

УДК 621.793

МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТАЛИ В ВОДОДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ

канд. техн. наук А.А. ШМАТОВ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Исследованы структура и свойства стальной поверхности, подвергнутой термогидрохимической обработке в вододисперсной среде на основе оксидов $TiO_2 + MoO_3$. Процесс термогидрохимической обработки включает: 1) химическую обработку поверхности в специальной вододисперсной среде; 2) термообработку. В результате оптимизации процесса ТГХО коэффициент трения стальной поверхности снизился в 8,3 раза. Разработанная технология позволяет повысить стойкость стальных инструментов и изделий в 1,3... 4,5 раза по сравнению с традиционными.

Введение. Проблема повышения износостойкости стальных инструментов и деталей машин, по-прежнему, остается актуальной. Решить ее можно путем модифицирования стали тугоплавкими соединениями различными методами обработки. Наибольший научный и практический интерес в этом плане представляет процесс термогидрохимической обработки (ТГХО) стали в вододисперсной среде, поскольку применим для готовых к эксплуатации изделий, не изменяет их первоначальные размеры, форму и структуру [1 – 5]. Согласно настоящим представлениям в области трения и изнашивания [6 – 8], лучшими антифрикционными свойствами в атмосферных условиях обладают материалы и покрытия на основе сульфидов и оксидов. Однако предпочтение при разработке покрытий отдается оксидам, поскольку они являются постоянной составляющей граничного слоя, образующегося при трении любого материала. При формировании оксидной пленки определенного состава и структуры можно создать поверхностное упрочнение (эффект Роско) и снизить сопротивление сдвигу при трении (эффект Ребиндера, Берналла и др.); причем эффект Ребиндера реализуется только в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ). Согласно молекулярно-механической теории трения повышение износостойкости изделия можно достичь при выполнении двух основных условий: при высокой твердости поверхности стали (покрытия) и низкой ее прочности адгезионной связи с контактирующим материалом в зоне трения.

Как известно [6 – 10], материалы и покрытия обладают твердосмазочными свойствами в тех случаях, когда: а) имеют слоистую поликристаллическую структуру (графит, сульфиды); б) сформированы на основе наноструктурированных материалов; в) реализуется теория Берналла, согласно которой твердое тело приобретает свойства жидкости, если в кристаллической решетке содержится более 10 % вакансий; г) реализуется эффект Ребиндера, который ведет к пластифицированию поверхностного слоя и созданию положительного градиента механических свойств в зоне трения; д) реализуется эффект Киркинда, который приводит к селективному растворению из сплава легирующих элементов из-за различия их электрохимических потенциалов, в результате чего формируется квазижидкая пленка, снижающая коэффициент трения и фрикционный разогрев.

Среди указанных способов следует выделить методы обработки стали, которые позволяют сформировать наноструктуру на основе тугоплавких и сверхтвердых материалов [1 – 5; 11]. Наноструктурированные материалы и покрытия облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения; в то же время твердость наноматериалов из металлов и тугоплавких соединений возрастает 2...3 раза [10]. Именно покрытия, сформированные методом термогидрохимической обработки, имеют наноструктуру и обладают сверхпластичностью [1 – 5]. В условиях интенсивной эксплуатации инструментов и деталей машин, когда в зоне трения отсутствует смазка или ее подача ограничена, наилучшим способом снижения коэффициента трения является нанесение твердосмазочных покрытий на рабочие части изделий, что гарантирует их длительную работу. Термогидрохимическая обработка является наиболее простым и универсальным методом. С помощью этого метода можно создавать наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, других антифрикционных материалов и их композиций [1 – 5].

Из приведенного анализа следует, что процесс ТГХО имеет большие перспективы для своего развития, прежде всего для инструментов и деталей машин, имеющих малый ресурс работы. Однако вопросы, связанные с термогидрохимической обработкой практически всех инструментальных и конструкционных сталей, мало изучены.

В настоящей работе поставлены задачи: 1) сравнить триботехнические свойства стальной поверхности, подвергнутой ТГХО в вододисперсной среде на основе оксидов и их композиций; 2) оптимизировать процесс ТГХО стали; 3) изучить структуру и закономерности формирования оптимизированных покрытий на стали; 4) оценить уровень напряженного состояния и глубину модифицированного слоя в стали, подвергнутой ТГХО; 5) апробировать разработанный процесс ТГХО в промышленности.

