены на рис. 1, где 1 - сталь 26Г2СБА, 2 - сталь 25ХГМНТБА.

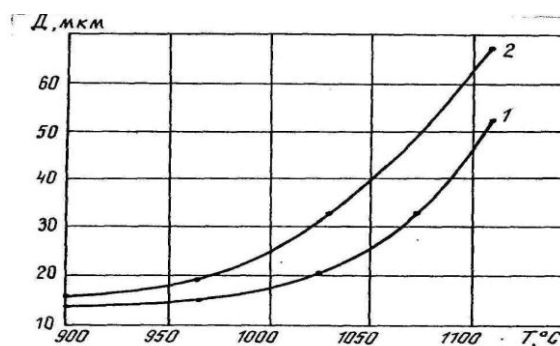


Рис. 1. Температурная зависимость роста зерна аустенита:  
1, 2 – номера плавок

Из приведенной температурной зависимости размера зерна аустенита следует, что

рост зерна аустенита стали 25ХГМНТБА более интенсивный, чем стали 26Г2СБА. Однако при выборе режимов термической обработки, в частности, температуры нормализации, обе стали не следует нагревать свыше 930-950°C, так как сверх этой температуры наблюдается разноструктурность, которая оказывает отрицательное влияние на вязкость сталей.

Разработку режимов термической обработки проводили в двух направлениях: для материала II категории прочности и материала цепей III категории прочности.

С учетом высоких требований по пластическим свойствам, предъявляемым к материалу цепей II категории прочности, в основу режима заложена нормализация (Н), причем температура нормализации должна соответствовать температуре рекристаллизации для получения мелкозернистой структуры стали.

Для достижения высоких вязких характеристик был заложен высокий отпуск (О). Оптимальный режим высокого отпуска отработывали на пластинах 20x150x250 мм, вырезанных из горячекатаных квадратных заготовок сечением 130x130 мм стали 26Г2СБА.

Методика отработки режима отпуска заключалась в нагреве нормализованных пластин при температурах 570, 590, 610, 630 и 650°C (по две пластины на каждую температуру), выдержке при указанных температурах в течение 2 ч (из расчета 6 мин на 1 мм сечения) и затем последующего охлаждения одной пластины на воздухе, другой – в воде. Из термообработанных пластин вырезали по три образца для разрывных испытаний. Разрывные образцы испытывали по ГОСТ1497-93, а ударные образцы – при температуре - 40°C по ГОСТ9454-75.

В табл. 1 и на рис. 2 представлены данные механических испытаний образцов стали 26Г2СБА и зависимость свойств от температуры отпуска с различным охлаждением.

Таблица 1

Зависимость механических свойств стали 26Г2СБА от температур отпуска

№ образца	Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\alpha_{Н1}^{-40}$ , МДж/м <sup>2</sup>
0	H <sub>860°</sub>	636	835	21,5	60	0,28
1	H <sub>860°</sub> + O <sub>570°</sub> ; вода	517	781	22,2	65	0,446
2	H <sub>860°</sub> + O <sub>570°</sub> ; воздух	637	822	20,6	68,3	0,196
3	H <sub>860°</sub> + O <sub>590°</sub> ; вода	647	771	24,2	67,0	0,347
4	H <sub>860°</sub> + O <sub>590°</sub> ; воздух	575	763	23,8	66,3	2,10
5	H <sub>860°</sub> + O <sub>610°</sub> ; вода	496	736	25,3	65,3	9,35
6	H <sub>860°</sub> + O <sub>610°</sub> ; воздух	500	752	24,8	67,3	0,312
7	H <sub>860°</sub> + O <sub>630°</sub> ; вода	524	722	26,0	66,7	0,78
8	H <sub>860°</sub> + O <sub>630°</sub> ; воздух	492	742	24,0	65,7	0,366
9	H <sub>860°</sub> + O <sub>650°</sub> ; вода	481	728	24,8	65,0	0,54
10	H <sub>860°</sub> + O <sub>650°</sub> ; воздух	472	728	26,2	66,7	0,68

