

С.С. Югай

Пермский государственный технический университет

ПОВЫШЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ АЗОТИРОВАННЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

Низкоуглеродистые мартенситные стали являются перспективным материалом для изготовления деталей машиностроения, упрочняемых химико-термической обработкой. Показано, что после азотирования и последующей закалки из межкритического интервала температур низкоуглеродистой мартенситной стали 12Х2Г2НМФТ могут быть получены высокие механические свойства сердцевины и износостойкость поверхностного слоя.

Технологичные низкоуглеродистые мартенситные стали (НМС) – новый класс сталей, предназначенных для изготовления деталей машин и сварных конструкций. Рациональное сочетание легирующих элементов обеспечивает высокую устойчивость переохлажденного аустенита НМС [1] и получение структуры пакетного мартенсита в больших сечениях при охлаждении на воздухе. Временное сопротивление разрыву современных НМС (σ_B) составляет до 1500 МПа, ударная вязкость (KCU) – не менее 0,8 МДж/м². Для улучшения износостойкости и коррозионной стойкости изделий из низкоуглеродистых мартенситных сталей применяют химико-термическую обработку (ХТО). Один из наиболее перспективных видов ХТО НМС – азотирование [2]. Однако в процессе азотирования понижаются механические свойства сердцевины [3]. Их повышение возможно за счет термической обработки после азотирования.

Азотированная низкоуглеродистая мартенситная сталь после термической обработки способна обеспечить сочетание высоких прочности, пластичности, вязкости сердцевины и износостойкости поверхности.

Цель данной работы – исследование структуры и свойств поверхностного слоя НМС 12Х2Г2НМФТ после азотирования и последующей термической обработки.

Методики исследований и экспериментов. Для приготовления опытных образцов использовали НМС 12Х2Г2НМФТ, и для сравнения – сталь 38Х2МЮА (табл. 1).

Химический состав сталей

Марка стали	Содержание элементов, мас. %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al
12Х2Г2НМФТ	0,13	2,24	0,40	2,39	1,38	0,45	0,10	0,03	–
38Х2МЮА	0,40	0,55	0,25	1,60	0,20	0,22	–	–	1,10

Исходной заготовкой служил горячекатаный лист толщиной 6 мм стали 12Х2Г2НМФТ и пруток сечением 14×14 мм стали 38Х2МЮА. Для проведения экспериментов были изготовлены образцы размером 55×10×5 мм, которые шлифовали для получения необходимой шероховатости поверхности перед азотированием. Предварительная термическая обработка НМС 12Х2Г2НМФТ – закалка от 930 °С, охлаждение на воздухе для получения структуры пакетного мартенсита, стали 38Х2МЮА – закалка от 940 °С, охлаждение в масле и отпуск 640 °С, 2 ч (структура – сорбит). Азотирование проводили в печи в среде аммиака, разбавленного азотом (10–30% NH₃) при температуре 560 °С в течение 40 ч, охлаждение с печью.

После азотирования сталь 12Х2Г2НМФТ подвергали нагреву до 600–750 °С с выдержкой 1 ч и охлаждением на воздухе.

После химико-термической и термической обработки проводили металлографические, дюрометрические исследования. Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя определяли на приборе ПМТ–3 при нагрузке 1 Н (ГОСТ 9450–76). За эффективную толщину азотированного слоя $h_{эфф}$ принимали расстояние от поверхности до зоны с твердостью 450 НV. Точность определения эффективной толщины слоя составляла 50 мкм.

Фазовый состав исследуемых сталей определяли рентгеноструктурным анализом (излучение меди).

Испытания на одноосное растяжение и расчет характеристик прочности и пластичности проводили в соответствии с ГОСТ 1497–84. Испытания осуществляли на разрывной машине Р–5 с использованием пятикратных цилиндрических образцов диаметром 5 мм и длиной 25 мм. Ударную вязкость определяли согласно ГОСТ 9454–78 на образцах с U-образным надрезом (типоразмер 3).

Износостойкость сталей определяли на машине МИ1–М в условиях сухого трения. Износ оценивали согласно ГОСТ 27860–88 по методу вырезанных лунок. Контртело изготавливали из стали 95Х18 с твердостью 58 HRC. Испытания проводили при комнатной температуре, скорость скольжения – $V = 1$ м/с, путь трения $S = 300$ м, осевые нагрузки $P_{ос} = 30–90$ Н. Величину

износа вычисляли по формуле: $I = 0,125(l^2 - l_1^2)/r$, где I – износ (увеличение ширины лунки), мм; l – ширина лунки после испытания; l_1 – ширина лунки до испытаний; $r = 20$ мм – радиус контртела.

