

zrazka v umovakh mistsevoi termoobrobki. Fizika i khimiya tverdogo tila. 2008, vol. 9, no. 1, pp. 181-184.

7. Леонтьев П. А. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. / П. А. Леонтьев, Н. Т. Чеканов, М. Г. Хан. – М.: Metallurgiya, 1986. – 142 с.

Leont'ev P. A., Chekanov N. T., Khan M. G. *Lazernaya poverkhnostnaya obrabotka metallov i splavov.* Moscow, Metallurgiya, 1986, 142 p.

Purpose. The goal of work is elucidation of principal generalities of transformation of interphase inclusion-matrix boundaries and formation of zones of contact interaction under laser treatment of steels and influence of these zones on the development of cracks near non-metallic inclusions during plastic deformation. It was fixed under laser strengthening of steels containing non-metallic inclusions takes place combination laser heat treatment with micro-alloying of local section of matrix from inner sources – non-metallic inclusions. The level of strengthening of inclusion-matrix boundary is defined by optimal relationship of speeds of dissipation and activation processes. Investigation of peculiarities of formation of contact interaction zones in steel matrix and inclusions and also of the strengthening of inclusion-

matrix boundaries was allowed to determine the series of principles of their transformation under laser action and their influence on the local strengthening of steel matrix. It was shown that local microwelding in the moment of laser action promotes raise the cohesive strength of these boundaries.

Originality. The peculiarities of structure of gradiental and composite micro-zones arising in the moment of laser action and also their influence on the formation and development of cracks near non-metallic inclusions during plastic deformation were determined.

Practical value. The using of receiving results will allow to elaborate the regimes of laser treatment allowing to use the non-metallic inclusions as inner sources of micro-alloying that will allow to directly influence on the level of strengthening of steel under laser treatment and also on the cracking resistance of steels.

Key words: steel, non-metallic inclusions, inclusion-matrix boundary, laser treatment, cohesive strengthening, cracks, plastic deformation.

Рекомендована к публикации
д. т. н. В. З. Куцовой

Поступила 23.05.2017



УДК 669.15.74.-194-15.669.17

Наука

Л. С. Малинов /д. т. н./, Д. В. Бурова /к. т. н./

Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина,
e-mail: Malinovadasha@yandex.ru

Влияние термообработки с нагревом в межкритический интервал температур на структуру, фазовые превращения и механические свойства малоуглеродистой низколегированной стали

L. S. Malinov /Dr. Sci. (Tech.),
D. V. Burova /Cand. Sci. (Tech.)/

Priazov State Technical University,
Mariupol, Ukraine,
e-mail: Malinovadasha@yandex.ru

Influence of heat treatment with heating in the intercritical temperature interval on the structure, phase transformations and mechanical properties of low-carbon low-alloy steel

Цель. Изучение влияния термической обработки с нагревом в межкритический интервал температур (МКИТ) на структуру, фазовые превращения и механические свойства стали 25Х1М1Ф.

Методика. Проводилось построение термодинамических диаграмм (ТКД) изучаемой стали при ее охлаждении с различными скоростями из аустенитной области и МКИТ. В исследованиях применялись дю-

рометрический, металлографический методы, а также рентгеновский фазовый анализ. Определялись механические свойства при растяжении (ГОСТ 1497-84) и ударная вязкость (ГОСТ 9454-78).

Результаты. Показана целесообразность проведения закалки, в том числе прерывистой и изотермической, стали 25X1M1Ф из межкритического интервала температур (МКИТ). Это обеспечивает энергосбережение и хорошее сочетание механических свойств за счет получения многофазной структуры с метастабильным аустенитом, претерпевающим при нагружении динамическое деформационное мартенситное превращение (ДДМП).

Научная новизна. Из сравнения построенных для стали 25X1M1Ф термокинетических диаграмм (ТКД) при охлаждении из аустенитной области и из МКИТ обнаружено, что во втором случае по сравнению с первым, устойчивость переохлажденного аустенита к распаду в перлитном и бейнитном интервалах температур выше, а мартенситная точка ниже. Установлено, что после рациональных режимов термообработки с нагревом в МКИТ исследованная сталь с многофазной структурой, в которой наряду с отпущенным мартенситом, нижним бейнитом присутствует небольшое количество феррита метастабильного аустенита и нерастворившихся при неполной аустенитизации карбидов, имеет повышенный уровень механических свойств.