Объекты и методика исследований. Все исследования проведены на углеродистой инструментальной стали У8 (0,8 % С), которую подвергали термогидрохимической обработке. Сам процесс ТГХО осуществляли в 2 этапа: а) путем химической обработки (ХО) поверхности при температуре 95...100 °С в течение 40...120 минут в специально приготовленной вододисперсной среде на базе наноразмерных порошков тугоплавких материалов; б) последующей термической обработки (ТО), включающей нагрев до температуры 130...1050 °С, выдержку в течение 30...60 минут и охлаждение. Насыщающую вододисперсную среду предварительно готовили по специальной технологии диспергирования до наноуровня грубодисперсных частиц (размером не более 5 мкм) тугоплавких соединений (оксидов) и других материалов с добавлением 5 %-ного водорастворимого поверхностно-активного вещества (сульфанола). Готовым считался рабочий состав с кислотностью РН 6...8, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH_4OH . При проведении химической обработки образцы помещали и выдерживали в ванне с готовым составом водной насыщающей среды, нагретой до температуры процесса. Поверхность образцов предварительно обезжиривали и декапировали в 5 %-ном растворе серной кислоты в течение 1...2 минут. После каждой операции подготовки и химической обработки образцы промывали в воде. Изотермическую выдержку стали проводили в воздушной среде до 250 °С, выше этой температуры – под слоем флюса SnCl_2 или плавкого затвора V_2O_5 .

Для изучения структуры стали, подвергнутой термогидрохимической обработке, применяли микроструктурный, рентгеноструктурный, микрорентгеноспектральный анализы. Тонкую структуру и морфологию поверхности исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) «Nanoscope 3D» (Veeco, USA). Рентгеновские съемки стальной поверхности выполнялись на дифрактометре ДРОН-3.0 в режиме сканирования по точкам в монохроматизированном CuK_α -излучении. Расчет макронапряжений в стали осуществляли по методике одной съемки, как сумму главных напряжений σ_1 , σ_2 по формуле [12; 13]:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -E/\mu [(d_\perp - d_0)/d_0],$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; d_0 – межплоскостное расстояние для ненапряженного материала; d_\perp – среднее межплоскостное расстояние для напряженного материала в направлении, перпендикулярном к поверхности образца.

Триботехнические свойства стальной поверхности исследовали на микротрибометре возвратно-поступательного типа (ИММС, г. Гомель) по схеме «подвижный шарик – неподвижная плоскость» при следующих условиях испытаний: нагрузка 1 Н; длина трека 3 мм, скорость 4 мм/с; пара трения: упрочненная сталь (плоскость) – сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм) [4; 5]. Показатель относительной стойкости упрочненного инструмента (или детали) определяли по формуле $K_w = t_2/t_1$, где t_1 – время работы (длина рабочего хода) исходного инструмента; t_2 – время работы упрочненного инструмента.

Результаты исследований. Процесс термогидрохимической обработки имеет двойственный характер упрочнения: 1) на поверхности стали осаждается наноструктурированное твердосмазочное тугоплавкое покрытие; 2) в подслое создается модифицированная зона с высокими напряжениями сжатия.

Полученные покрытия на сталях имеют малую толщину (200...500 нм). Это ограничивает число методов, с помощью которых можно изучить свойства термогидрохимических тонкопленочных покрытий. Для наноструктурированных покрытий широко применяют методы исследования триботехнических характеристик, определяющей из которых является коэффициент трения [7; 8; 11].

Триботехнические исследования. Полученные твердосмазочные покрытия благодаря формированию нанокристаллической структуры обладают сверхпластичными свойствами. Результаты (рис. 1, 2) сравнительных трибологических испытаний поверхности стали У8, подвергнутой 2-часовой химической обработке (без термообработки) позволили сделать заключение, что в условиях сухого трения скольжения и воздушной атмосферы увеличение числа компонентов из тугоплавких антифрикционных материалов в составе вододисперсной насыщающей среды ведет к снижению коэффициента трения осажденных твердосмазочных покрытий. Процесс ТГХО может стать наиболее простым способом целенаправленного повышения износостойкости готовых изделий и изначально важно сформировать на поверхности сталей многокомпонентные, а не однокомпонентные оксидосодержащие покрытия.

На основании оптимизации и компьютерного проектирования процесса ТГХО стали У8 с помощью синтез-технологий определены технически оптимальные режимы и составы вододисперсных оксидных сред [4]. Обработка стали У8 по оптимальному режиму (ХО, 1 ч в составе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$, затем ТО при 200 °С, 0,5 ч) позволила существенно (в 8,3 раза) снизить коэффициент трения поверхности при сухом трении скольжения, по сравнению с исходным состоянием (рис. 3). Для инструмента, у которого место контакта с деталью меняется со временем (приработка не идет в одной точке) [14] важно на протяжении всего времени эксплуатации иметь не только минимальные, но неизменные значения коэффициента трения; этим требованиям отвечают термогидрохимические покрытия. Они имеют преимущества перед PVD алмазным покрытием (рис. 3) и другими твердосмазочными покрытиями [11], у которых сна-

чала коэффициент трения высокий, а затем он медленно снижается по мере приработки покрытий с кон-тртелом, причем с большой амплитудой колебаний.

