

ВЛИЯНИЕ ФРИКЦИОННОЙ И КОМБИНИРОВАННЫХ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ОБРАБОТОК НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАКАЛЕННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

© 2011 А.В. Макаров¹, Н.А. Поздеева¹, Р.А. Саврай¹, А.С. Юровских², И.Ю. Малыгина¹

¹Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 10.11.2011

Изучено влияние наноструктурирующей фрикционной обработки твердосплавным индентором и последующих термических воздействий на микротвердость, трибологические характеристики в условиях трения скольжения и абразивного изнашивания, а также механические свойства при растяжении закаленной среднеуглеродистой стали. Предложена комбинированная деформационно-термическая обработка, обеспечивающая конструкционной стали высокий комплекс трибологических и механических свойств.

Ключевые слова: конструкционная сталь, фрикционная обработка, нанокристаллическая структура, микротвердость, интенсивность изнашивания, механические свойства, микроиндентирование

Вследствие поверхностного разрушения при изнашивании выходит из строя 60-80 % изделий машиностроения [1]. Поэтому одним из приоритетных направлений обеспечения качества и надежности механизмов и машин является повышение износостойкости узлов трения, которое может быть достигнуто путем создания на их поверхности функциональных нанокристаллических слоев. Эффективным способом наноструктурирования стальных поверхностей является фрикционная обработка инденторами из твердых материалов, проводимая в условиях трения скольжения, исключающих заметный нагрев поверхности [2]. Указанная обработка может обеспечить существенный рост сопротивления сталей различным видам изнашивания, в том числе в условиях значительного фрикционного нагрева [3-5].

Формирование в металлических материалах высокодисперсного структурного состояния методами интенсивного пластического деформирования (ИПД) обеспечивает повышение прочности, но одновременно с этим происходит снижение пластичности и увеличивается склонность к разрушению, например, при циклическом растяжении [6]. Вслед-

ствие значительной хрупкости нанокристаллических структур может наблюдаться неоднозначное и даже отрицательное влияние наноструктурирования сплавов железа на износостойкость в условиях трения скольжения [7]. Перевод материала в предельно деформированное состояние при ИПД может сопровождаться практически полным исчерпанием его запаса пластичности и приводить к снижению долговечности, в частности, при усталостном нагружении [8]. Имеются сведения о возможностях повышения пластичности в результате дополнительного отжига после наноструктурирования методом ИПД поверхностного слоя конструкционной стали [9].

Целью работы явилось изучение влияния упрочняющей фрикционной обработки и последующих термических воздействий на твердость, износостойкость в условиях трения скольжения и абразивного изнашивания, а также механические свойства при растяжении закаленной среднеуглеродистой стали. Решалась также задача поиска оптимальной комбинированной деформационно-термической обработки, обеспечивающей конструкционной стали высокий комплекс трибологических и механических свойств

Образцы из стали 50 (0,51 %С) подвергали закалке от 850°C в воду и в масло промышленное И-12. Фрикционную обработку рабочей части (25×7 мм) плоских образцов толщиной 2,7 мм осуществляли на воздухе и в безокислительной среде аргона при сканировании полусферическим твердосплавным индентором при нагрузках 588 и 784 Н, средней скорости скольжения 0,025 м/с. Для механических испытаний плоские образцы подвергали фрикционной обработке с двух сторон. Образцы в исходном закаленном состоянии, а также после поверхностной пластической деформации трением отпускали в вакууме при температуре 100-600°C в течение 1 и 2 часов.

*Макаров Алексей Викторович, доктор технических наук
заведующий лабораторией, заведующий лабораторией
конструкционного материаловедения*

E-mail: makarov@imach.uran.ru

*Юровских Артем Сергеевич, кандидат технических наук,
доцент*

*Саврай Роман Анатольевич, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории конструкционного
материаловедения*

*Поздеева Наталья Андреевна, инженер лаборатории конст-
рукционного материаловедения*

*Малыгина Ирина Юрьевна, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории конструкционно-
го материаловедения*

Электронно-микроскопическое исследование структуры осуществляли на микроскопе JEOL JEM-2100 методом тонких фольг на просвет с применением одностороннего и двустороннего механического и электролитического утонения заготовок. Микротвердость измеряли на микротвердомере Leica VMHT при нагрузке на индентор 0,49 Н. Кинетическое микроиндентирование проводили на измерительной системе Fischerscope HM2000 Xyt при максимальной нагрузке на индентор Виккерса 0,98 Н. Механические испытания на одноосное растяжение проводили на установке Instron 8801.