Практическая значимость. Показано, что сталь 25X1M1Ф после термообработки с нагревом в МКИТ может использоваться не только после закалки и высокого отпуска, как это в основном реализуется в настоящее время, но и после низкого отпуска, прерывистой и изотермической закалки. Это позволяет расширить области ее применения и обеспечить энергосбережение. (Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.)

Ключевые слова: закалка, межкритический интервал температур (МКИТ), многофазная структура, мартенсит, феррит, остаточный аустенит.

Постановка проблемы. Одним из эффективных направлений энергосбережения является разработка и внедрение в производство технологий термообработки с нагревом в МКИТ, обеспечивающих получение многофазной структуры, сочетающей различные по свойствам составляющие (мартенсит, нижний бейнит, феррит, аустенит, карбиды, карбонитриды, интерметаллиды). Не во всех случаях должны быть в структуре все перечисленные составляющие, но важно присутствие метастабильного аустенита, претерпевающего динамическое деформационное мартенситное превращение (ДДМП), являющееся не только механизмом упрочнения, но и релаксации микронапряжений [1; 2]. Идея использования метастабильного аустенита, превращающегося в мартенсит деформации при испытаниях механических свойств и эксплуатации, предложена и реализована еще в середине 50-х годов прошлого века И. Н. Богачевым и Р. И. Минцем [3; 4].

В доэвтектоидных низколегированных сталях получить многофазную структуру можно закалкой из МКИТ. В настоящее время промышленное применение нашла лишь закалка из МКИТ низкоуглеродистых низколегированных сталей, предназначенных для изготовления деталей глубокой вытяжкой и холодной высадкой, после которой они приобретают повышенную прочность [5], и сталей для криогенной техники [6].

Большой научный и практический интерес представляет дальнейшее изучение закономерностей структурных и фазовых превращений, обусловленных нагревом и выдержкой в МКИТ доэвтектоидных сталей различного химического состава и назначения, широко применяемых в промышленности, с целью получения в них

многофазной микронеоднородной структуры, включающей, в том числе, метастабильный аустенит, претерпевающий ДДМП. Данная работа посвящена изучению этого вопроса применительно к стали 25X1M1Ф. Она поставлена по ГОСТ 8479-70), применяется для изготовления цельнокованных валов, роторов, дисков, роликов МНЛЗ и других деталей, работающих при температурах до 540 °С. Она также используется для деталей разнообразного назначения. Основная термообработка, которой подвергаются изделия из этой стали, включает закалку из аустенитной области и, как правило, высокий отпуск.

Изложение основных результатов исследований. Исследованная сталь имеет следующий химический состав: 0,25 % С; 0,27 % Si; 0,6 % Mn; 1,1 % Cr; 0,9 % Mo; 0,32 % V; 0,21 % Ni; 0,20 % Cu; 0,015 % S; 0,020 % P. Ее критические точки находятся при температурах: $A_{c1} - 780$ °С, $A_{c3} - 860$ °С.

В работе построены ТКД стали 25X1M1Ф, при охлаждении из аустенитной области и из МКИТ. Во втором случае на ТКД не обнаружен температурный интервал образования нового феррита. Устойчивость переохлажденного аустенита в перлитном и бейнитном интервалах температур несколько увеличилась, о чем свидетельствует смещение вправо линий начала соответствующих превращений. Мартенситная точка M_n понизилась от 370 до 320 °С (рис. 1а, 1б). Повышение устойчивости переохлажденного аустенита к диффузионному и промежуточному превращениям, а также снижение точки M_n обусловлено повышенным содержанием углерода и марганца в аустените за счет уменьшения их доли в феррите из-за перераспределения данных элементов между этими фазами при выдержке в МКИТ [7]. Повышенное содер-