Результаты исследований и их обсуждение. Азотирование НМС обеспечивает получение более глубоких диффузионных слоев по сравнению со среднеуглеродистыми улучшаемыми сталями. Исходная структура НМС перед азотированием – пакетный мартенсит, что обеспечивает при насыщении получение однородных азотированных слоев без хрупкой нитридной сетки по границам бывших аустенитных зерен [4]. После азотирования прочность стали 12Х2Г2НМФТ понижается ($\sigma_{0,2}$ не более 1000 МПа), уменьшение ударной вязкости НМС менее значительное, чем стали 38Х2МЮА (табл. 2, рис. 1). Реечное строение мартенситной α -фазы сохраняется в процессе длительной выдержки при температурах азотирования и последующем нагреве в межфазную область (МКИ) [5].

Таблица 2

Свойства сердцевины и твердость азотированного слоя сталей 38Х2МЮА и 12Х2Г2НМФТ

Марка стали	Режим обработки	Свойства сердцевины *			Твердость и эффективная толщина слоя	
		$\sigma_{0,2}$, МПа	KCU_2 , МДж/м ²	HRC	HRA	$h_{эфф}$, мм
12Х2Г2НМФТ	Азотирование при 560 °С, 40 ч	$\frac{1190}{960}$	$\frac{0,8}{0,7}$	$\frac{40}{28}$	82	0,53
	Азотирование при 560 °С, 40 ч + закалка от 750 °С, 1 ч, воздух	$\frac{960^{**}}{1100}$	$\frac{0,7^{**}}{0,9}$	$\frac{28^{**}}{38}$	76	0,68
38Х2МЮА	Азотирование при 560 °С, 40 ч	$\frac{840}{830}$	$\frac{1,0}{0,7}$	$\frac{27}{27}$	81	0,44

* В числителе приведены свойства до азотирования, в знаменателе – после азотирования.

** В числителе приведены свойства после азотирования, в знаменателе – после закалки из МКИ.

Увеличение толщины слоя и повышение механических свойств сердцевины возможно за счет термической обработки, которая включает закалку из аустенитной области и отпуск [6, 7]. Такая упрочняющая термообработка средне- и высокоуглеродистых сталей обладает рядом особенностей: высокая склонность к деформации и короблению, необходимость ускоренного охлаждения для формирования мартенситной структуры и исключения выделения

γ' -фазы, обязательное применение защитных атмосфер для предотвращения деазотирования.