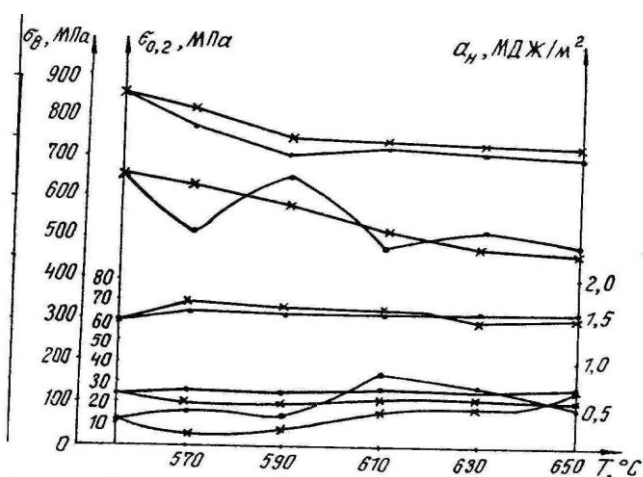


Рис. 2. Зависимость механических свойств стали 26Г2СБА от температуры отпуска:

- при охлаждении в воде; - на воздухе

Анализ приведенных результатов показал, что пластические свойства  $\delta$  и  $\psi$  слабо зависят от температуры отпуска  $T_{\text{отп}}$  и режима охлаждения. Прочностные свойства  $\sigma_b$  уменьшаются в интервале температур отпуска 550-590°C с  $\sigma_b = 840$  МПа (84 кг/мм<sup>2</sup>) при  $T_{\text{отп}} = 550^\circ\text{C}$  до  $\sigma_b = 700-750$  МПа (70-75 кг/мм<sup>2</sup>) при  $T_{\text{отп}} = 590^\circ\text{C}$ . При дальнейшем повышении температуры отпуска до 650°C происходит уменьшение лишь предела текучести с  $\sigma_{0,2} = 580-600$  МПа (58-60 кг/мм<sup>2</sup>) при  $T_{\text{отп}} = 590^\circ\text{C}$ , до  $\sigma_{0,2} = 470$  МПа (47 кг/мм<sup>2</sup>) при  $T_{\text{отп}} = 650^\circ\text{C}$ , а прочностные свойства  $\sigma_b$  практически постоянны. Ударная вязкость чувствительна как к изменению режима охлаждения вода – воздух, так и к температуре отпуска. Более предпочтительным режимом охлаждения является охлаждение в воду. Максимальная ударная вязкость  $\alpha_{\text{Н1}}^{-40^\circ} = 0,8-0,9$  МДж/м<sup>2</sup> (8-9 кгм/см<sup>2</sup>) получается при  $T_{\text{отп}} = 610^\circ - 630^\circ$  и охлаждение в воде.

Таким образом, оптимальным режимом термической обработки можно считать нормализацию при  $T = 860^\circ\text{C}$  и высокий отпуск при температуре 610°-630°C и охлаждение в воде. Этот режим обеспечивает механические свойства, отвечающие требованиям, предъявляемым к материалу цепей II категории прочности.

В основу режимов термической обработки стали 26Г2СБА и 25ХГМНТБА для материалы цепей III категории прочности заложена высокотемпературная нормализация (935-950°), закалка (3) и высокий отпуск. Температура закалки менялась от температуры  $A_{c1} + 20^\circ\text{C}$ . Температура отпуска во всех случаях была 610°C, охлаждение в воде. Отработку режимов термической обработки проводили на пластинах 20x130x250 мм, вырезанных их горячекатаных заготовок сечением 130x130 мм. Из пластин, прошедших комплексный режим обработки, для определения механических свойств, вырезали по три разрывных образца и по три ударных. В табл. 2. на рис. 3, 4 приведены результаты механических характеристик стали 26Г2СБА и 25ХГМНТБА и зависимость их от температур закалки.