Трибологические испытания проводили на лабораторной установке при возвратно-поступательном движении образцов с рабочей поверхностью 7×7 мм. Абразивную износостойкость исследовали при изнашивании по закрепленному абразиву кремню зернистостью 200 мкм при нагрузке N=17 Н и средней скорости скольжения 0,175 м/с. Испытания в условиях сухого трения скольжения в воздушной среде при отсутствии заметного фрикционного нагрева проводили по схеме палец-пластина при возвратно-поступательном движении торцевой поверхности образца по пластине из стали 45 при нагрузке 294 Н и средней скорости скольжения 0,07 м/с. Испытания на трение скольжения со смазкой (масло И-30А) осуществляли при нагрузке 1470 Н. Определяли потери массы образцов при изнашивании и коэффициент трения. Интенсивность изнашивания рассчитывали по формуле $Ih = Q/\rho SL$, где Q – потеря массы образца, г; ρ – плотность материала образца, г/см³; L – путь трения, см; S – геометрическая площадь контакта, см².

После закалки сталь 50 имеет структуру, состоящую из пластинчатого и пакетного мартенсита (рис. 1а). В результате интенсивной пластической деформации при фрикционной обработке в тонком (5-8 мкм) поверхностном слое закаленной стали происходит сильная фрагментация мартенситных кристаллов и формируется ультрадисперсная (нанокристаллическая) структура с размерами кристаллитов от нескольких нм до 100 нм (рис. 1б, в). Кольцевой вид микроэлектронограммы свидетельствует о сильных разориентировках отдельных кристаллитов.

Возникновение нанокристаллических структур свидетельствует о том, что при фрикционной обработке пластическая деформация поверхностного слоя осуществляется ротационным механизмом по-

средством относительных разворотов фрагментов, в результате чего формируются их тонкие большеугловые границы, образованные частичными дисклинациями [10].

Сильное диспергирование мартенситной структуры обуславливает значительный рост твердости стали 50 от 8,0 ГПа (у исходного состояния) до 10,7-11,1 ГПа (у деформированного трением поверхностного слоя). Высокая прочность нанокристаллических структур обусловлена не только их большой дисперсностью и экстремальной средней плотностью дислокаций, но также протеканием в кристаллах тетрагонального мартенсита деформационного динамического старения, которое характеризуется образованием на возникающих при трении многочисленных дислокациях сегрегаций из атомов углерода. Большая энергия взаимодействия дислокаций с углеродными сегрегациями обуславливает сильное закрепление дислокаций и, соответственно, интенсивное деформационное упрочнение стали.

Рис. 2 показывает, что при фрикционной обработке максимальное уровни твердости и ширины рентгеновской линии, а соответственно, и дефектности структуры мартенсита наблюдаются непосредственно на поверхности образца. Наиболее интенсивное уменьшение указанных характеристик происходит в слое толщиной 30-50 мкм, а дальнейшее снижение микротвердости по глубине поверхностного слоя носит более плавный характер. При этом общая толщина упрочненного слоя превышает 250 мкм (см. рис. 2) вследствие активного развития деформационного динамического старения мартенсита даже при малых деформациях.

Из рис. 3а следует, что наноструктурирующая фрикционная обработка существенно повышает сопротивление разупрочнению при нагреве закаленной стали 50. При этом повышенная твердость деформационно упрочненного слоя по сравнению с исходным закаленным состоянием сохраняется до 350°C. Основными причинами повышенной теплоустойчивости нанокристаллических структур, сформированных в закаленных сталях фрикционной обработкой, являются [2-4]: сохранение нанокристаллической структуры α-фазы до температур нагрева не менее 350°C; эффективное закрепление дислокаций углеродом в результате активизации в нанокристаллическом мартенсите процессов деформационного динамического старения;

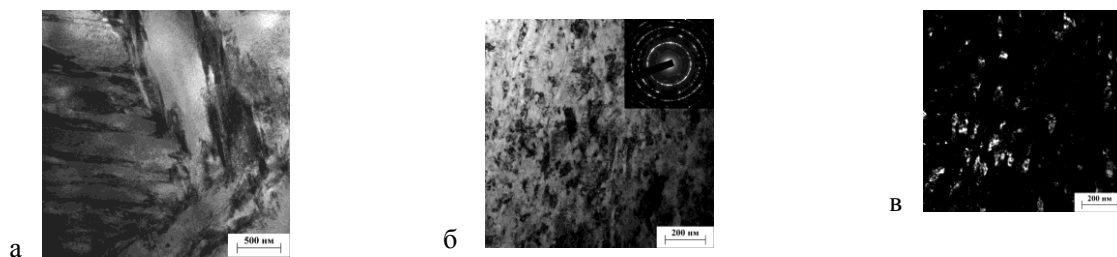


Рис. 1. Структура стали 50 после закалки от 850°C в воде (а) и последующей фрикционной обработки (б, в): а, б – светлопольные изображения; в – темнопольное изображение в рефлексе (110)α.