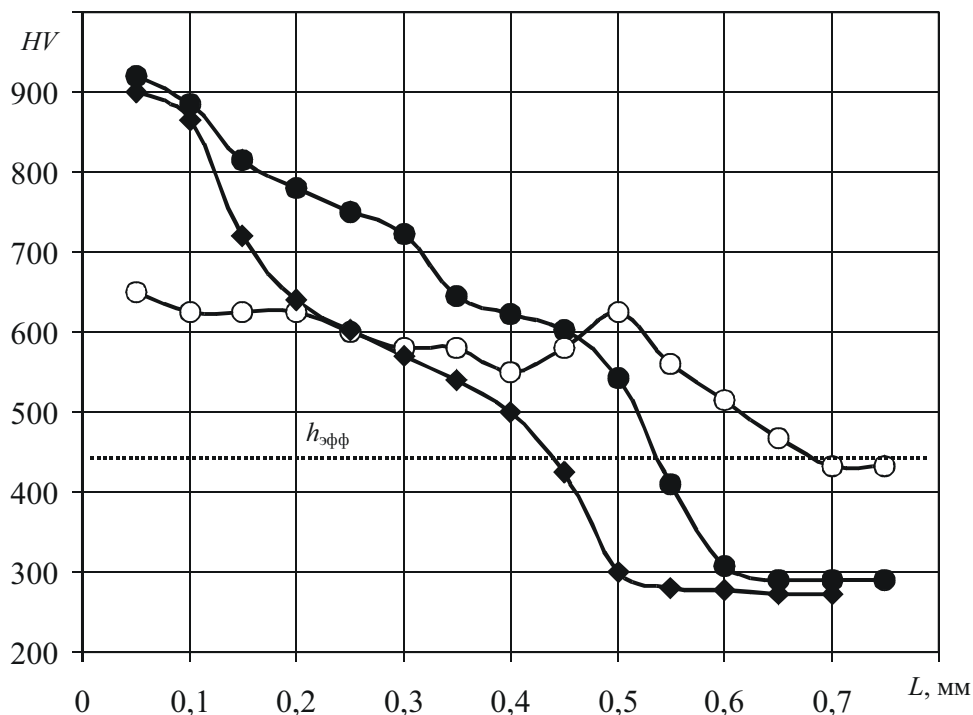


Рис. 1. Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя (h – расстояние от поверхности): • – сталь 12Х2Г2НМФТ, азотирование при 560 °С, 40 ч; о – сталь 12Х2Г2НМФТ, азотирование при 560 °С, 40 ч + закалка от 750 °С, 1 ч, воздух; ♦ – сталь 38Х2МЮА, азотирование при 560 °С, 40 ч

Закалка из МКИ [5] эффективно упрочняет НМС. Высокие прочность, пластичность и ударная вязкость сердцевины обеспечивают наследование структуры пакетного мартенсита. При закалке с температуры выше A_{c1} на 10–50 °С ($t_{зак} = 730–780$ °С) формируется мелкодисперсная смесь низкоуглеродистого «свежего» мартенсита и мартенситной α -фазы, не претерпевшей фазовых превращений при нагреве в МКИ. Полученная структура обладает высокой плотностью дислокаций (по данным рентгеноструктурного анализа $\rho = (2–4) \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$) и низким уровнем остаточных напряжений. Для получения градиентного слоя применяли закалку из МКИ, которая обеспечила высокие механические свойства поверхности и сердцевины (см. табл. 2). Среда охлаждения (воздух, масло, вода) не оказывала существенного влияния на характеристики механических свойств стали: $\sigma_{0,2} = 1050–1100$ МПа, $KCU = 0,8–0,9$ МДж/м². Поскольку НМС закаляются при охлаждении на воздухе,

то представляет практический интерес исследование фазового состава слоя в тех же условиях охлаждения (табл. 3).

Таблица 3

**Фазовый состав и твердость азотированного слоя на стали
12Х2Г2НМФТ после термообработки**

Термическая обработка	$h_{эфф}$, мм	Фазовый состав	Твердость, HV	$A_{ост}$, %
–	0,53	$\alpha+\varepsilon+\gamma'+(H+K)^*$	920	–
600 °С, 1 ч, воздух	0,53	$\alpha+\varepsilon+\gamma'+(H+K)$	920	–
650 °С, 1 ч, воздух	0,57	$\alpha^N+(H+K)+\gamma+\alpha'$	780	15
700 °С, 1 ч, воздух	0,6	$\alpha^N+(H+K)+\gamma+\alpha'$	700	25
750 °С, 1 ч, воздух	0,68	$\alpha^N+(H+K)+\gamma+\alpha'$	650	50

Примечание. Азотирование при 560 °С, 40 ч. *(H+K) – нитриды и карбонитриды.

После закалки азотированной стали 12Х2Г2НМФТ от 750 °С, 30 мин снижается наибольшая твердость поверхности – с 920 до 650 HV (с 82 до 76 HRA) и увеличивается эффективная толщина азотированного слоя – на 0,15 мм. Кроме того, заметна разница в характере распределения микротвердости: твердость мало изменяется при удалении от поверхности (до 0,4 мм), в подповерхностной зоне (0,4–0,6 мм) твердость увеличивается, а затем снижается. Это обусловлено изменением концентрации азота по сечению слоя [8].

Влияние нагрева в интервале 600–750 °С на структуру, фазовый состав и свойства азотированного слоя показано на рис. 2 и в табл. 3. Нагрев до 600 °С не приводит к изменению микротвердости, что свидетельствует о высокой теплостойкости азотированного слоя на стали 12Х2Г2НМФТ.

Значительные изменения в слое происходят при нагреве до 650 °С и выше. С повышением температуры нагрева наблюдается тенденция к снижению наибольшей твердости слоя. Так, нагрев до 650 °С приводит к снижению твердости от 920 до 780 HV , нагрев до 700 °С – от 920 до 700 HV . Закалка из МКИ (750 °С) снижает твердость до 650 HV (76 HRA).

