

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКОЙ ИЗ МЕЖКРИТИЧЕСКОГО ИНТЕРВАЛА ТЕМПЕРАТУР (МКИТ), СОЗДАЮЩЕЙ МНОГОФАЗНУЮ СТРУКТУРУ

Показано, что изотермическая закалка из МКИТ по схеме «вода-печь» позволяет в среднеуглеродистых низколегированных сталях получить многофазную структуру (бейнит, феррит, метастабильный аустенит, в ряде случаев карбиды), обеспечивающую повышенный по сравнению с улучшением уровень механических свойств и абразивную износостойкость.

Ключевые слова: межкритический интервал температур (МКИТ), изотермическая закалка, многофазная структура, бейнит, метастабильный аустенит.

Введение

Важной научной и практической задачей, обеспечивающей ресурсосбережение, является повышение уровня механических свойств и износостойкости применяемых в промышленности сталей.

Во многих случаях для получения хорошего сочетания механических свойств у низколегированных среднеуглеродистых сталей их подвергают улучшению, включающему закалку из аустенитной области и высокий отпуск. При этом зачастую в качестве охлаждающей среды при закалке используют дорогое и пожароопасное масло. Его же применяют для ускоренного охлаждения деталей после высокого отпуска с целью предотвращения высокотемпературной отпускной хрупкости у сталей, не содержащих молибден и вольфрам. После охлаждения в масле необходима промывка деталей, увеличивающая продолжительность технологического процесса.

Исходя из вышесказанного, улучшение требует значительных энергозатрат и большого количества расходных материалов. В связи с этим необходимо использование альтернативной технологии термообработки, лишенной указанных недостатков.

В работе [1] предложено для обеспечения повышенного уровня механических свойств в сплавах на желез-

ной основе получать многофазную структуру (мартенсит, нижний бейнит, феррит, карбиды и др.), одной из основных составляющих которой является метастабильный аустенит, претерпевающий динамическое деформационное мартенситное превращение (ДДМП). С учетом требуемых механических свойств и условий нагружения при испытаниях или эксплуатации структурой и развитием ДДМП необходимо управлять [1]. Наряду с этим следует использовать другие известные механизмы упрочнения и повышения сопротивления хрупкому разрушению (зернограничный, субструктурный и др.).

Одним из вариантов реализации рассматриваемого направления по получению в сталях и чугунах многофазной структуры, в которой присутствует нижний бейнит, феррит (в ряде случаев карбиды) и остаточный метастабильный аустенит является применение изотермической закалки из МКИТ. Обычно изотермическую закалку проводят с нагревом в аустенитную область, последующим охлаждением и выдержкой в расплаве солей, которые неэкологичны и взрывоопасны при попадании в них влаги. Во многих работах высокий комплекс механических свойств и износостойкости после такой закалки сталей и высокопрочного чугуна объясняют только особенностями строения нижнего бейни-

та. При этом влияние количества и стабильности остаточного аустенита, также присутствующего в структуре, обычно не учитывается. Между тем, они играют исключительно важную роль, что было показано еще в работе [2]. Установлено [3], что после изотермической заковки из МКИТ низколегированной стали 37ГС получение структуры, состоящей из феррита, бейнита и остаточного аустенита, превращающегося при испытаниях свойств в мартенсит деформации, позволяет обеспечить хорошее сочетание прочности и высокой пластичности, обычно не достигаемой в этой стали традиционными обработками. По данным авторов работы [3] получение в структуре остаточного аустенита обусловлено прежде всего перераспределением углерода между α - и γ - фазами в МКИТ и обогащением им последней, но также протеканием этого процесса при ускоренном охлаждении до температуры начала интенсивного изотермического превращения и в процессе его развития, следствием чего является понижение мартенситной точки.