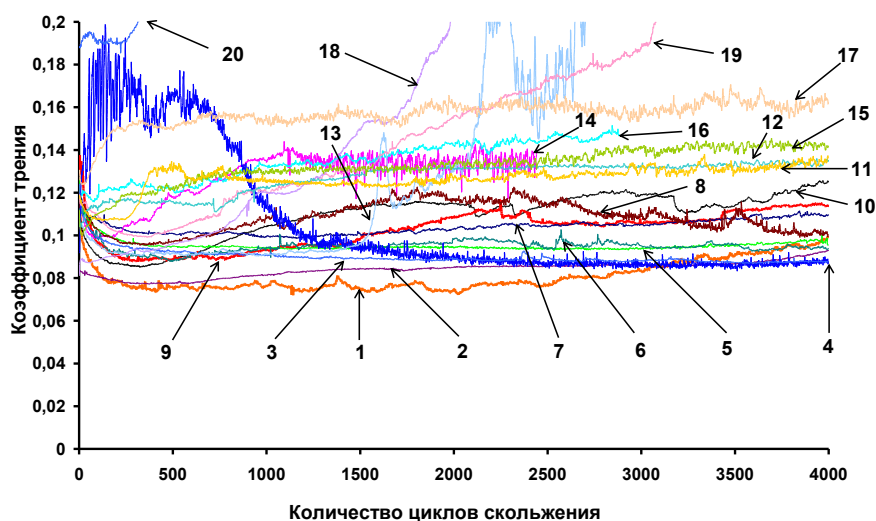


Рис. 1. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания ГХ покрытий на основе однокомпонентных оксидов при сухом трении скольжения:
1 – SnO; 2 – MnO₂; 3 – SiO₂; 4 – PbO; 5 – Co₃O₄; 6 – NiO; 7 – Al₂O₃; 8 – MoO₃; 9 – ZnO; 10 – SbO₃; 11 – V₂O₄; 12 – Bi₂O₄; 13 – B₂O₃; 14 – BeO; 15 – ZrO₂; 16 – Fe₃O₄; 17 – Cr₂O₃; 18 – WO₃; 19 – TiO₂; 20 – CuO

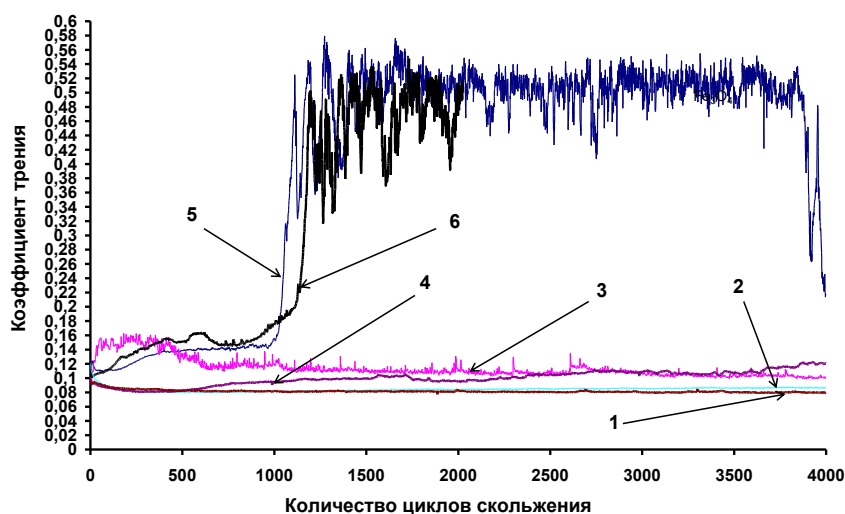


Рис. 2. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания ГХ покрытий на основе однокомпонентных углеродных (а) и многокомпонентных тугоплавких материалов (б) при сухом трении скольжения:
1 – MoO₃ + TiO₂ + ультрадисперсного алмаза (УДА); 2 – PbO + SnO + графита карандашного (ГК); 3 – PbO + SnO; 4 – MoO₃ + TiO₂; 5 – ZnO + SnO; 6 – ZnO + SnO + графита ГК

При дальнейшем исследовании триботехнических свойств выявлена важная эксплуатационная особенность разработанных покрытий. Термогидрохимические оксидные покрытия отличаются от ныне известных наноструктурированных покрытий [10; 11] более высокой термической стабильностью: даже после нагрева до 1050 °С и выдержки в течение 0,5 ч полученные покрытия сохраняют очень низкий ($f = 0,09$) коэффициент трения (рис. 4). Антифрикционные свойства поверхности определяются ее химическим составом, морфологией строения, микрорельефом, структурой, напряженным состоянием и другими факторами.