Разупрочнение азотированного слоя при аустенитизации может быть вызвано коагуляцией нитридов, рекристаллизацией азотистой α^N -фазы, фазовой перекристаллизацией и др., что приведет к изменению фазового состава.

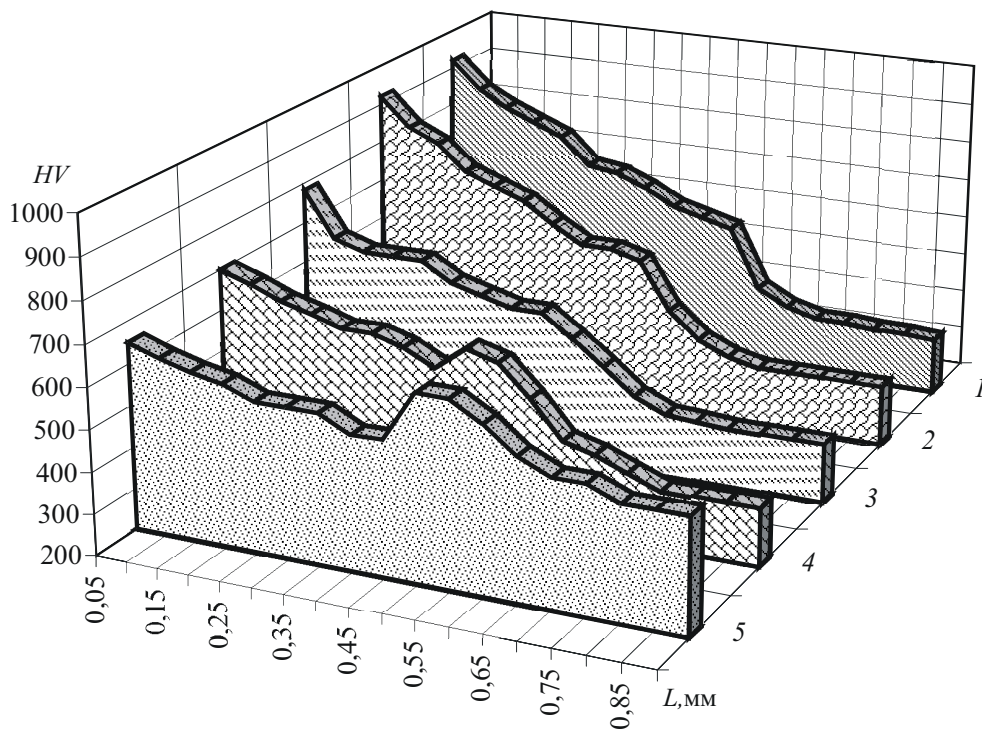


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине азотированного слоя стали 12Х2Г2НМФТ после термической обработки по различным режимам: 1 – азотирование при 560 °С, 40 ч; 2, 3, 4, 5 – азотирование при 560 °С, 40 ч + нагрев до 600, 650, 700 и 750 °С (с выдержкой 1 ч) соответственно

Нагрев до 600 °С не приводит к изменению структуры и фазового состава, что подтверждается рентгеноструктурными исследованиями (табл. 3). Нагрев до 650 °С и охлаждение на воздухе уже обеспечивает закалку азотированного слоя. Доказательством частичной перекристаллизации служит наличие остаточного аустенита. При охлаждении образовавшийся аустенит, очевидно, претерпевает бездиффузионное $\gamma \rightarrow \alpha^N$ -превращение. Слой на стали 12Х2Г2НМФТ после закалки от 650 °С состоит из избыточной α -фазы, нитридов, не растворившихся при нагреве под закалку, «свежего» азотистого мартенсита и остаточного аустенита в количестве 15%. Повышение температуры до 700 и 750 °С обеспечивает растворение в аустените большего количества нитридов, что способствует обогащению аустенита азотом и легирующими элементами, а также увеличивает его устойчивость. При этом увеличивается количество остаточного аустенита (25 и 50% соответственно) и толщина диффузионного слоя. Принципиальная особенность азотированного слоя на стали 12Х2Г2НМФТ – отсутствие выделений γ' -фазы после закалки на воздухе со скоростью охлаждения 50–100 °С/мин (см. табл. 3). Последую-

щий отпуск при 400–450 °С, 1–2 ч, по данным рентгеновских исследований, также не приводил к выделению γ' -фазы.