В последнее десятилетие появляются работы [4–6] по созданию, исследованию и промышленному применению низколегированных малоуглеродистых сталей (0,10–0,22 % С; 1,35 % Мп; 1,35 % Si), в которых также получают ферритно- бейнитно- аустенитную структуру. Достигаемую в этих сталях при повышенной прочности высокую пластичность объясняют эффектом ПНП (пластичность наведенная превращением), обусловленным ДДМП. Данные по изотермической заковке из МКИТ немногочисленны [7–10], особенно это относится к среднеуглеродистым низколегированным сталям.

Следствием этого является то, что такая термообработка на практике не применяется. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования по данному вопросу, чему и посвящена данная работа.

Материалы и методика исследований

Для исследований были выбраны широко применяющиеся стали 30ХГСА, 38ХС, 40Г, 40Х, 40ХН2МА, химический состав и критические точки которых приведены в табл. 1.

Особенностью изотермической заковки, примененной в работе, являлось то, что она проводилась из МКИТ с охлаждением до температуры изотермы в воде, а не в

расплаве солей, как это обычно принято. Выдержка в бейнитном интервале осуществлялась в печи [11, 12]. В ряде случаев после нагрева в МКИТ проводилась кратковременная аустенитизация с нагревом выше A_{c3} [13]. Полученные у исследованных сталей после изотермической заковки из МКИТ механические свойства сопоставлялись с таковыми, после изотермической заковки из аустенитной области и улучшения, которому они обычно подвергаются. Схемы изотермической заковки, которым подвергались и исследованные стали, приведены на рис. 1.

В работе применялись металлографический, дюрOMETРИЧЕСКИЙ методы исследования и рентгеновский фазовый анализ. Механические свойства на растяжение определялись по ГОСТ 1497-84, на ударную вязкость – по ГОСТ 9454-78.

Испытания на абразивную износостойкость проводились на установке типа Бринелля- Хаурта. В качестве абразива использовался песок с размером частиц 0,3–0,5 мм. Эталонном служили образцы соответствующих сталей после улучшения по типовому режиму.

Анализ полученных результатов

Механические свойства исследованных сталей после изотермической заковки из МКИТ в сопоставлении с полученными после аналогичной термообработки из аустенитной области и улучшения по типовому режиму приведены в табл. 2.

Из нее следует, что изотермическая заковка из МКИТ по рациональному для каждой стали режиму, позволяет получить более высокий уровень прочностных свойств, пластичности и ударной вязкости, чем после улучшения. При этом прочностные свойства несколько ниже, а пластичность и ударная вязкость выше, чем после аналогичной изотермической заковки из аустенитной области.

Полученные результаты обусловлены следующим. Количественное соотношение структурных составляющих в исследованных сталях после изотермической заковки из МКИТ находится в следующих пределах: 18–25 % феррита, 10–15 % остаточного аустенита, остальное – нижний бейнит. В структуре может присутствовать небольшое количество карбидов, не растворившихся при нагреве в МКИТ.

Таблица 1 – Химический состав и температура критических точек сталей 30ХГСА, 38ХС, 40Г, 40Х, 40ХН2МА

Марка стали	С	Si	Mn	Содержание легирующих элементов, %						A_{c1}	A_{c3}
				Mo	Cu	Cr	Ni	P	S		
				не более							
30ХГСА	0,31	1,1	0,9	–	0,3	0,9	0,3	0,025	0,025	760	830
38ХС	0,39	1,3	0,4	–	0,3	1,4	0,3	0,035	0,035	740	810
40Г	0,40	0,20	0,8	–	0,30	0,03	0,3	0,035	0,035	723	785
40Х	0,41	0,27	0,73	–	0,05	0,89	0,04	0,011	0,032	743	815
40ХН2МА	0,40	0,2	0,7	0,2	0,3	0,8	1,4	0,025	0,025	730	820