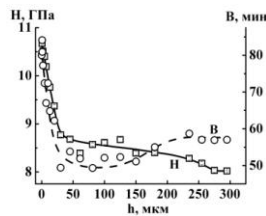


Рис. 2. Изменение микротвердости H и ширины B рентгеновской линии $(110)\alpha$ -фазы по глубине h поверхностного слоя закаленной от 850°C в воде стали 50, подвергнутой фрикционной обработке.

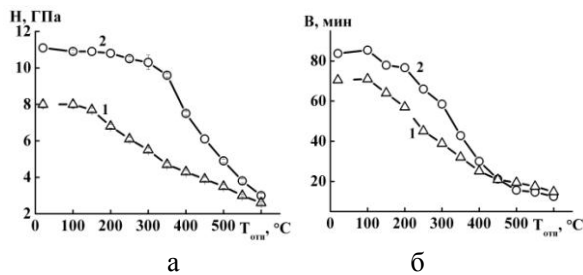


Рис. 3. Влияние температуры отпуска на микротвердость H (а) и интегральную ширину B рентгеновской линии $(110)\alpha$ (б) стали 50 в исходном закаленном состоянии (кривая 1) и после фрикционной обработки (кривая 2).

торможение формирования и роста карбидных частиц; торможение процессов возврата в α -фазе, на что указывают повышенные значения ширины рентгеновской линии $(110)\alpha$ у деформированной стали 50 вплоть до 400°C (рис. 3б, кривая 2); отсутствие катастрофического (аномального) роста зерна при рекристаллизации деформированных трением сталей.

Согласно результатам сравнительного анализа трибологических свойств (рис. 4), фрикционная обработка закаленной стали 50 обуславливает существенное (в 1,5-3,0 раза) снижение интенсивности изнашивания в условиях абразивного воздействия, а также при трении скольжения по стальной пластине в присутствии смазки (в условиях граничного трения) и без смазки (в условиях адгезионного изнашивания при отсутствии заметного фрикционного нагрева). Отмеченное преимущество в износостойкости у стали, упрочненной фрикционной обработкой, сохраняется и может даже значительно возрастать после отпуска при 100 - 600°C в условиях абразивного изнашивания и при трении со смазкой (см. рис. 4а, б).

В условиях же адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей (при трении без смазки) указанное преимущество в износостойкости (пониженные значения Ih) у подвергнутой фрикционной обработке поверхности (см. рис. 4в, кривая 2) по сравнению с исходным состоянием (см. рис. 4в, кривая 1) сохраняется лишь при нагреве до 350°C . После же отпуска при 400 - 600°C подвергнутая фрикционной обработке сталь (см. рис. 4в, кривая 2) характеризуется более высокой интенсивностью

изнашивания, чем недеформированная трением сталь (см. рис. 4в, кривая 1). Это может быть следствием разупрочнения закаленной стали в результате нагрева до 400°C (см. рис. 3а) ниже критического уровня, когда ускоренное разрушение градиентного поверхностного слоя деформационно упрочненной стали при адгезионном изнашивании начинает развиваться по глубинным менее прочным слоям материала.

Рис. 5 свидетельствует, что в условиях механических испытаний на растяжение фрикционная обработка не оказывает заметного влияния на предел текучести закаленной стали 50, однако снижает ее предел прочности (временное сопротивление разрыву) и пластичность, охрупчивая поверхностный слой. Важно отметить, что выявленное отрицательное влияние наноструктурирующей фрикционной обработки на механические свойства рассматриваемой стали устраняется последующим отпуском при температурах более 200 - 300°C (см. рис. 5).

В табл. 1 приведены данные кинетического индентирования стали 50 с записью диаграммы нагружения индентора Виккерса в координатах нагрузка – перемещение индентора, определенные согласно стандарту ISO 14577-1:2002.