Обычно контроль качества азотированных деталей проводят по твердости. Однако однозначная связь между твердостью и износостойкостью азотированных сталей отсутствует [7].

Результаты испытаний на износостойкость в условиях скольжения без смазки представлены на рис. 3. Закалка азотированной стали 12Х2Г2НМФТ из межкритического температурного интервала (для азотированного слоя – полная закалка), несмотря на снижение твердости, приводит к повышению износостойкости. Сопротивление изнашиванию закаленной азотированной стали 12Х2Г2НМФТ выше, чем используемой для сравнения стали 38Х2МЮА.

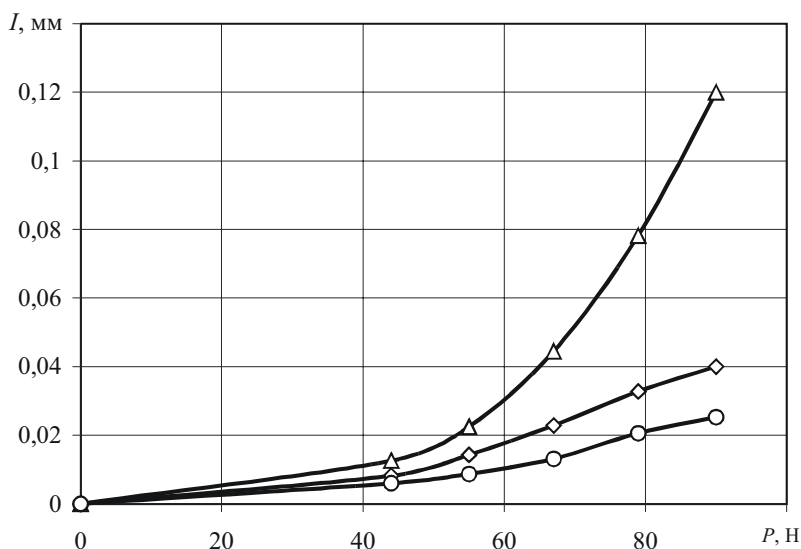


Рис. 3. Износ азотированных сталей 38Х2МЮА и 12Х2Г2НМФТ при сухом трении: Δ – сталь 38Х2МЮА, азотирование при 560 °С; 40 ч; ◊ – сталь 12Х2Г2НМФТ, азотирование при 560 °С; 40 ч; ○ – сталь 12Х2Г2НМФТ, азотирование при 560 °С; 40 ч + закалка от 750 °С, 1 ч

Учитывая, что после закалки в азотированном слое содержится большое количество γ -фазы, можно предположить, что основной причиной высокой износостойкости является деформационное фазовое превращение аустенита в мартенсит. Рентгеноструктурные исследования показали, что в процессе трения в результате деформационного $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращения количество остаточного аустенита на контактной поверхности уменьшается и настолько же возрастает доля α -фазы. Например, при нагрузке 65 Н образуется 10–15% мартенсита деформации (рис. 4).

