

Lunev V., Brykov M., Tkachenko S. Reserves for increasing plasticity in heat-treated high-carbon steels

Standard test specimens of U12 steel (1,2 %C) were heat treated as follows: controlled exposure at 860 ± 10 °C and cooling in oil. It was discovered that strength 1250 MPa and impact toughness $KC 250-300$ J/cm² are achieved if optimal time of exposure is provided. SEM (multiplication up to 100000) shows that structure of fine lamellar pearlite with pearlite colonies of 3–7 μ m appears in 1 mm surface layer.

Key words: high-carbon steel, heat treatment, strength, plasticity, fine lamellar pearlite.

УДК 669.15.74.194-15.669.17

Д-р техн. наук Л. С. Малинов, Д. В. Бутова

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

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 (зернограницный, 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 закалки 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 % C; 1,35 % Mn; 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 закалке 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 закалки, 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 закалки из МКИТ механические свойства сопоставлялись с таковыми, после изотермической закалки из аустенитной области и улучшения, которому они обычно подвергаются. Схемы изотермической закалки, 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 закалки 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 закалка 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 закалки из аустенитной области.

Полученные результаты обусловлены следующим. Количественное соотношение структурных составляющих в исследованных сталях после изотермической закалки 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	C	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

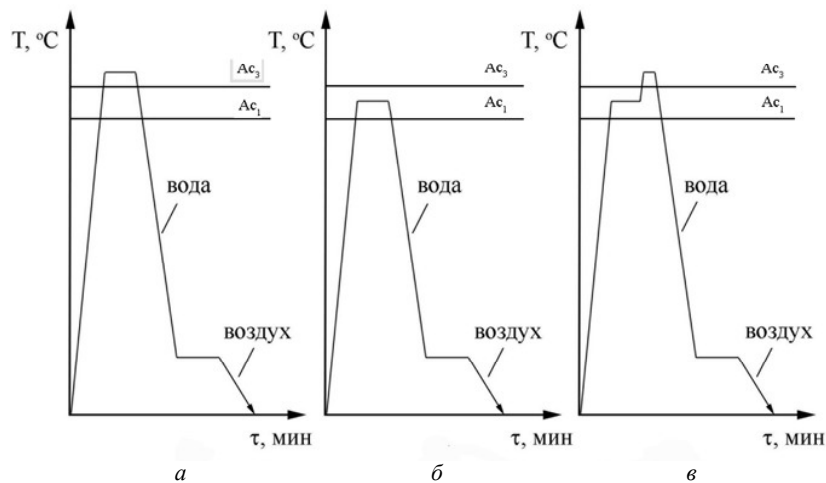


Рис. 1. Схемы изотермической закалки, применявшиеся при исследованиях сталей:

a – 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 $A_{c1} + (70–90\text{ °C})$. 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 аустенизацию 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: $\sigma_{0,2} = 1319\text{ МПа}$, $\sigma_s = 1400\text{ МПа}$, $\delta = 18\%$, $\psi = 56\%$.

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 аустенизация 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].

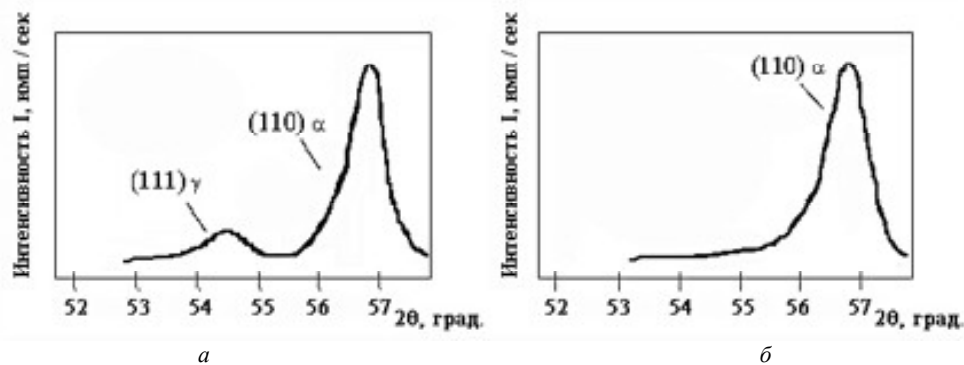


Рис. 2. Дифрактограмма стали 38ХС:

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



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

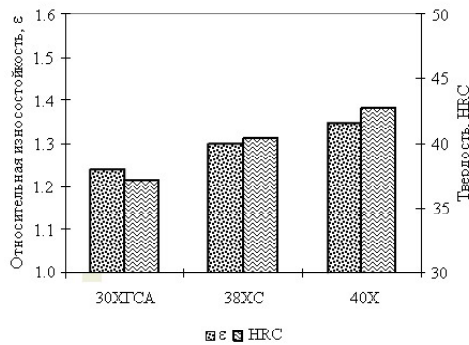


Рис. 4. Абразивная износостойкость и твердость сталей 30XГСА, 38ХС и 40Х после изотермической заковки из МКИТ по рациональному режиму в сравнении с этими же свойствами после улучшения

В заключение следует подчеркнуть преимущества изотермической заковки 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 заковки. 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 заковка 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 заковки 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 заковки 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 заковки 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 60C2A и 60C2XФА / 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, C21D1 / 00. Спосіб термообробки / Л. С. Малинов ; опубл. 16.05.2005, Бюл. № 5.
12. Пат. UA 79717 Україна, C21D1/ 06, C21D1/ 18. Спосіб термообробки / Л. С. Малинов. – Опубл. 10.07.2007. Бюл. №10.
13. Пат. UA 95409 Україна, C21D1/ 06, C21D1/ 18, C21D1 / 78. Спосіб термообробки / Л. С. Малинов, Д. В. Малинова ; опубл. 25.07.2011, Бюл. №14.

Одержано 21.11.2013

Малинов Л.С., Бутова 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 (beynytic, 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 beynite, metastable austenite.

УДК 621.793.6:669.35

Канд. техн. наук С. Н. Ткаченко

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ПОВЕРХНОСТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Рассмотрено влияние поверхностного легирования на коррозионную стойкость и износостойкость. Установлена взаимосвязь между структурой, фазовым составом поверхностного слоя и эксплуатационными показателями деталей.

Ключевые слова: графит, поверхностное легирование, упрочнение, жаростойкость, адгезионная прочность, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, диффузия, микроструктура, поверхностный слой, коррозионная стойкость, износостойкость.

Введение

Поверхностное легирование материалов широко используется в технике для повышения эксплуатационных характеристик деталей машин. Поверхностно легированные материалы [1] имеют более высокие эксплуатационные характеристики, чем неупрочненные. В условиях современного развития экономики Украины особо остро стоит проблема создания новых конструкционных материалов, способных работать в условиях высоких температур, химического сопротивления и больших динамических нагрузок [1]. Большинство деталей машин подвержено изгибу и кручению, при которых напряжения растут в направлении к поверхности. Разрушение деталей в процессе эксплуатации, как

правило, начинается с поверхности, где расположены основные источники концентрации напряжений. Поэтому особенно важно повышать прочность именно поверхностных и приповерхностных слоёв [2]. Долговечность деталей и узлов, работающих в агрессивных средах при высоких температурах, во многом зависит от состава, структуры и свойств поверхностного слоя [3–5]. Разработка эффективных процессов создания слоев с повышенными эксплуатационными характеристиками диффузионных процессов основана на глубоком изучении диффузионных процессов, на развитии теории переноса элементов при насыщении ими поверхностных слоев металлов, сплавов и на их основе интерметаллидов, глубоком изучении механизмов фор-