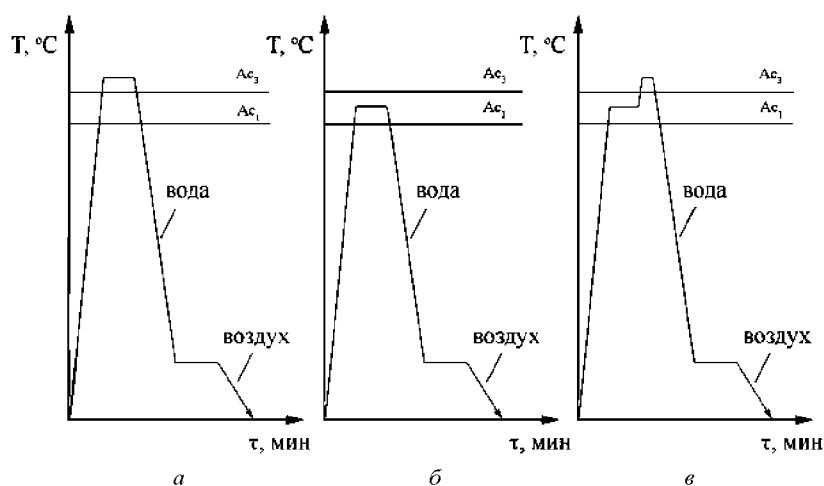


Рис. 1. Схемы изотермической закалки, применявшиеся при исследованиях сталей:

а – выдержка в аустенитной области; *б* – выдержка в МКИТ;
в – выдержка в МКИТ и кратковременный нагрев в аустенитную область

Таблица 2 – Механические свойства исследованных сталей после изотермической закалки из МКИТ, после аналогичной термообработки из аустенитной области и улучшения по типовому режиму

Сталь	Режим термообработки	Механические свойства				
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
30ХГСА	Н. 880°C, 20', о.м., о. 540°C 1 ч., о.вз.	847	1050	10	46	0,5
	Н. 880°C, 20', о.в. до 300°C, и.в. 60', о.вз.	1015	1220	11	47	0,8
	Н. 790°C, 60', о.в. до 300°C, и.в. 60', о.вз.	806	867	25	62	1,4
38ХС	Н. 900°C, 10', о.м., о. 630°C 1 ч., о.вз.	839	1070	12	45	0,7
	Н. 900°C, 10', о.в. до 350°C, и.в. 30', о.вз.	1110	1120	10	42	0,7
	Н. 780°C, 60', о.в. до 350°C, и.в. 30', о.вз.	900	1070	21	60	1,3
40Г	Н. 820°C, 20', о.в., о. 550°C 1 ч., о.в.	810	1122	12	47	0,6
	Н. 820°C, 20', о.в. до 400°C, и.в. 60', о.вз.	1046	1092	10	40	0,5
	Н. 760°C, 60', о.в. до 400°C, и.в. 60', о.вз.	810	949	24	62	1,6
40Х	Н. 850°C, 20', о.м., о. 550°C 1 ч., о.вз.	807	1110	10	46	0,6
	Н. 850°C, 20', о.в. до 400°C, и.в. 60', о.вз.	890	1090	12	48	0,7
	Н. 780°C, 60', о.в. до 400°C, и.в. 60', о.вз.	934	1170	15	58	1,1
40ХН2МА	Н. 830°C, 20', о.м., о. 550°C 1 ч., о.вз.	880	1180	12	49	0,8
	Н. 830°C, 20', о.в. до 350°C, и.в. 60', о.вз.	950	1120	11	48	0,8
	Н. 770°C, 60', о.в. до 350°C, и.в. 60', о.вз.	901	1011	19	65	1,4

Примечание: н. - нагрев, о.в. - охлаждение в воде, о.м. - охлаждение в масле, и.в. - изотермическая выдержка, о. - отпуск, о.вз. - охлаждение на воздухе.

Большое влияние на механические свойства оказывает остаточный аустенит, хотя его количество сравнительно невелико. Важно подчеркнуть, что он метастабилен и при испытаниях механических свойств превращается в мартенсит деформации. На рис. 2 для стали 38ХС приведена дифрактограмма, из которой следует, что в образце до испытаний на растяжение в структуре было 12 % остаточного аустенита (рис. 2, а), а в зоне разрушения он не обнаружен (рис. 2, б), поскольку превратился в мартенсит деформации.