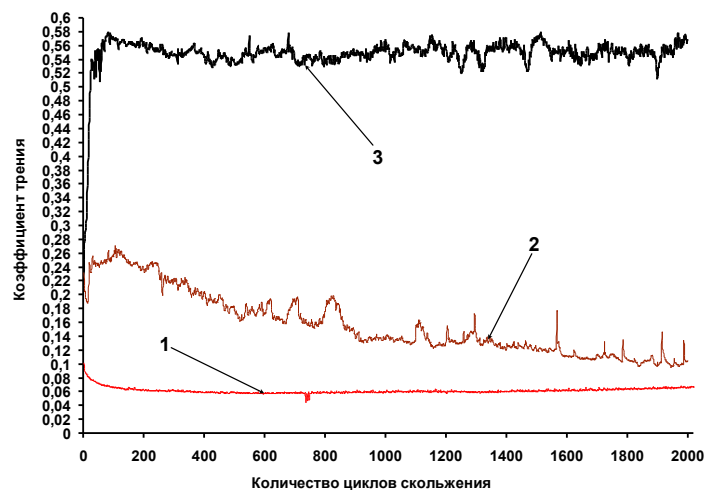


Рис. 3. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания (без смазки) поверхности стали У8 до и после ТГХО:
1 – сталь У8 после ТГХО в оптимальном режиме;
2 – сталь У8 с алмазоподобным PVD покрытием; 3 – исходная сталь У8 (без обработки)

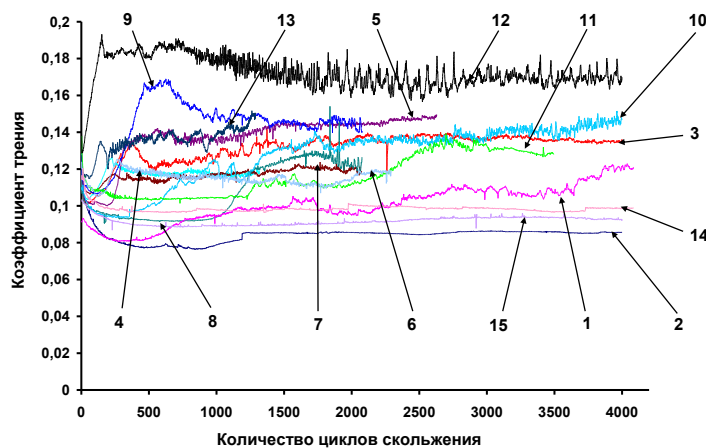


Рис. 4. Влияние температуры термообработки при ТГХО стали У8 на коэффициент трения при сухом трении скольжения (режим ХО: $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2\text{ ч}$; состав водной среды на основе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$):
1 – $100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $200\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $250\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – $300\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 – $350\text{ }^{\circ}\text{C}$; 6 – $400\text{ }^{\circ}\text{C}$; 7 – $450\text{ }^{\circ}\text{C}$; 8 – $500\text{ }^{\circ}\text{C}$;
9 – $550\text{ }^{\circ}\text{C}$; 10 – $600\text{ }^{\circ}\text{C}$; 11 – $650\text{ }^{\circ}\text{C}$; 12 – $700\text{ }^{\circ}\text{C}$; 13 – $870\text{ }^{\circ}\text{C}$; 14 – $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$; 15 – $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$

Структурные исследования в данной работе были проведены на стальных образцах, упроченных ТГХО в оптимальных вододисперсных средах на основе оксидов титана и молибдена. С помощью атомно-силового микроскопа «Nanoscope 3D» изучена морфология и кинетика формирования наноструктурированных слоев сначала в результате гидрохимической обработки стали У8 в дисперсном составе на основе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$, а затем после нагрева до температур от 100 до $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термогидрохимические покрытия на стали У8 имеют сложную структуру поверхности (рис. 5), состоящую из неоднородных по цвету и форме зерен. Все полученные покрытия формируются с нано- или нанокомпозитной структурой. Первоначально в вододисперсной среде на поверхности стали осаждаются зародыши размером 16 нм ; с увеличением времени химической обработки эти частицы заполняют поверхность, а затем и пространство, незначительно меняя свои размеры (табл. 1). В результате по принципу «свободного падения апельсинов (кластеров)» [15] на подложке формируются высокоорганизованные пленки с сильно развитой зернограничной поверхностью. Скорость роста гидрохимических слоев на стали составляет около 200 нм/ч . При касании отдельных наноразмерных частиц иглой микрозонда АСМ сканируются белые размытые строчки (рис. 5, а), что свидетельствует о подвижности этих частиц, их слабой связи с поверхностью и другими кристаллитами. Последнее указывает на твердосмазочные свойства гидрохимически полученных покрытий и находит объяснение в том, что наноматериалы по своей природе обладают сверхпластичностью [10].