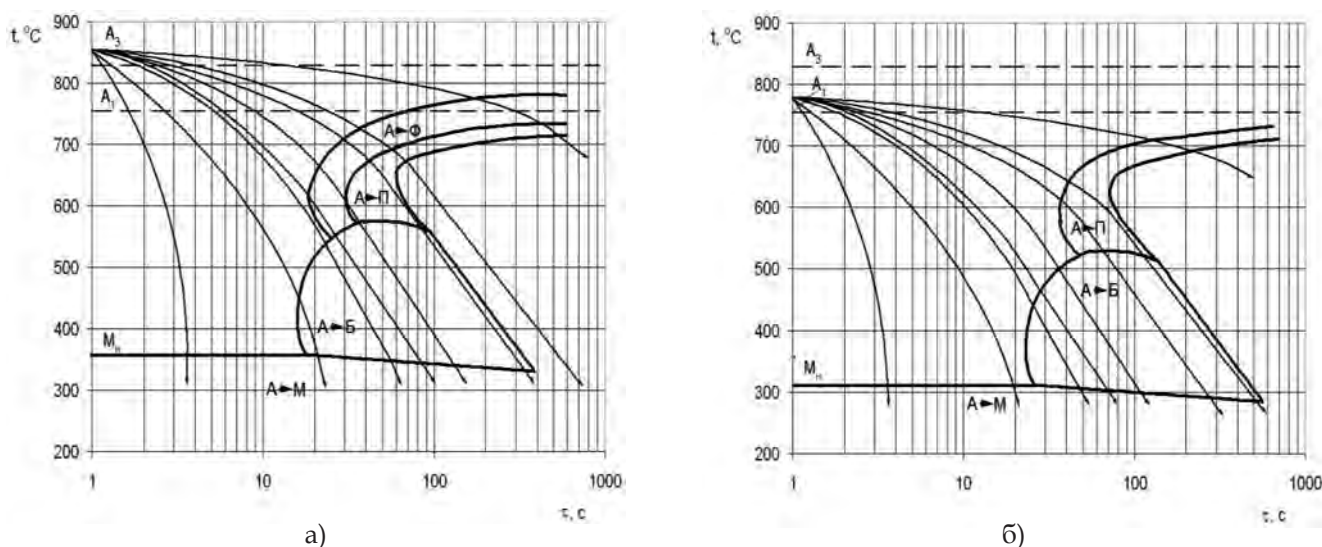


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма стали 25X1M1Ф после охлаждения:
 а) – из аустенитной области с температуры 880 °С; б) – из МКИТ с температуры 790 °С

жание углерода и марганца в аустените при нагреве в МКИТ и выдержке в нем может способствовать появлению в структуре после закалки, в том числе прерывистой и изотермической, наряду с мартенситом или бейнитом остаточного аустенита, оказывающего заметное влияние на механические свойства сталей [1; 2].

Исследовалось влияние температуры нагрева и выдержки в МКИТ на изменение твердости и микроструктуры стали 25X1M1Ф после закалки в воду. Повышение температуры нагрева под закалку в МКИТ приводит в исследуемой стали к увеличению значений твердости (рис. 2). Это обусловлено увеличением количества аустенита и растворившихся в нем карбидов, а также снижением доли феррита в структуре при нагреве до все более высоких температур [7]. Соответственно, возрастает количество мартенсита после закалки и содержание в нем углерода. Доля в структуре феррита снижается до 40 % после закалки с 800 °С, до 25 % после закалки с 840 °С.

Наибольший прирост твердости при всех температурах нагрева в МКИТ происходит за сравнительно короткое время (10 мин).

Дальнейшее увеличение выдержки до 60 мин приводит к незначительному увеличению твердости. Возрастание последней при увеличении выдержки в МКИТ обусловлено теми же причинами, что и при росте температуры в этом интервале. Происходит увеличение количества мартенсита в структуре и его твердости после закалки, уменьшается доля феррита и карбидов.