Видно, что в результате уменьшения после фрикционной обработки значений максимальной и остаточной глубины вдавливания индентора h_{\max} и h_p несколько возрастает упругое восстановление R_e ($R_e = (h_{\max} - h_p) / h_{\max} \times 100\%$). Фрикционная обработка закаленной стали обуславливает рост твердости по Мартенсу H_{IT} (которая учитывает не только пластическую, но и упругую деформации), твердости вдавливания при максимальной нагрузке H_{IT} . При фрикционной обработке возрастают также отношение H_{IT}/E^* (удельная контактная твердость, характеризующая стойкость материала к упругой деформации [11] и износостойкость [12]) и отношение H_{IT}^3/E^{*2} , которое считается качественной сравнительной характеристикой сопротивления пластической деформации [13]. Рост указанных отношений в результате фрикционной обработки связан главным образом с повышением твердости вдавливания H_{IT} , поскольку контактный модуль упругости E^* почти не изменяется (см. табл. 1).

Чем больше значения отношений H_{IT}/E^* , H_{IT}^3/E^{*2} и упругого восстановления R_e , тем выше способность поверхностных слоев сопротивляться упругим и пластическим деформациям, а следовательно, и выдерживать в условиях эксплуатации нагрузки без разрушения.

На основании установленных зависимостей от температуры отпуска микротвердости (см. рис. 3а), интенсивностей изнашивания при трении и абразивном воздействии (см. рис. 4), а также механических свойств при растяжении (см. рис. 5) был выбран оптимальный режим комбинированной деформационно-термической обработки с окончательным отпуском при 350°C (табл. 1, 2).

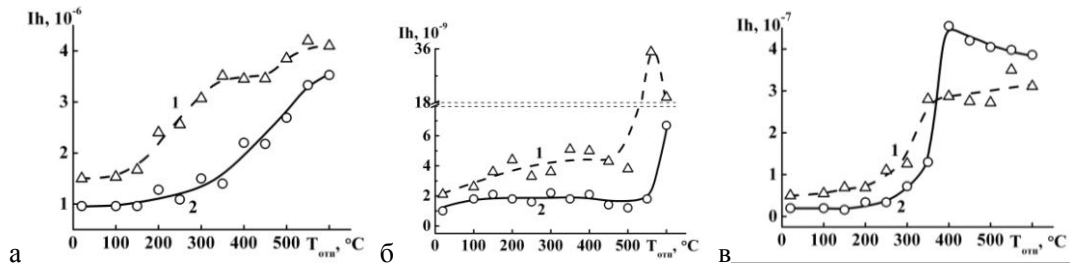


Рис. 4. Влияние температуры отпуска $T_{отп}$ на интенсивность изнашивания Ih при абразивном воздействии кремнем (а) и трении скольжения по стальной пластине со смазкой (б) и без смазки (в) стали 50: 1 – закалка от 850°C в воду + отпуска; 2 – закалка + фрикционная обработка + отпуска.

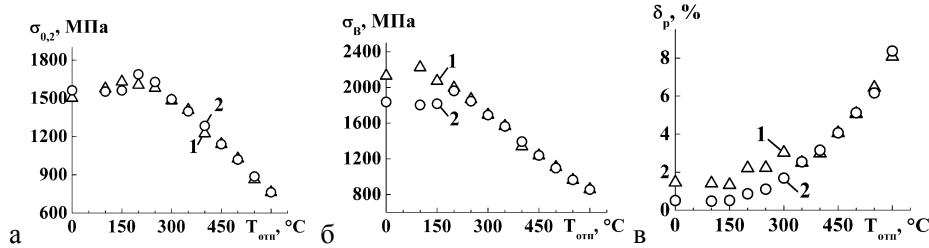


Рис. 5. Влияние температуры отпуска $T_{отп}$ на механические свойства стали 50 при одноосном растяжении: 1 – закалка от 850°C в масло + отпуска; 2 – закалка + фрикционная обработка + отпуска; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; σ_B – временное сопротивление разрыву; δ_p – равномерное удлинение.

