

УДК 621.793

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МОРФОЛОГИЮ И ШЕРОХОВАТОСТЬ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

канд. техн. наук А.А. ШМАТОВ, канд. техн. наук Ю.В. СИНЬКЕВИЧ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Исследованы морфология и шероховатость стальной поверхности, подвергнутой термогидрохимической обработке (ТГХО) в вододисперсной среде на основе оксидов $TiO_2 + MoO_3$. Процесс ТГХО включает: гидрохимическую обработку поверхности в специальной вододисперсной среде; термообработку. После гидрохимической обработки в течение 10 – 120 минут и последующего нагрева до 250 °С шероховатость полученных покрытий остается в пределах одного класса. В результате оптимизации процесса ТГХО коэффициент трения стальной поверхности снизился в 8,3 раза.

Введение. Шероховатость является важным показателем качества поверхности изделий; от шероховатости и состояния поверхности зависят показатели долговечности, живучести и надежности стальных деталей машин и инструментов [1]. Большим недостатком известных защитных покрытий, полученных наплавкой, напылением, газовой цементацией и нитроцементацией, детонационным, лазерным, плазменным и другими методами, является высокая шероховатость поверхности и отсутствие товарного качества покрытий [2]. Для исправления этого недостатка приходится проводить дополнительную операцию финишной обработки поверхности изделий. В этом плане наибольший научный и практический интерес представляет упрочняющая термогидрохимическая обработка (ТГХО) стали в вододисперсной среде, поскольку процесс применим для готовых к эксплуатации изделий, незначительно меняет первоначальную шероховатость поверхности, их размеры, форму и структуру [3 – 8].

Термогидрохимическая обработка – наиболее простой и универсальный метод. С помощью этого метода можно создавать износостойкие наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, других антифрикционных материалов и их композиций.

Согласно настоящим представлениям в области трения и изнашивания [9 – 11], 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 повышения износостойкости изделия можно достичь при выполнении двух основных условий: при высокой твердости поверхности (покрытия) и низкой ее прочности адгезионной связи с контактирующим материалом в зоне трения.

Именно покрытия на основе тугоплавких и сверхтвердых материалов, сформированные методом ТГХО, имеют наноструктуру и обладают твердосмазочными свойствами [3 – 8]. Наноструктурированные материалы и покрытия, имеющие высокое качество поверхности, облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения; в то же время твердость наноматериалов из металлов или тугоплавких соединений возрастает в 2 – 3 раза [1; 12; 13]. 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. Поэтому процесс ТГХО имеет большие перспективы для своего развития, прежде всего для инструментов и деталей машин, имеющих малый ресурс работы. Производственные испытания показали, что ТГХО позволяет увеличить эксплуатационную стойкость различных видов стальных инструментов (метчиков, сверл, зенкеров, разверток, фрез, протяжек, ленточных пил, ножей, долбяков, штампов холодного деформирования) и деталей для автосамосвала «БелАЗ» в 1,3...4,5 раз по сравнению со стандартно термообработанными [7; 8]. Однако вопросы, связанные с морфологией и шероховатостью поверхности практически всех инструментальных и конструкционных сталей, подвергнутых ТГХО, мало изучены.

В настоящей работе поставлены задачи: 1) изучить и оптимизировать по триботехническим свойствам покрытия, полученные при ТГХО стали; 2) изучить морфологическую структуру и шероховатость оптимизированных покрытий на стали; 3) сравнить результаты триботехнических исследований и изучения морфологии и шероховатости стальной поверхности, подвергнутой ТГХО.

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: путем а) гидрохимической обработки (ГХО) поверхности стали при температуре 95...100 °С в течение 40...120 минут в специально приготовленном вододисперсном составе на базе наноразмерных порошков оксидов титана и молибдена; б) последующей термической обработки (ТО), включающей нагрев до температуры 130...1050 °С, выдержку в течение 30...60 минут в окислительной или защитной среде и охлаждение. Насыщающую вододисперсную среду предварительно готовили по специальной технологии диспергирования до наноразмеров грубодисперсных частиц (с гранулометрическим составом до 5 мкм) смеси оксидов $TiO_2 + MoO_3$ путем введения 5 %-ного водорастворимого органического ПАВа (сульфанола). Готовым считался рабочий состав с кислотностью РН 6...8, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH_4OH . При проведении гидрохимической 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...10 % растворе серной кислоты в течение 1...2 минут. После каждой операции подготовки и гидрохимической 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 B_2O_3 .