Таблица 2

Зависимость механических свойств опытных сталей от температуры закалки

Марка стали	Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\alpha_{\text{Н4}}^0$ , МДж/м <sup>2</sup>
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + 3_{A_{c1}}^{780^\circ} + 20^\circ + 0_{610^\circ}$	585	778	22,5	62,0	0,41
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + 3_{A_{c3}}^{830^\circ} + 0_{610^\circ}$	713	837	22,3	64,0	1,46
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + 3_{A_{c3}}^{880^\circ} + 0_{610^\circ}$	711	838	21,5	63,5	0,84
25ХГМНТБА	$H_{930^\circ} + 3_{A_{c1}}^{760^\circ} + 20^\circ + 0_{610^\circ}$	732	814	19,6	62,0	1,09
25ХГМНТБА	$H_{930^\circ} + 3_{A_{c1}}^{780^\circ} + 40^\circ + 0_{610^\circ}$	747	900	20,0	63,0	1,19
25ХГМНТБА	$H_{930^\circ} + 3_{A_{c3}}^{800^\circ} + 0_{610^\circ}$	714	914	18,9	63,7	1,38
25ХГМНТБА	$H_{930^\circ} + 3^{830^\circ} + 0_{610^\circ}$	592	697	20,6	79,1	0,2
25ХГМНТБА	$H_{930^\circ} + 3_{A_{c3}}^{850^\circ} + 50^\circ$	864	935	15,6	70,0	1,10
25ХГМНТБА	$H_{930^\circ} + 3_{A_{c3}}^{900^\circ} + 100^\circ + 0_{610^\circ}$	1005	1080	15,0	62,0	0,99

--	--	--	--	--	--	--

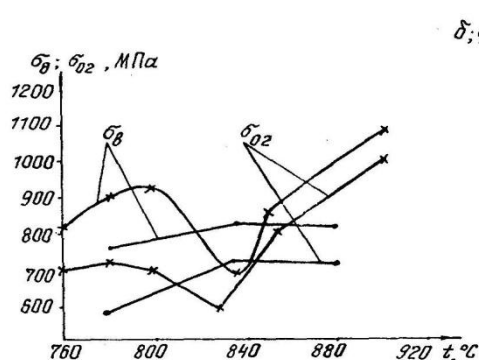


Рис. 3. Зависимость предела прочности и предела текучести от температуры закалки:  
 - сталь 26Г2СБА;  
 - сталь 25ХГМНТБА

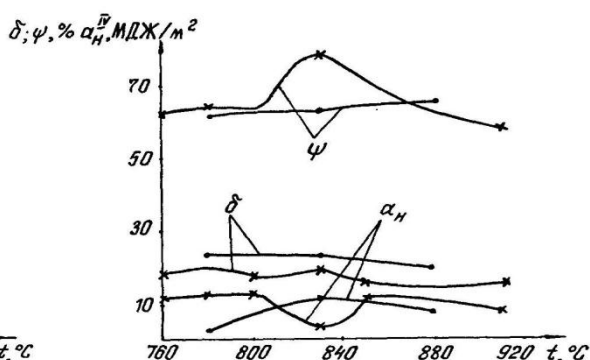


Рис. 4. Зависимость пластических и вязких характеристик от температуры закалки:  
 - сталь 26Г2СБА;  
 - сталь 25ХГМНТБА

Анализ полученных данных показывает, что для стали 26Г2СБА характерно повышение пределов текучести и прочности с увеличением температуры закалки от 780° до 830°С. При дальнейшем увеличении температуры закалки от 830° до 880°С характеристики  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_{в}$  не изменяются. Сталь 25ХГМНТБА имеет провал прочностных свойств  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_{в}$ , а также провал ударной вязкости при температуре 830°С. Пластические свойства стали 26Г2СБА находятся на высоком уровне во всем диапазоне исходных температур. У стали 25ХГМНТБА в районе спада прочности наблюдается увеличение относительного сужения, однако с повышением температуры закалки значения относительного сужения снижаются. Ударная вязкость стали 26Г2СБА характеризуется значительным увеличением при температуре 830°С, соответствующей температуре  $A_{с3}$ .

Ударная вязкость стали 25ХГМНТБА достигает максимального значения при температуре 800°С, также соответствующей температуре  $A_{с3}$ .