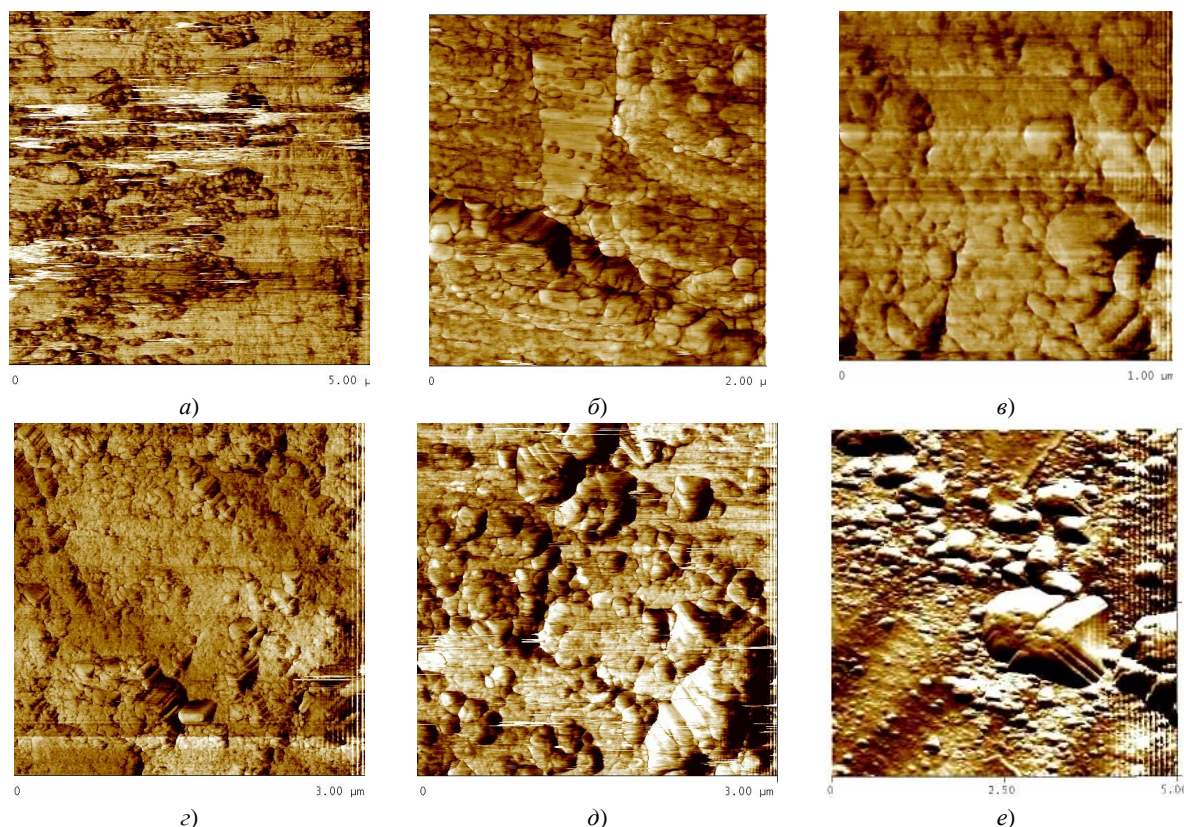


Рис. 5. Структура поверхности стали У8 после гидрохимической обработки в течение 10 мин (а), 30 мин (б), 1 ч (в, с), 2 ч (д) и термогидрохимической обработки при нагреве до 1000 °С (е) (состав вододисперсной среды – оптимальный на основе $TiO_2 + MoO_3$)

Таблица 1

Влияние параметров ТГХО стали У8 на размер зерен в покрытии

Время химического осаждения ГХ покрытия, мин		10			30			60			120	
Размер зерен в покрытии, нм		16			24			25			35	
Температура нагрева покрытия, °С	100	150	250	300	400	500	600	700	800	870	1000	
Размер зерен в покрытии, нм	25...30	30...34	90...95	90...95	90...97	90...100	95...110	110...120	90...100	90...110	90...205	

При последующем нагреве стали У8 размер зерен в полученных ГХ покрытиях с повышением температуры увеличивается (см. табл. 1); при этом сначала преобладает наноразмерная структура слоев, а выше 500 °С формируется нанокомпозитная структура, в которой появляются отдельные зерна (размером более 100 нм). Отмеченные ранее высокие антифрикционные свойства покрытий на стали после высокотемпературного нагрева до 1050 °С обусловлены формированием такой композиционной (нанополикристаллической) структуры, в которой оптимально сочетаются размеры и количество нано- и поликристаллических зерен.