Определение триботехнических свойств стальной поверхности осуществляли на микротрибометре возвратно-поступательного типа (ИММС, 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) [6 – 8].

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.

Шероховатость термогидрохимически обработанной поверхности стали определяли с помощью профилографа-профилометра «Perfometer M2» (Mahr, Германия) (рис. 1). Исследования тонкой структуры, морфологии и шероховатости поверхности проводили на атомно-силовом микроскопе типа «Nanoscope 3D» (Veeco, USA) с использованием кантилевера (иглы) из TiN (рис. 2).

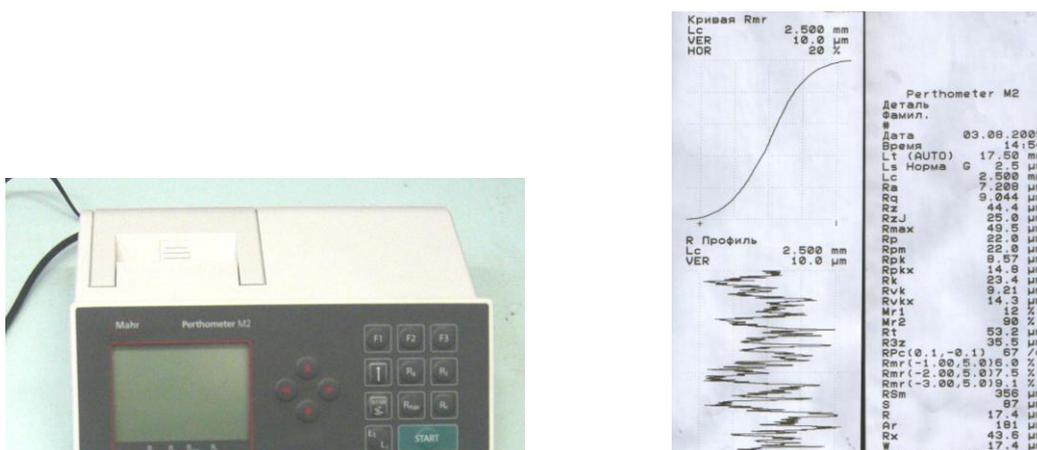
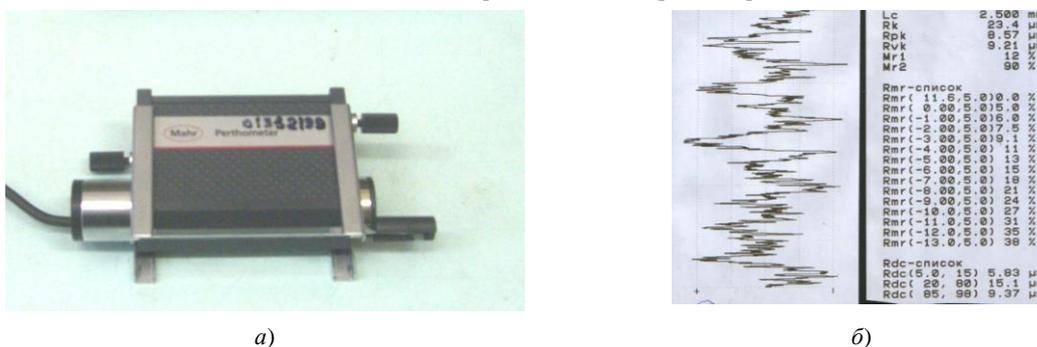


Рис. 1. Атомно-силовой микроскоп «Nanoscope 3D» производства США



а)

б)

Рис. 1. Профилограф-профилометр «Perthometer M2» производства Германии (а) и диаграммные ленты показателей каждого замера (б)



Рис. 2. Атомно-силовой микроскоп «Nanoscope 3D» производства США

Результаты исследований

Процесс термогидрохимической обработки имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности стали осаждается твердосмазочное тугоплавкое покрытие малой толщины (200 – 500 нм), а в подслое создается модифицированная зона с высокими напряжениями сжатия [7; 8].