Таким образом, оптимальное сочетание прочностных, пластических и вязких свойств исследуемых сталей достигается при закалке с температуры  $A_{с3}$  – для стали 26Г2СБА при 830°С, а для стали 25ХГМНТБА при 800°С. Оптимальная температура отпуска определялась на пластинах 20x130x250 мм, прошедших нормализацию при температуре  $A_{с3}+100^{\circ}C$  и закалку при температуре  $A_{с3}$ .

По две пластины стали 26Г2СБА нагревали до температуры 590, 610, 630°С, выдерживали при этих температурах по два часа из расчета 6 мин на 1 мм сечения и затем одну пластину охлаждали в воде, а другую на воздухе. Пластины стали 25ХГМНТБА после отпуска охлаждали только в воде. Вырезку образцов и испытание проводили по ранее приведенной методике. Результаты испытаний образцов и зависимость механических свойств от температуры отпуска приведены в табл. 3 и на рис. 5, 6.

Таблица 3

Зависимость механических свойств опытных сталей от температуры отпуска

Марка стали	Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\alpha_{Н4}^{0^{\circ}}$ , МДж/м <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
26Г2СБА	$H_{930^{\circ}} + A_{с3}^{830} + 0_{590}$	749	864	22,3	63,0	0,85
26Г2СБА	$H_{930^{\circ}} + A_{с3}^{830} + 0_{590, \text{воздух}}$	753	867	20,8	60,0	0,85

26Г2СБА	$H_{930^\circ} + A_{C3}^{830} + O_{610}$	713	848	21,2	62,0	0,59
---------	--	-----	-----	------	------	------

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + A_{C3}^{830} + O_{610}$ , ВОЗДУХ	709	826	22,7	63,0	0,72
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + A_{C3}^{830} + O_{630}$	632	762	24,4	64,0	0,72
26Г2СБА	$H_{930^\circ} + A_{C3}^{830} + O_{630}$ , ВОЗДУХ	591	751	25,3	64,7	0,58
25ХГМНТБА	$H_{930^\circ} + A_{C3}^{830} + O_{590}$	779	871	19,25	65,7	0,141
25ХГМНТБА	$H_{990^\circ} + A_{C3}^{800} + O_{610}$	682	824	20,8	67,5	0,144
25ХГМНТБА	$H_{990^\circ} + A_{C3}^{800} + O_{630}$	626	744	23,0	68,3	0,128

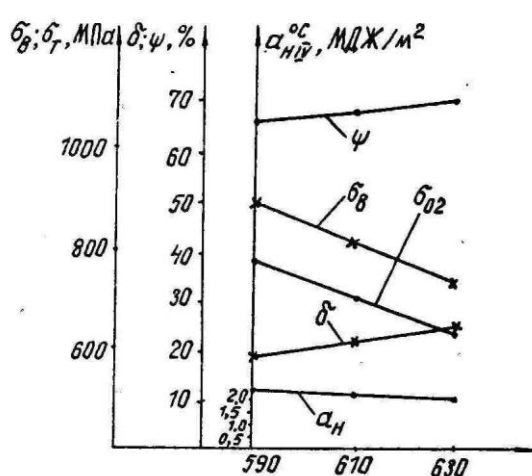


Рис. 5. Зависимость механических свойств стали 25ХГМНТБА от температуры отпуска с охлаждением в воде

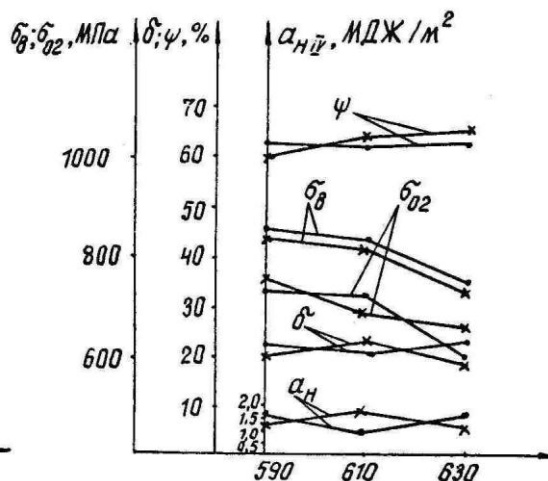


Рис. 6. Зависимость механических свойств стали 26Г2СБА от температуры отпуска:  
- с охлаждением в воде;  
- с охлаждением на воздухе