О высокой модифицирующей способности вододисперсных химических составов свидетельствует большая толщина (800...900 мкм) зоны воздействия ГХО на стальной материал, в котором структура приобретает размытый серый цвет (рис. 6). На глубине до 200 мкм по границам зерен осаждаются отдельные дисперсные частицы. По-видимому, эти частицы образовались в результате коагуляции разряженных мицелл на базе оксидов и ПАВ, которые проникли в сталь по границам зерен в условиях значительного химического градиента и циклической парожидкой трансформации пересыщенного водного раствора. Покрытие на рис. 6 практически не различимо, поскольку его толщина (не более 200 нм) меньше разрешающей способности оптического микроскопа.

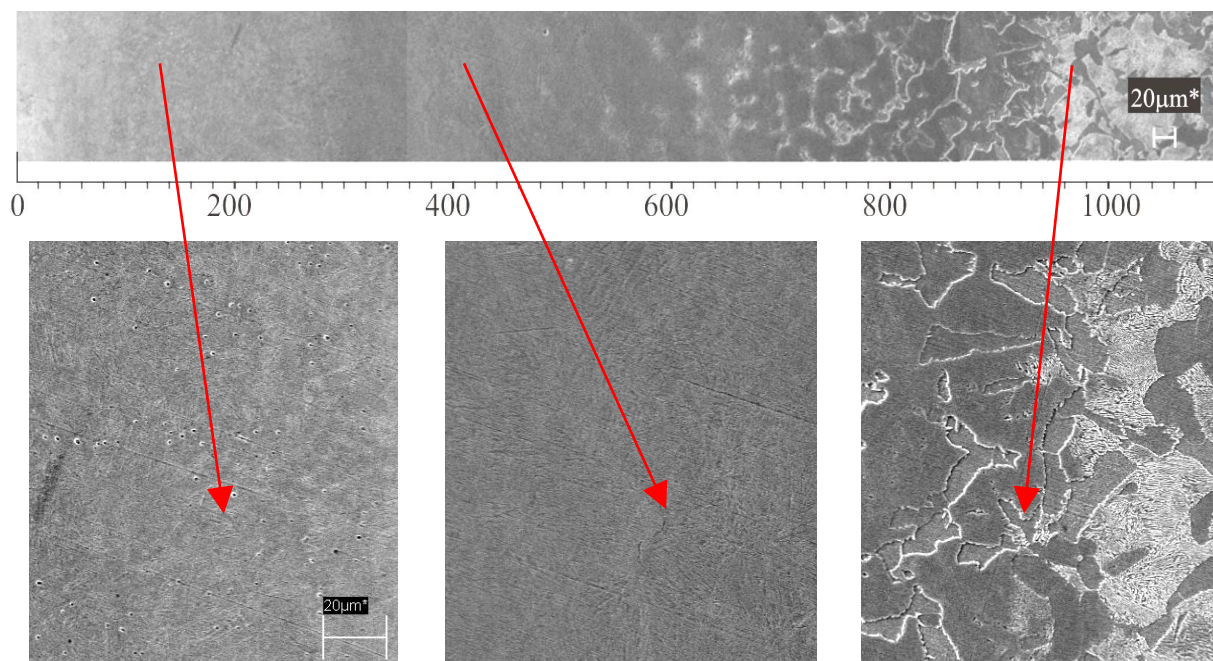


Рис. 6. Панорамная микроструктура поперечного среза стали У8, оптимально упрочненной ТГХО в оксидной Ti–Mo суспензии (слева – поверхность, справа – сердцевина)

Напряженное состояние. Рентгеноструктурные исследования (табл. 2) показали, что в результате ТГХО в поверхностной зоне модифицированной стали У8 (HRC 60) создаются остаточные сжимающие макронапряжения (1-го рода), наличие которых установлено по смещению линий на рентгенограммах. Величина макронапряжений сжатия возрастает в 1,7 раза по сравнению с необработанной сталью и сравнима с уровнем напряжений, специально создаваемых методами пластической деформации (ППД, МППД и др.) [16; 17]. При ППД путем холодной пластической деформации увеличивается плотность дислокаций до $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [18; 19], в то время как при ТГХО по сравнению с исходным состоянием число дислокаций существенно не меняется (табл. 2).