Было исследовано влияние температуры нагрева под закалку из аустенитной области (880 °С) и из МКИТ (800 °С, 820 °С, 840 °С, выдержка 2 мин/мм) на механические свойства стали 25X1M1Ф после отпуска при 500 °С 1 ч (рис. 3). По мере повышения температуры на-

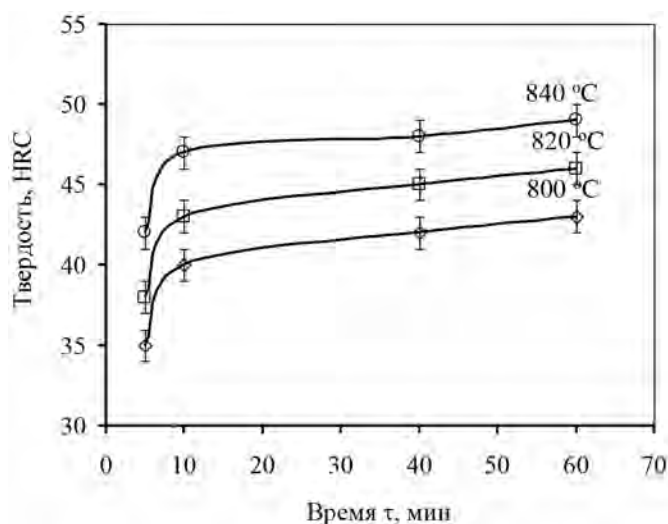


Рис. 2. Зависимость твердости стали 25X1M1Ф от времени выдержки и температуры закалки из МКИТ

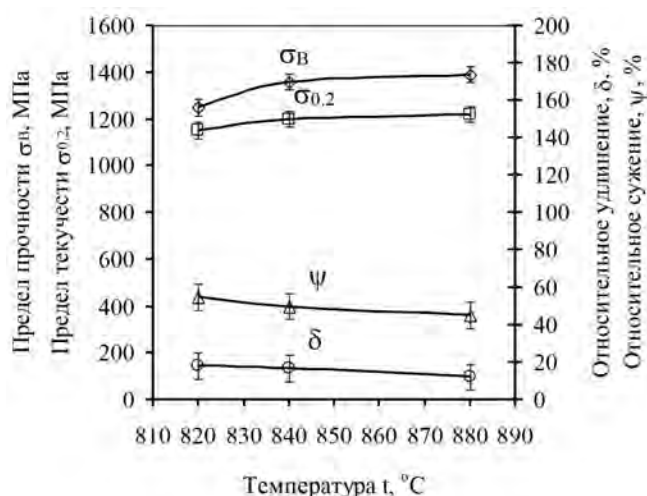


Рис. 3. Влияние температуры нагрева под закалку стали 25X1M1Ф на ее механические свойства после отпуска при 550 °С, 60 мин



грева в МКИТ прочностные свойства исследованной стали возрастают, а пластические характеристики снижаются. После закалки с 840 °С и высокого отпуска прочностные свойства стали 25Х1М1Ф лишь незначительно ниже, чем после типовой термообработки, а пластичность выше, что можно объяснить присутствием феррита в структуре. Снижение температуры отпуска с 500 °С до 400 °С после проведения закалки из МКИТ (с 840 °С) позволяет получить почти такой же уровень механических свойств, что и после проведения закалки по типовому режиму с нагревом на 880 °С и отпуском при 500 °С (табл. 1). Это делает закалку из МКИТ еще более предпочтительной. Сравнение свойств стали 25Х1М1Ф после закалки из МКИТ и отпуска при 550 °С и 600 °С со свойствами, приведенными в работе [8] для сталей 30ХНЗМФА и 18Х2Н4А после улучшения по типовому режиму, показывает, что исследуемая сталь имеет прочностные свойства, пластичность и ударную вязкость выше, чем никельсодержащие стали.

Из этого следует, что, в ряде случаев, когда не требуется особенно высокая прокаливаемость и низкий порог хладноломкости, а детали должны иметь повышенный уровень механических свойств, сталь 25Х1М1Ф может быть использована после улучшения с закалкой из МКИТ, вместо более дорогих сталей с повышенным содержанием никеля.

Новые возможности открывает применение стали 25Х1М1Ф, закаленной из МКИТ в низкоотпущенном состоянии. После закалки из МКИТ (840 °С, 2 мин/мм) и отпуска 200 °С, 1 ч сталь 25Х1М1Ф имеет временное сопротивление, соответствующее высокопрочному состоянию, а ее пластичность и ударная вязкость находятся на примерно таком же уровне, как у никельсодержащих сталей после улучшения [8] (табл. 1). Такое сочетание механических свойств обеспечивает многофазная структура, в которой присутствуют нижний бейнит, 15–20 % феррита, 7–10 % остаточного аустенита и небольшое количество не растворившихся при неполной аустенитизации карбидов. Остаточный аусте-

нит является метастабильным. Об этом свидетельствуют данные рентгеновского фазового анализа, согласно которому на дифрактограмме после испытаний образцов исчезает линия, соответствующая γ -фазе, имевшаяся до испытаний, а площадь под кривой α -фазы несколько увеличивается за счет образования мартенсита деформации.