Триботехнические исследования. Полученные твердосмазочные покрытия благодаря формированию нанокристаллической структуры обладают сверхпластичными свойствами [10; 11; 13]. Результаты предварительных трибологических испытаний поверхности стали У8, подвергнутой гидрохимической обработке в вододисперсной среде из тугоплавких антифрикционных материалов, показали, что в условиях сухого трения скольжения и воздушной атмосферы: а) твердосмазочные гидрохимические (ГХ) покрытия на основе наноксидов имеют лучшие антифрикционные свойства, чем ГХ покрытия на базе нанокарбидов, нанонитридов и наноуглеродных материалов; б) увеличение числа компонентов из тугоплавких антифрикционных материалов в составе вододисперсной насыщающей среды ведет к снижению коэффициента трения осажденных покрытий [7; 8]. Процесс ТГХО может стать наиболее простым способом целенаправленного повышения износостойкости готовых изделий, и изначально важно сформировать на поверхности сталей многокомпонентные оксидосодержащие покрытия.

На основании оптимизации и компьютерного проектирования процесса ТГХО стали У8 с помощью синтез-технологий определены технически оптимальные режимы и многокомпонентные составы вододисперсных наноксидных сред [6]. Обработка стали У8 по оптимальному режиму (ХО, 1 ч в составе на основе $TiO_2 + MoO_3$, затем ТО при 200 °С, 0,5 ч) позволила существенно (в 8,3 раза) снизить коэффициент трения стальной поверхности при сухом трении скольжения по ней подвижного шарика из стали ШХ 15, по сравнению с исходным состоянием (рис. 3).

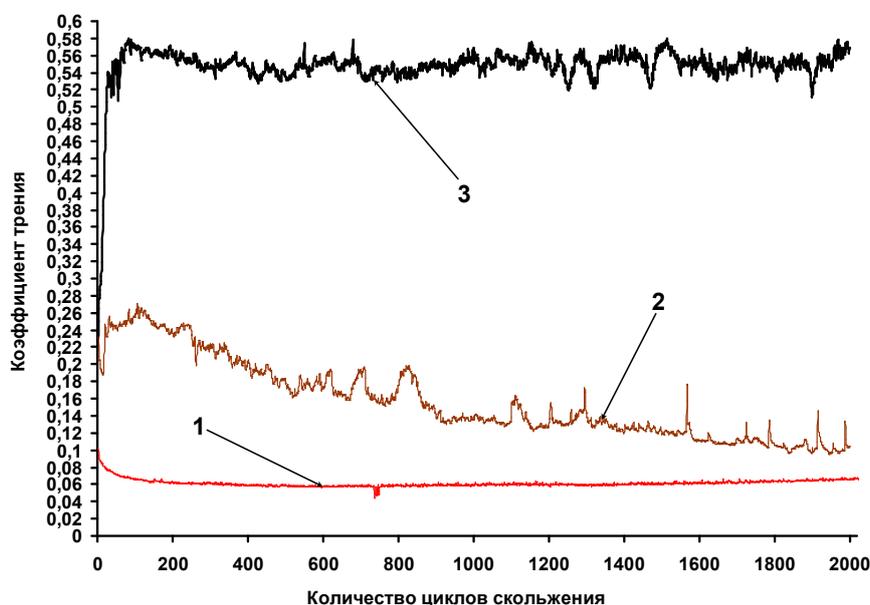


Рис. 3. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания (без смазки) поверхности стали У8 до и после ТГХО [6].

Вид обработки: 1 – сталь У8 после ТГХО в оптимальном режиме; 2 – сталь У8 с алмазоподобным PVD покрытием; 3 – исходная сталь У8 (без обработки)

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 (ТГХ) покрытия. Они имеют преимущества перед PVD алмазным покрытием (см. рис. 3) и другими твердосмазочными покрытиями [13], у которых сначала коэффициент трения высокий, а затем он медленно снижается по мере приработки покрытий с контртелом, причем с большой амплитудой колебаний.

Исследования морфологии и шероховатости поверхности на атомно-силовом микроскопе. С помощью АСМ «Nanoscope 3D» (Veeco, USA) изучено влияние времени выдержки при химической обработке и температуры последующего нагрева на шероховатость R_{ms} (табл. 1) и морфологию стальной поверхности (рис. 4), которые определены при ее съемке с площади $100 \times 100 \text{ мкм}^2$.