Таблица 2

Результаты рентгеновской съемки стали У8

Режим обработки стали	Фаза (линия)	$2\theta_{\perp}$, град	$2\theta_0$, град	d_{\perp} , нм	d_0 , нм	σ , МПа	Плотность дислокаций, $10^9, \text{ см}^{-2}$
ТО	$\alpha\text{-Fe}$ (220)	98,889	98,945	1,01379	1,0134	-270	2,77943
ТГХО	[06-0696]	98,865	98,945	1,01408	1,0134	-470	2,77711

Микронапряжения (2-го рода) в ТГХ упрочненной стали выявлены не были, поскольку на рентгенограммах отсутствовало уширение интерференционных линий. Не отмечено также статических искажений решетки, так как после ТГХО стали остается неизменным (не уменьшается) отношение интенсивностей интерференционных линий и фона ($I_{\text{нкл}}/I_{\text{фон}}$) [12; 13]. Рентгенографическим анализом не обнаружен также фазовый состав полученных покрытий, имеющих наноструктуру, которая справедливо считается рентгеноаморфной [20; 21]. Если внутренние растягивающие напряжения способствуют самопроизвольному зарождению и распространению трещин, развитию коррозионно-окислительных процессов (коррозии под напряжением, др.), то зональные сжимающие напряжения благоприятно уравнивают разрушающие напряжения, возникающие при эксплуатации инструментов и деталей машин, увеличивают их выносливость и живучесть. Формирование высоких напряжений сжатия с помощью ТГХО положительно сказывается на работоспособности стальных инструментов и деталей, поскольку позволяет: 1) компенсировать растягивающие напряжения в поверхностном слое, которые возникают при работе изделий, особенно инструментов; 2) релаксировать растягивающие напряжения, возникшие при механической, термической или другой обработке в процессе изготовления стальных изделий и инструментов.

Рассматривая вопрос улучшения износостойкости сталей в результате их гидрохимической обработки с позиции современных теорий трения и износа, можно найти объяснение в реализации эффекта Ребиндера, когда снижается коэффициент трения [9]. Эффект Ребиндера носит адгезионный характер взаимодействия поверхности любых твердых тел с поверхностно-активными веществами. В нашем случае присут-

ствии ПАВ в насыщающей среде позволяет интенсифицировать процесс поверхностного диспергирования стали, образуя устойчивую дисперсную систему на основе мицелл, которые на начальной стадии износа способны направленно двигаться в зону контакта и снижать силы адгезии [6 – 8]. В результате по принципу диффузионно-вакансионного механизма происходит скольжение внутри покрытия, но с малыми затратами энергии. Такое свободное перемещение слоев покрытия в процессе изнашивания обеспечивает ему самосмазывающий эффект.

Применение результатов исследований. Предлагаемая термогидрохимическая обработка сталей благодаря простоте технологии и хорошим антифрикционным свойствам модифицированной поверхности в случае отсутствия смазки и особенно перегрева находит широкое применение в технике для увеличения ресурса работы интенсивно эксплуатируемых инструментов и деталей машин. Результаты производственных испытаний свидетельствуют о том, что ТГХО с использованием разработанных вододисперсных оксидных составов позволяет увеличить износостойкость различных видов стальных инструментов и деталей машин в 1,3...4,5 раз по сравнению со стандартно термообработанными (табл. 3). Причем наивысшие показатели износостойкости инструментов достигнуты при обработке труднообрабатываемых жаропрочных, нержавеющей и цветных сплавов.

Таблица 3

Результаты испытаний изделий и инструментов, подвергнутых ТГХО

Вид инструмента	Материал инструмента	Место испытаний (название компании)	Повышение стойкости, К _w
Метчики	Быстрорежущие стали	«VUNZ» (Чехия); «Daewoo» (Корея); «САЛЮТ», «УМПО», «ПМЗ» (Россия); «БелАЗ», «МТЗ», «Мотовело»	2...4,1
Ленточные пилы	То же	«VUNZ» (Чехия)	2,5...3
Сверла	"_"	«PS» (Словакия); «VUNZ» (Чехия); «Дукс» (Россия), «Мотовело», «БелАЗ»	1,8.. 2,9
Зенкера	"_"	«САЛЮТ», «Искра», ВТЗ (Россия)	1,8...3
Развертки	"_"	«Мотовело», «БАТЭ», «АГУ»	1,5...2,7
Протяжка	"_"	«Мотовело», «АГУ»	2 ... 2,5
Резцы	"_"	«Мотовело», «БелАЗ»	1,3... 1,9
Долбяки	"_"	«Мотовело»	1,6...2,1
Фрезы	"_"	«Мотовело», «БелАЗ», «МТЗ»	2...4,5
Ножи для обработки стекловолокна	"_"	«Skloplast» (Словакия)	1,9...2,2
Штампы холодного деформирования	Штамповые стали	«ZVL-LSA» (Словакия), «БелАЗ»	1,8...2,5
Втулки для автосамосвала «БелАЗ»	Конструкционные стали	«БелАЗ»	1,5...2

Процесс термогидрохимической обработки внедрен в Беларуси на предприятиях «МТЗ», «БелАЗ», «Мотовело» и др.