Таблица 1. Результаты микроиндентирования образцов из стали 50 при нагрузке 0,98 Н

Состояние образца	h_{\max} , мкм	h_p , мкм	НМ, ГПа	H_{IT} , ГПа	E^* , ГПа	R_e , %	H_{IT}/E^*	H_{IT}^3/E^{*2} , ГПа
Закалка	2,50	1,86	6,1	8,6	212	25,8	0,041	0,014
Закалка + фрикционная обработка	2,20	1,46	7,9	12,4	218	33,8	0,057	0,040
Закалка + отпуск 350°C	2,90	2,33	4,5	5,8	223	19,6	0,026	0,004
Закалка + фрикционная обработка + отпуск 350°C	2,33	1,64	7,0	10,4	214	29,7	0,049	0,025

Примечание: h_{\max} – максимальная глубина вдавливания индентора; h_p – остаточная глубина вдавливания индентора после снятия нагрузки; НМ – твердость по Мартенсу; H_{IT} – твердость вдавливания; E^* – контактный модуль упругости; R_e – упругое восстановление

Таблица 2. Влияние термической и деформационно-термической обработок стали 50 на микротвердость H , интенсивность изнашивания Ih , коэффициент трения f , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление разрыву σ_B и равномерное удлинение δ_p при испытаниях на растяжение

Состояние образца	H , ГПа	Трибологические свойства						Механические свойства		
		испытания по кремню		трение со смазкой		трение без смазки		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_p , %
		$Ih, 10^{-6}$	f	$Ih, 10^{-9}$	f	$Ih, 10^{-7}$	f			
Закалка + отпуск 350°C	4,6	3,5	0,46	5,3	0,11	2,8	0,61	1410	1570	2,5
Закалка + фрикционная обработка + отп. 350°C	8,6	1,4	0,23	1,8	0,07	1,3	0,67	1400	1560	2,5

Данные табл. 1 и 2 показывают, что комбинированная обработка, включающая закалку, фрикционную обработку и последующий отпуск при 350°C , обеспечивает по сравнению с закаленной и отпущенной при этой же температуре сталью рост харак-

теристик твердости H , НМ и H_{IT} (в 1,6-1,9 раза), снижение интенсивностей изнашивания Ih при трении и абразивном воздействии (в 2,2-2,9 раза), повышение величины упругого восстановления R_e (в 1,5 раза), а также характеристик стойкости к упругой

деформации H_{IT}/E^* (в 1,9 раза) и сопротивления пластической деформации H_{IT}^3/E^{*2} (в 6,2 раза) при отсутствии снижения механических свойств стали $\sigma_{0,2}$, σ_B и δ_r .

В результате комбинированной обработки снижается также коэффициент трения в условиях скольжения стали 50 по закрепленному абразиву (кремню) и при трении со смазкой по стальной пластине (см. табл. 2). Рассмотренная комбинированная обработка конструкционной среднеуглеродистой стали 50 соответствует способу поверхностного упрочнения стальных изделий [14], включающего объемную или лазерную закалку с дополнительным деформированием в условиях трения скольжения при температуре поверхностного слоя в интервале от -196 до 100°C и возможным последующим отпуском при температурах до 450°C .

Проведение комбинированных деформационно-термических обработок позволит расширить сферу применения фрикционной обработки, в частности, для упрочнения валов и других деталей, работающих в условиях статического и циклического нагружения.

Выводы:

- фрикционная обработка твердосплавным индентором формирует в тонком (5-8 мкм) поверхностном слое закаленной стали 50 нанокристаллическую структуру с повышенными уровнями микротвердости (10,7-11,1 ГПа), теплостойкости и сопротивления упругим и пластическим деформациям при общей глубине упроченного слоя ~ 250 мкм;

= наноструктурирующая фрикционная обработка обеспечивает существенный (в 1,5-3,0 раза) рост износостойкости стали в условиях абразивного и адгезионного изнашивания, а также граничного трения; нано-кристаллический слой обладает повышенной износостойкостью и после нагрева до 600°C (при абразивном воздействии и трении со смазкой) и до 350°C (при сухом трении скольжения по стали);

фрикционная обработка, охрупчивая поверхностный слой закаленной стали 50, снижает ее пластичность и предел прочности в условиях испытаний на растяжение, однако

это отрицательное влияние на механические свойства устраняется нагревом до температур более $200-300^\circ\text{C}$;

предложена оптимальная комбинированная деформационно-термическая обработка закаленной конструкционной стали 50, включающая фрикционную обработку с отпуском при 350°C , обеспечивающая существенно повышенные уровни твердости, износостойкости и сопротивления поверхности деформациям при отсутствии снижения механических свойств по сравнению с закаленной и отпущенной при этой же температуре сталью.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта № 09-П-1-1008 по программе Президиума РАН №22, междисциплинарного проекта № 09-М-12-2002 и гранта РФФИ № 11-08-01025-а.