В условиях нагружения, когда дислокационный механизм пластической деформации исчерпан, она протекает за счет развития ДДМП [14]. При этом происходит релаксация микронапряжений [1]. Важную роль играет создание в бейните развитой субструктуры [7] и снижение его пересыщения углеродом, что достигается выбором температуры и выдержки в бейнитном интервале. Для исследованных сталей эти температуры составили 350–400 °С, а выдержки- 30–60 мин. Свой вклад в повышение пластичности исследованных сталей вносит и феррит, присутствующий в структуре в виде небольших сравнительно равномерно распределенных участков. Типичная микроструктура после изотермической закалки из МКИТ исследованных сталей приведена на рис. 3 для стали 30ХГСА. Следует подчеркнуть, что феррит должен иметь повышенную пластичность, т. к. он очищен от углерода в результате обогащения им аустенита в процессе выдержки в МКИТ и в бейнитном интервале температур, а также в процессе ускоренного охлаждения до температуры изотермы [3].

Количественное соотношение структурных составляющих, а следовательно, уровень механических свойств можно изменять в нужном направлении, варьируя температурно-временные режимы в МКИТ и бейнитном интервале температур. Нагрев в МКИТ желательнее проводить при температурах $A_{c1} + (70-90 \text{ } ^\circ\text{C})$. Более высокий нагрев в МКИТ увеличивает количество аустенита, а степень его обогащения углеродом снижает. В результате после изотермической закалки уменьшается в структуре количество феррита и метастабильного аустенита, придающих сталям повышенную пластичность.

Для исследованных сталей изотермическую выдер-

жку целесообразно проводить при 300–400 °С. Более низкие температуры выдержки создают в бейните более высокую степень его пересыщения углеродом, которая повышает прочностные и снижает пластические свойства исследованных сталей. При более высоких температурах изотермы образуется верхний бейнит, охрупчивающий стали.

При выдержке 30–60 мин достигаются оптимальное количество аустенита в структуре и степень его стабильности, а в бейните формируется наиболее благоприятная дислокационная структура, что обеспечивает хорошее сочетание прочностных и пластических свойств.

Изотермическая закалка, включающая кратковременную аустенитизацию после выдержки в МКИТ, обеспечивает повышенный уровень механических свойств. После термообработки стали 30ХГСА по следующему режиму: нагрев на 790 °С, выдержка 60 мин., нагрев на 880 °С, выдержка 5 мин., охлаждение в воде до 300 °С, изотермическая выдержка 60 мин., охлаждение на воздухе получены следующие механические свойства: $\sigma_{0,2} = 1319 \text{ МПа}$, $\sigma_r = 1400 \text{ МПа}$, $\delta = 18 \%$, $\psi = 56 \%$.

Кратковременный нагрев в аустенитную область после выдержки в МКИТ проводился для исключения феррита из структуры, сохранения обогащенных углеродом участков аустенита и дополнительного измельчения зерна. Полученные данные свидетельствуют о том, что кратковременная аустенитизация после с выдержки в МКИТ при последующей изотермической закалке повышает прочностные свойства и сохраняет высокую пластичность.

На рис. 4 приведены гистограммы абразивной износостойкости в сравнении с улучшением и твердости сталей 30ХГСА, 38ХС и 40Х после изотермической закалки из МКИТ. Из них следует, что изотермическая закалка из МКИТ существенно повышает сопротивление абразивному изнашиванию по сравнению с улучшением. Это также можно объяснить получением в структуре наряду с бейнитом, карбидами метастабильного аустенита, претерпевающего ДДМП, на которое расходуется значительная часть энергии внешнего воздействия и, соответственно снижается доля энергии, идущая на разрушение материала [1, 2].