Выводы:

1) процесс термогидрохимической обработки имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности стали осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие, а в подслое создается модифицированная зона с высокими напряжениями сжатия, сравнимыми с уровнем напряжений, создаваемых методами поверхностной пластической деформации;

2) сравнительные трибологические испытания поверхности стали У8, подвергнутой гидрохимической обработке, показали, что увеличение числа компонентов из тугоплавких антифрикционных материалов в составе вододисперсной насыщающей среды ведет к снижению коэффициента трения осажденных твердосмазочных покрытий;

3) в результате оптимизации процесса термогидрохимической обработки стали У8 коэффициент трения ее поверхности при сухом трении скольжения подвижного шарика из стали ШХ 15 снизился в 8,3 раза по сравнению с исходным состоянием. Разработанные покрытия, в отличие от других твердосмазочных покрытий, не требуют приработки, минимальные значения коэффициента трения на протяжении всего времени эксплуатации остаются на одном уровне. Отмечена высокая термическая стабильность нанокompозитных структур полученных покрытий, которые даже после нагрева до 1050 °С сохраняют при отсутствии смазки низкий коэффициент трения $f = 0,09$;

4) разработан простой способ термогидрохимической обработки, использование которого позволяет повысить стойкость различных видов стальных инструментов и деталей машин в 1,3...4,5 раза по сравнению со стандартно термообработанными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ упрочнения инструмента из быстрорежущей стали: пат. 2023027 РФ, МПК5 C21D 9/22 / А.А. Шматов, Л.Г. Ворошнин. – № 5000073; заявл. 30.07.91; опубл. 15.11.94 // Бюл. № 21. – 1994.
2. Шматов, А.А. Комбинированное объемно-поверхностное упрочнение стального режущего инструмента / А.А. Шматов // Вестн. Брест. гос. тех. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2008. – № 4. – С. 16 – 21.
3. Шматов, А.А. Нанотехнология низкотемпературного термохимического упрочнения готового к эксплуатации инструмента / А.А. Шматов // Наноструктурные материалы: получение, свойства, применение: сб. науч. тр. – Минск, 2009. – С. 221 – 230.
4. Компьютерное проектирование процесса ТГХО для формирования твердосмазочных покрытий на инструментальной стали У8 / А.А. Шматов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 2. – С. 139 – 146.
5. Шматов, А.А. Твердосмазочные тугоплавкие покрытия, полученные на сталях методом термогидрохимической обработки / А.А. Шматов, Г.К. Жавнерко // Порошковая металлургия. – 2011. – № 34. – С. 244 – 253.
6. Гаркунов, Д.Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник. – М.: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с.
7. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
8. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
9. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – 135 с.
10. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под ред. В.С. Чередниченко. – М.: Омега-Л, 2008. – 752 с.
11. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. наука, 2007. – 170 с.
12. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
13. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М.: Металлургия, 1970. – 107 с.
14. Бельский, С.Е. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента / С.Е. Бельский, Р.Л. Тофпенец. – Минск: Наука и техника, 1984. – 128 с.
15. Суздаев, И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздаев. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
16. Научные основы повышения малоциклового прочностного ресурса / Н.А. Махутов [и др.]; под ред. Н.А. Махутова. – М.: Наука, 2006. – 623 с.
17. Бойцов, В.Б. Технологические методы повышения прочностного ресурса и долговечности: учеб. пособие / В.Б. Бойцов, А.О. Чернявский. – М.: Машиностроение, 2005. – 128 с.
18. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов, Ф.А. Гарифуллин. – М.: Изд-во Оникс, 2007. – 624 с.
19. Материаловедение: учебник для втузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 648 с.
20. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2009. – 416 с.
21. Наноструктурные материалы-2008. (НАНО-2008): материалы первой междунар. науч. конф. – Минск: Беларус. наука, 2008. – 765 с.

Поступила 19.01.2012

MODIFICATION OF STEEL IN AN AQUEOUS DISPERSED MEDIA

A. SHMATOV

The structure and properties of steel surface, subjected to thermo-hydrochemical treatment in an aqueous suspension of nano-sized oxides $TiO_2 + MoO_3$, are examined in the paper. The process involves: 1) the chemical treatment in an special aqueous nano-sized suspension and 2) subsequent heat treatment. Optimization of the thermo-hydrochemical process was performed. Treatment with optimal regime permits decreasing the friction coefficient of the steel surface in 8,3 as compared with untreated. Developed technology permit increasing the wear resistance of tools and parts by the factor of 1,3...4,5 in comparison with traditional its.