Исследовалась возможность получения хорошего комплекса механических свойств у стали 25Х1М1Ф после термообработок, исключая проведение после закалки из МКИТ и отпуска. Они требуют наименьших энергозатрат. Такими термообработками являются прерывистая закалка с охлаждением в воде до 400 °С, а затем на воздухе, и изотермическая закалка с перерывом до температуры изотермы и выдержкой при этой температуре с последующим охлаждением на воздухе. Механические свойства стали 25Х1М1Ф после таких термообработок приведены в табл. 2.

После прерывистой закалки с нагревом в МКИТ (840 °С) ее механические свойства значительно отличаются от полученных после закалки с той же температуры и отпуска при 550 °С (табл. 1, 2). Это показывает возможность в ряде случаев (если не требуется теплостойкость) замены улучшения стали 25Х1М1Ф прерывистой закалкой, что упрощает термообработку и обеспечивает энергосбережение. Хороший комплекс механических свойств, получаемый у стали 25Х1М1Ф после прерывистой закалки, так же, как после закалки и низкого отпуска, обусловлен получением многофазной структуры, состоящей из малоуглеродистого мартенсита, нижнего бейнита, феррита небольшого количества остаточного метастабильного аустенита (~7 %) и карбидов.

Изотермическую закалку сталей обычно проводят из аустенитной области, охлаждая их в расплаве солей или щелочей при температурах образования нижнего бейнита. Ее реализуют для получения требуемой прочности при повышенном уровне пластичности и вязкости. Это обычно объясняют получением структуры

Таблица 1

Механические свойства стали 25Х1М1Ф после закалки из аустенитной области с 880 °С и МКИТ (выдержка 2 мин/мм), последующего отпуска (выдержка 1 ч)

Термическая обработка	Механические свойства				
	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
Н. 880 °С, о. 500 °С	1380	1207	10	47	0,92
Н. 840 °С, о. 200 °С	1612	1419	11	48	0,94
Н. 840 °С, о. 400 °С	1377	1216	11	50	1,00
Н. 840 °С, о. 550 °С	1235	1118	13	53	1,22
Н. 840 °С, о. 600 °С	1163	1074	14	54	1,38

Примечание. Н – нагрев, о – отпуск.

Механические свойства стали 25Х1М1Ф после закалки из МКИТ с 840 °С (выдержка 2 мин/мм): прерывистой (охлаждение в воде до 400 °С, дальнейшее охлаждение на воздухе), изотермической (охлаждение в воде до 350 °С, различные выдержки при этой температуре в печи и охлаждение на воздухе)

Термическая обработка	Механические свойства				
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
1. Прерывистая закалка	1250	1120	12	52	1,1
2. Изотермическая закалка, 10 мин	1286	1157	13	52	0,8
3. То же, что 2, 30 мин	1398	1297	12	54	0,9
4. То же, что 2, 60 мин	1306	1199	13	54	1,04

нижнего бейнита. Для исследуемой стали изотермическая закалка из МКИТ ранее не применялась. Особенностью изотермической закалки в данной работе является то, что в отличие от общепринятой методики охлаждения из МКИТ (840 °С) проводилось не в расплаве солей, а в воде до температуры изотермы (350 °С). Выдержка осуществлялась при этой температуре в печи. Данные о влиянии изотермической закалки из МКИТ на механические свойства стали 25Х1М1Ф приведены в табл. 2.