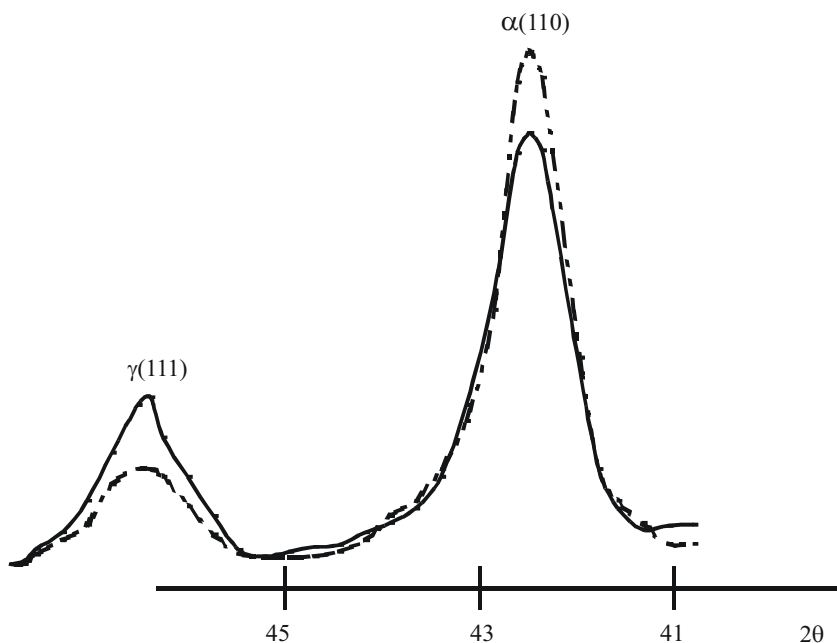


Рис. 4. Дифрактограммы поверхности азотированного слоя стали 12Х2Г2НМФТ
 — до трения; - - - - - после трения

Таблица 4

Механические свойства сталей

Марка стали	Режим термической обработки	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$KCU, \text{МДж/м}^2$	δ	ψ	$I, \text{мм}$
		МПа			%		
38Х2МЮА	Азотирование при 560 °С, 40 ч	950	830	0,70	11	49	0,12
12Х2Г2НМФТ	Закалка от 930 °С, 1 ч, воздух	1450	1190	0,80	13	51	—
	Азотирование при 560 °С, 40 ч	1090	960	0,70	16	54	0,041
	Азотирование при 560 °С, 40 ч + закалка от 750 °С, 1 ч, воздух	1380	1100	0,90	16	54	0,023

Примечание: величина износа I приведена при нагрузке 90 Н.

Таким образом, азотирование и последующая закалка из МКИ низкоуглеродистой мартенситной стали 12Х2Г2НМФТ позволяют получить высокие прочность, пластичность и ударную вязкость сердцевины, а также износостойкость поверхностного слоя (табл. 4), превышающую износостойкость азотированной стали 38Х2МЮА при трении без смазки.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Низкоуглеродистая мартенситная сталь 12Х2Г2НМФТ с азотированным слоем и структурой пакетного мартенсита в сердцевине после закалки из межкритического интервала температур имеет следующие свойства: $\sigma_{0,2} = 1100$ МПа, $KCU = 0,9$ МДж/м², $\psi = 54\%$, $\delta = 16\%$.

2. При нагреве азотированной стали 12Х2Г2НМФТ под закалку на поверхности формируется азотистый аустенит, обладающий высокой устойчивостью в области диффузионных превращений и позволяющий проводить закалку с охлаждением на воздухе. В процессе охлаждения на воздухе γ' -фаза не выделяется, фазовый состав поверхности – азотистые γ - и мартенситная α^N -фазы, нитриды и карбонитриды легирующих элементов. Закалка из МКИ после азотирования позволяет увеличить глубину азотированного слоя стали 12Х2Г2НМФТ с 0,53 до 0,68 мм в результате выравнивающей диффузии азота.

3. Высокая износостойкость диффузионного слоя на стали 12Х2Г2НМФТ обусловлена деформационным переходом азотистого аустенита в мартенсит деформации на поверхности трения.

Список литературы

1. Клейнер Л.М., Коган Л.И., Этин Р.И. Свойства низкоуглеродистого легированного мартенсита // ФММ. – 1972. – Т. 33. – № 4. – С. 824–830.

2. Повышение теплостойкости азотируемых низкоуглеродистых мартенситных сталей / О.В. Силина [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1998. – № 1. – С. 17–20.

3. Югай С.С. Влияние термической обработки после азотирования на свойства стали 12Х2Г2НМФТ // Тез. докл. I Уральской школы – семинара металлосведов – молодых ученых. – Екатеринбург, 1999. – С. 56–57.

4. Азотирование деталей, работающих на износ при высоких контактных нагрузках / Л.М. Клейнер [и др.] // Вестник машиностроения. – 1999. – № 5. – С. 32–34.

5. Формирование структуры и свойств низкоуглеродистой мартенситной стали 12Х2Г2НМФТ при закалке / С.С. Югай [и др.] // ФММ. – 2004. – Т. 97. – № 1. – С. 107–112.

6. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.

7. Герасимов С.А. Прогрессивные методы азотирования. – М.: Машиностроение, 1985. – 32 с.

8. Лахтин Ю.М. Высокотемпературное азотирование // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1991. – № 2. – С. 25–29.

Получено 1.03.2010