Исследования микроструктуры образцов после улучшения (закалка+отпуск) показала, что структура имеет сорбитообразный характер с наличием равномерно распределенного игольчатого феррита, а такая структура позволяет получить высокие физико-механические свойства.

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что оптимальное сочетание прочностных пластических и вязких свойств достигается для стали 26Г2СБА при температуре отпуска 590°C с охлаждением заготовок после отпуска в воде.

### Выводы

1. Оптимальным режимом термической обработки проката из стали 26Г2СБА является нормализация от 930°C, закалка от  $A_{C3}$  (830°C) и высокий отпуск при температуре 590-610°C с последующим охлаждением в воде.

2. Оптимальным режимом термической обработки проката из стали 25ХГМНТБА является нормализация от 930°C, закалка из межкритического интервала от  $A_{C1} + (40-60^\circ C)$  и высокий отпуск при температуре 600°C с последующим охлаждением в воде.

Кроме того, обе марки стали не только обеспечивают требования МАКО к цепям по-

вышенной и особой категории прочности по прочностным и пластическим характеристикам, но и значительно превышают их.

#### Библиографический список

1. Астафьев, А.А. Разработки режимов термообработки и межкритического интервала температур стали 10Г2Н2МФЛ / А.А. Астафьев, С.И. Марков // ЦНИИТМАШ. 1987. Т. 255. С. 10.
2. Марченко, Б.А. Закалка сталей от межкритических температур // МИТОМ. 1985. №3. С. 57.
3. Полушкин, Н.А. Особенности режима термической обработки низколегированной стали 26Г2СТА / Н.А. Полушкин, Л.П. Казанский, А.Д. Клипов, З.Ф. Кильдюшева // МИТОМ. 1990. № 6. С. 7.

*Дата поступления  
в редакцию 02.12.2013*

**L.P. Kazansky, V L. Sivkov, L.M. Bistina**

### INVESTIGATION OF HEAT MODE ON QUALITY ROLLED PRODUCTS OF STRUCTURAL LOW-ALLOY STEEL 26G2SBA AND 25HGMNTBA

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** Increase the plastic and viscous characteristics while maintaining sufficiently high strength properties - the main task in the development mode. Heat treatment of steel and 26G2SBA 25HGMNTBA.

**Design/methodology/approach:** Explore different modes of heat treatment of rolled steel and 26G2SBA 25HGMNTBA and select the best option, providing the requirements of IACS and RF Register to anchor chains made of these steels.

**Findings:** 1. Optimal mode of heat treatment of rolled steel 26G2SBA is the normalization of 930 ° C, quenching from AC3 ( 830 ° C) and high temperature tempering at 590-610 ° C, followed by cooling in water. 2. Optimal thermal treatment of rolled steel is normalized 25HGMNTBA from 930 ° C of tempering intercritical range of Ac1 + (40-60 ° C) and high temperature tempering at 600 ° C followed by cooling in water. In addition, both brands have become not only provide IACS requirements for chains and increased strength as a special category of strength and ductility characteristics, but also far exceed them.

**Research limitations/implications.** Study the microstructure of the samples after improvement (quenching + tempering) showed that the structure has sorbitoобразny character with the presence of uniformly distributed acicular ferrite, and such a structure allows to obtain high mechanical properties.

**Originality/value.** The critical points Ac1 and Ac3, the tendency of steel to grain growth during heating, as well as the kinetics of phase transformations of super cooled austenite.

*Key words:* Low alloy structural steel, heat treatment - normalization, hardening, tempering, critical points, structural transformations, structure sorbitoобразnaya after improvement, the kinetics of phase transformations.