Прочностные свойства в зависимости от продолжительности выдержки изменяются неоднозначно. Они достигают максимума при выдержке 30 мин, а при ее увеличении до 60 мин уже снижаются. При этом пластические характеристики изменяются мало, а ударная вязкость несколько возрастает (табл. 2). Полученные результаты можно объяснить действием одновременно протекающих конкурирующих разнонаправленных процессов. С одной стороны, при увеличении длительности пребывания образцов при температуре изотермы возрастает количество нижнего бейнита и уменьшается доля остаточного аустенита. Согласно данным рентгеновского анализа, его количество в структуре стали 25Х1М1Ф после выдержек 10, 30 и 60 мин при 350 °С составляет, соответственно, 15 %, 9, и 5 %. Это должно повышать прочностные свойства и снижать пластичность и ударную вязкость. С другой стороны, увеличение изотермической выдержки уменьшает плотность дислокаций и содержание углерода в бейните, что должно снижать прочностные свойства и увеличивать пластичность и ударную вязкость. Наиболее высокие прочностные свойства при достаточной пластичности и ударной вязкости, полученные после изотермической выдержки 30 мин при 350 °С, могут быть объяснены получением наиболее благоприятной структуры и развитием ДДМП при испытании механических свойств (ПНП-эффект).

Сравнивая механические свойства стали 25Х1М1Ф, закаленной из аустенитной области с 880 °С, после отпуска при 550 °С (табл. 1) и изотермической закалки из МКИТ с 840 °С по оп-

тимальному режиму (табл. 2), можно сделать вывод о целесообразности ее использования вместо улучшения по типовой технологии. При этом могут быть снижены энергозатраты на термообработку, так как не нужен высокий отпуск.

Полученные в работе данные показывают, что в ряде случаев целесообразно проведение термообработки с закалкой (в одном охладителе, прерывистой, изотермической) из МКИТ. После закалки может проводиться не только высокий, в том числе при пониженной температуре, но и низкий отпуск.

После различных термообработок с нагревом до более низких температур, чем это принято в настоящее время, обеспечивающих энергосбережение, сталь 25Х1М1Ф имеет хорошее сочетание механических свойств.

Выводы

1. Из сравнения ТКД, построенных для стали 25Х1М1Ф с охлаждением из аустенитной области и МКИТ, следует, что во втором случае аустенит имеет большую устойчивость по отношению к перлитному и бейнитному превращениям, а также более низкую мартенситную точку.

2. После закалки из МКИТ с 840 и отпуска, более низкого на 100 °С, чем обычно применяемый (500 °С), может быть получен такой же уровень механических свойств, как после улучшения по типовому режиму с закалкой из аустенитной области.

3. Сталь 25Х1М1Ф после закалки из МКИТ и низкого отпуска имеет временное сопротивление, соответствующие высокопрочному состоянию. При этом пластичность и ударная вязкость сохраняются на уровне, соответствующему таковому у большой группы улучшаемых сталей.

4. После прерывистой и изотермической закалок исследованной стали отпуск может не проводиться, т. к. достигается хорошее сочетание прочностных свойств, пластичности и ударной вязкости, что обусловлено получением многофазной микронеоднородной структуры с метастабильным аустенитом, претерпевающим ДДМП (ПНП-эффект).