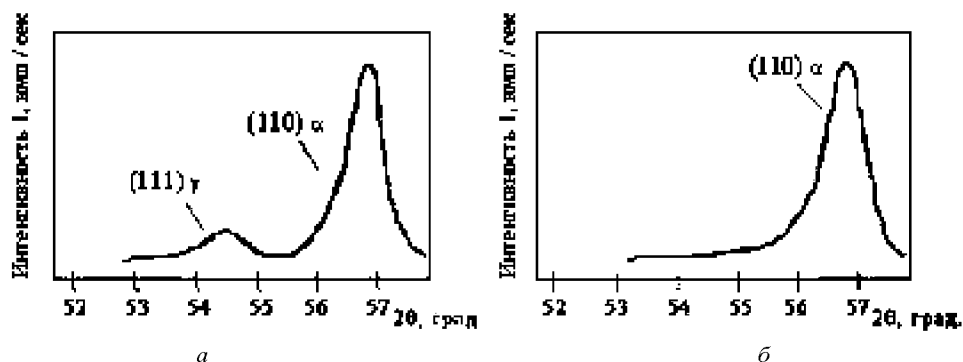


Рис. 2. Дифрактограмма стали 38ХС:

а – сталь 38ХС до испытаний на растяжение; б – сталь 38ХС после разрушения

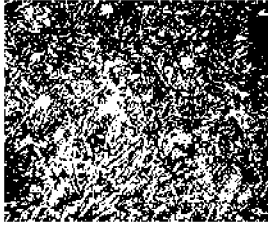


Рис. 3. Микроструктура стали 30XГСА после изотермической закалки из МКИТ, $\times 500 \times 1,4$

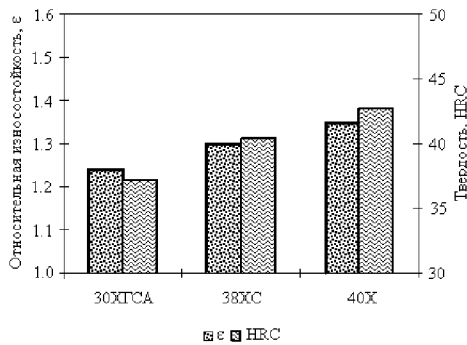


Рис. 4. Абразивная износостойкость и твердость сталей 30XГСА, 38ХС и 40Х после изотермической закалки из МКИТ по рациональному режиму в сравнении с этими же свойствами после улучшения

В заключение следует подчеркнуть преимущества изотермической закалки из МКИТ в сравнении с улучшением по типовому режиму. Они таковы: повышение уровня механических свойств и абразивной износостойкости, исключение при термообработке среднеуглеродистых низколегированных сталей масла, а также высокого отпуска после закалки. Это обеспечивает ресурс- и энергосбережение. Не исключено, что для сталей, имеющих высокую устойчивость переохлажденного аустенита к распаду с образованием ферритно-карбидной смеси, охлаждение из МКИТ до температуры изотермы можно проводить на воздухе.

Выводы

1. Изотермическая закалка исследованных сталей из МКИТ по схеме «вода-печь» является альтернативой улучшению. Она обеспечивает ресурс- и энергосбережение.

2. Повышенный по сравнению с улучшением уровень механических свойств и абразивной износостойкости после изотермической закалки из МКИТ обусловлен получением мелкозернистой дисперсной многофазной структуры, включающей нижний бейнит, метастабильный аустенит, феррит, очищенный от углерода, в ряде случаев карбиды, не растворившиеся при неполной аустенитизации.

3. Для каждой стали режим изотермической закалки из МКИТ должен быть подобран с учетом получения заданного уровня механических свойств и износостойкости.

4. Проведение кратковременной аустенитизации после выдержки в МКИТ позволяет повысить прочностные свойства и сохранить высокую пластичность.