Просвечивающая электронная микроскопия реализована на оборудовании Лаборатории структурных методов анализа материалов и наноматериалов ЦКП УрФУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов К.В. Надежность и ресурс машин и механизмов // Вестник АН СССР. 1985. № 8. С. 74–84.
2. Макаров А.В. Наноструктурирующая фрикционная обработка углеродистых и низколегированных сталей // В кн. Перспективные материалы. Том IV: Учебное пособие / Под ред. Д.Л. Мерсона: ТГУ, 2011. С. 123–207.
3. Макаров А.В., Коршунов Л.Г. Прочность и износостойкость нанокристаллических структур поверхностей трения сталей с мартенситной основой // Изв. Вузов. Физика. 2004. № 8. С. 65–80.
4. Макаров А.В., Коршунов Л.Г., Малыгина И.Ю., Солодова И.Л. Повышение теплостойкости и износостойкости закаленных углеродистых сталей фрикционной упрочняющей обработкой // МнТОМ. 2007. № 3. С. 57–62.
5. Макаров А.В., Коршунов Л.Г., Выходец В.Б. и др. Влияние упрочняющей фрикционной обработки на химический состав, структуру и трибологические свойства высокоуглеродистой стали // ФММ. 2010. Т. 110. № 5. С. 530–544.
6. Makarov A.V., Savrai R.A., Pozdejeva N.A. et al. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension // Surf. Coat. Technol. 2010. V. 205. P. 841–852.
7. Zhou L., Liu G., Han Z., Lu K. Grain size effect on wear resistance of a nanostructured AISI52100 steel // Scr. Mater. 2008. V. 58. P. 445–448.
8. Hanlon T., Kwon Y.-N., Suresh S. Grain size effects on the fatigue response of nanocrystalline metals // Scr. Mater. 2003. V. 49. P. 675–680.
9. Панин А.В., Леонтьева-Смирнова М.В., Чернов В.М. и др. Повышение прочностных характеристик конструкционной стали ЭК-181 на основе многоуровневого подхода физической мезомеханики // Физич. Мезомех. 2007. Т. 10. № 4. С. 73–86.
10. Лухачев В.А., Панин В.Е., Засимчук Е.Э. и др. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации. Киев: Наукова Думка, 1989. 320 с.
11. Cheng Y.T., Cheng C.M. Relationships between hardness, elastic modulus and the work of indentation // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. No. 5. P. 614–618.
12. Leyland A., Matthews A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimized tribological behavior // Wear. 2000. V. 246. P. 1–11.
13. Mayrhofer P.H., Mitterer C., Musil J. Structure-property relationships in single- and dual-phase nanocrystalline hard coatings // Surf. Coat. Technol. 2003. V. 174–175. P. 725–731.
14. Патент РФ № 2194773. Способ обработки стальных изделий / А.В. Макаров, Л.Г. Коршунов, А.Л. Осинцева. Оpubл. в БИМП. 2002. № 35.
- 15.

EFFECT OF FRICTION AND COMBINED DEFORMATION-THERMAL TREATMENTS ON TRIBOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

OF QUENCHED CONSTRUCTIONAL STEEL

© 2011 A.V. Makarov¹, N.A. Pozdejeva¹, R.A. Savrai¹, A.S. Yurovskikh², I.Yu. Malygina¹

¹Institute of Engineering Science UB RAS, Ekaterinburg

²Ural Federal University, Ekaterinburg

The influence of nanostructuring friction treatment with a hard-alloy indenter and subsequent thermal actions on microhardness, tribological characteristics under conditions of sliding friction and abrasive wear, as well as mechanical properties upon tension of quenched medium-carbon steel is studied. It is proposed a combined deformation-thermal treatment which provides the constructional steel with high complex of tribological and mechanical properties.

Key words: constructional steel, friction treatment, nanocrystalline structure, microhardness, wear intensity, mechanical properties, microindentation

Makarov Alexey Viktorovich, Dr.Sci.Tech. the laboratory chief, the laboratory chief of constructional materials technology

E-mail: makarov@imach.uran.ru

Jurovsky Artem Sergeevich, Cand.Tech.Sci., the senior lecturer

Сапай the Novel Anatolyevich, Cand.Tech.Sci., the senior research assistant of laboratory of konstruksionno th materials technology

Pozdeeva Natalia Andreevna, the engineer of laboratory konst-ruktsionnogo materials technology

Malygin Irina Jurevna, Cand.Tech.Sci., the senior research assistant of laboratory of konstruksionno th materials technology