Библиографический список / References

1. Малинов Л. С. Разработка экономнолегированных высокопрочных сталей и способов упрочнения с использованием принципа регулирования мартенситных превращений: дис. ... д-ра техн. наук: (05.16.01) / Л. С. Малинов. – Екатеринбург: УПИ, 1992. – 381 с.
Malinov L. S. (1992). *Razrabotka ekonomnolegirovannykh vysokoprochnykh staley i sposobov uprochneniya s ispolzovaniem printsipa regulirovaniya martensitnykh prevrashcheniy* [Development of economically high-strength steels and methods of hardening using the principle of regulation of martensitic transformations] (Dr. Thesis). Yekaterinburg, UPI, 381 p.
 2. Малинов Л.С. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов. - Мариуполь: Рената, 2009. - 567 с.
Malinov L. S., Malinov V. L. (2009). *Resursosberegayushchie ekonomnolegirovannyye splavy i uprochnyayushchie tekhnologii, obespechivayushchie effekt samozakalki* [Resources saving economically alloyed alloys and strengthening technology, providing self-hardening effect]. Mariupol, Renata, 567 p.
 3. Богачев И. Н. Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов / И. Н. Богачев, Р. И. Минц. - М.; Свердловск: ГНТИ Машиностроительной литературы, 1959. - 110 с.
Bogachev I. N., Mints R. I. (1959). *Kavitatsionnoe razrushenie zhelezouglerodistykh spлавov* [Cavitation destruction of iron-carbon alloys]. Sverdlovsk, GNTI Mashinostroitelnoy literatury, 110 p.
 4. Богачев И. Н. Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин / И. Н. Богачев, Р. И. Минц. - М.: Машиностроение, 1964. - 142 с.
Bogachev I. N., Mints R. I. (1964). *Increasing of the cavitation-erosion resistance of machine parts*. Moscow, Mashinostroenie, 142 p.
 5. Голованенко С. А. Двухфазные низколегированные стали / С. А. Голованенко, Н. М. Фонштейн. - М.: Металлургия, 1986. - 207 с.
Golovanenko S. A., Fonshteyn N. M. (1986). *Dvukhfaznye nizkolegirovannyye stali* [The biphasic low-alloy steel]. Moscow, Metallurgiya, 207 p.
 6. Хомская И. В. Структура, формирующаяся в двухфазной ($\alpha + \gamma$) области, и механические свойства криогенного сплава 10N7 / И. В. Хомская // Физика металлов и материаловедение. - 2010. - Т. 110 (вып. 2). - С. 197-208.
Khomskaya I. V. (2010). *Struktura, formiruyushchayasya v dvukhfaznoy ($\alpha + \gamma$) oblasti, i mekhanicheskie svoystva kriogennogo splava 10N7* [The structure formed in the two-phase ($\alpha + \gamma$) area and the mechanical properties of the cryogenic alloy 10N7]. The Physics of Metals and Metallography, vol. 110, no. 2, pp. 197-208.
 7. Дьяченко С. С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / С. С. Дьяченко. - М.: Металлургия, 1982. - 127 с.
Dyachenko S. S. (1982). *Obrazovanie austenita v zhelezouglerodistykh splavakh* [Formation of austenite in iron-carbon alloys]. Moscow, Metallurgiya, 127 p.
 8. Гольдштейн М. И. Специальные стали / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. - М.: МИСИС, 1999. - 408 с.
Goldshhteyn M. I., Grachev S. V., Veksler Yu. G. (1999). *Spetsialnye stali* [Special steels]. Moscow, MISIS, 408 p.
- Purpose.** Study of the effect of heat treatment with heating in the intercritical temperature range (MIT) on the structure, phase transformations and mechanical properties of 25Kh1M1F steel.
- Methodology.** The construction of thermokinetic diagrams (TCD) of the steel under study during its cooling with different velocities from the austenite region and MCIT was carried out. The studies used durometric, metallographic methods of investigation, as well as X-ray phase analysis. The mechanical properties under tension (GOST 1497-84) and impact strength (GOST 9454-78) were determined.
- Findings.** The expediency of hardening, including intermittent and isothermal, of 25Kh1M1F steel from the intercritical temperature range (MKIT) is shown. This provides energy saving and a good combination of mechanical properties due to the production of a multiphase structure with a metastable austenite undergoing a dynamic martensitic transformation (DDMP) under loading.
- Originality.** From the comparison of the thermokinetic diagrams (TCD) constructed for 25Kh1M1F steel upon cooling from the austenite region and from the MIT, it was found that in the second case, compared with the first, the stability of the supercooled austenite to decay in the perlitic and bainitic temperature ranges is higher, and the martensite point is lower. It has been established that after rational heat treatment regimes with heating in MCIT, the investigated steel with a multiphase structure, in which along with tempered martensite, lower bainite there is a small amount of ferrite of metastable austenite and insoluble in the case of incomplete austenitization of carbides, has an increased level of mechanical properties.
- Practical value.** It is shown that the 25Kh1M1F steel after heat treatment with heating in MKIT can be used not only after quenching and high tempering, as it is mainly realized at present, but also after low tempering, intermittent and isothermal quenching. This allows us to expand the scope of its application and to provide energy saving.
- Key words.** Hardening, intercritical temperature range (MKIT), multiphase structure, martensite, ferrite, residual austenite.

Рекомендована к публикации
д. т. н. В. З. Куцовой
Поступила 13.02.2017