Список литературы

1. Малинов Л.С. Разработка экономнолегированных высокопрочных сталей и способов упрочнения с использованием принципа регулирования мартенситных превращений: дис. ... доктора техн. наук : 05.16.01 / Екатеринбург, 1992. – 381 с.
2. Влияние изотермической закалки на количество, стабильность остаточного аустенита и свойства конструкционных сталей / Л. С. Малинов, А. П. Чейлях, Е. Я. Харланова и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1989. – № 12. – С. 12–15.
3. Петруненко А. А Структура низколегированных сталей с ПНП-эффектом после термической обработки и деформации / А. А. Петруненко, В. В. Яровой, Б. А. Букреев // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1991. – № 7. – С. 77–80.
4. Vasilakos A.N. Low-alloy TRIP-steels: a correlation mechanical properties and the retained austenite stability/ A.N. Vasilakos, J. Ohlert, G. Katerina// *Steels Res.* – 2002.73. – N 6–7. – P. 249–252.
5. Streicher A.M. Forming response of retained austenite in C- Si-Mn high strength TRIP sheet steels / A.M. Streicher, J.G. Speer, D.K. Mاتيok// *Steels Res.* – 2002.73. – N 6–7. – P. 287–293.
6. Speers J. G. Recent developments in low- carbon sheet steels / J.G. Speers, D.K. Metlock // *JOM. J. Miner., Metals and Mater. Soc.* – 2002.54. – N 7. – P. 19–24.
7. Малинов Л. С. Повышение свойств сталей и высокопрочного чугуна получением в них многофазных структур, включающих бейнит и метастабильный аустенит / Л. С. Малинов // *Металл и литье Украины*. – 2004. – № 7. – С. 8–10.
8. Малинов Л. С. Повышение свойств низколегированных сталей путем термообработки после нагрева в межкритическом интервале температур / Л. С. Малинов, Д. В. Малинова // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 1. – С. 63–66.
9. Малинов Л. С. Способы термообработки сталей с нагревом в межкритический интервал температур (МКИТ) для повышения их механических свойств / Л. С. Малинов, О. А. Васенко, Д. В. Малинова // *Металл и литье Украины*. – 2012. – № 1. – С. 18–22.
10. Малинов Л. С. Влияние термообработки с нагревом в межкритический интервал температур на свойства сталей 60С2А и 60С2ХФА / Л. С. Малинов, И. Е. Мальшева, Д. В. Малинова // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – № 1. – С. 55–58.
11. Декл. Пат. на корисну модель UA 6414 Україна, С21Д1 / 00. Спосіб термообробки / Л. С. Малинов ; опубл. 16.05.2005, Бюл. № 5.
12. Пат. UA 79717 Україна, С21Д1/ 06, С21Д1/ 18. Спосіб термообробки / Л. С. Малинов. – Опубл. 10.07.2007. Бюл. №10.
13. Пат. UA 95409 Україна, С21Д1/ 06, С21Д1/ 18, С21Д1 / 78. Спосіб термообробки / Л. С. Малинов, Д. В. Малинова ; опубл. 25.07.2011, Бюл. №14.

Одержано 21.11.2013

Малинов Л.С., Бурова Д.В. Підвищення властивостей середньовуглецевих низьколегованих сталей ізотермічного загартування з міжкритичного інтервалу температур (МКІТ), що створює багатофазну структуру

Показано, що ізотермічне гартування із МКІТ за схемою «вода-піч» дозволяє в середньовуглецевих низьколегованих сталях отримати багатофазну структуру (бейніт, ферит, метастабільний аустеніт, у низькі випадків карбіди), яка забезпечує порівняно з поліпшенням рівень механічних властивостей і абразивну зносостійкість.

Ключові слова: міжкритичний інтервал температур, ізотермічне гартування, багатофазна структура, бейніт, метастабільний аустеніт.

Malinov L., Burova D. Increase of properties of medium-carbon low-alloy steels by isothermal tempering from intercritical temperature interval (ITI), which creating multi-phase structure

It was shown that isothermal quenching from intercritical temperature interval (ITI) of the scheme «water-furnace» allows in medium-carbon low-alloyed steels creating multi-phase structure (bainitic, ferrite, metastable austenite in some cases carbides), providing high (compared with improvement) level mechanical properties and abrasion resistance.

Key words: intercritical temperature interval (ITI), isothermal tempering, multi-phase structure bainite, metastable austenite.