Таблица 1

Влияние параметров ТГХО на шероховатость покрытий на стали У8

Время химического осаждения покрытий, мин		10		30		60		120			
Шероховатость R_{ms} , нм		31		41		52		63			
Температура нагрева покрытия, °С	100	150	250	300	400	500	600	700	800	870	1000
Шероховатость R_{ms} , нм	63	84	47	95	166	259	116	82	219	100	300

Полученные данные (см. табл. 1) свидетельствуют о том, что после гидрохимической обработки в течение 10...120 минут и последующего нагрева до 250 °С шероховатость ТГХ покрытий остается в пределах одного класса (ГОСТ 2789-73). Максимальное увеличение шероховатости наблюдается после термообработки при 500, 800 и 1000 °С, что может быть связано со структурными и фазовыми изменениями, которые не удалось зафиксировать методом фазового рентгеновского анализа, поскольку разработанные наноструктурированные покрытия являются рентгеноаморфными.

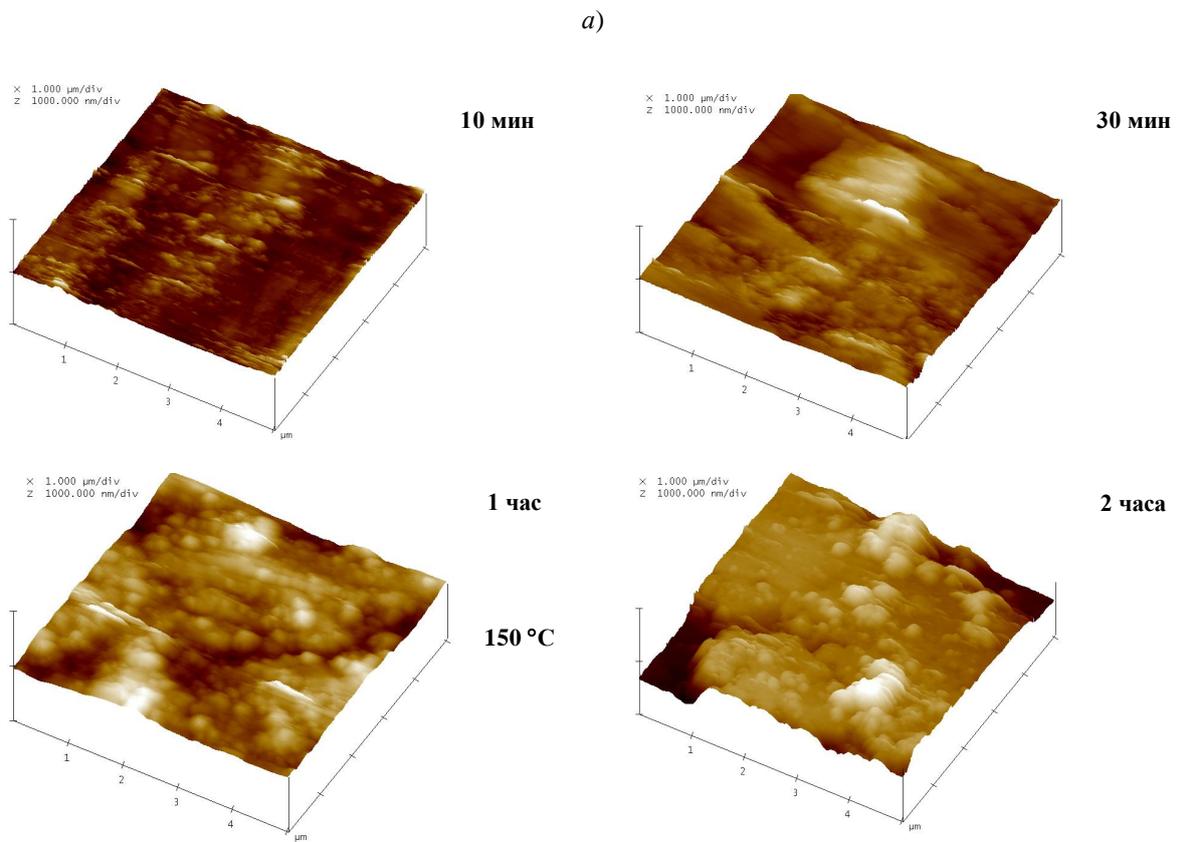
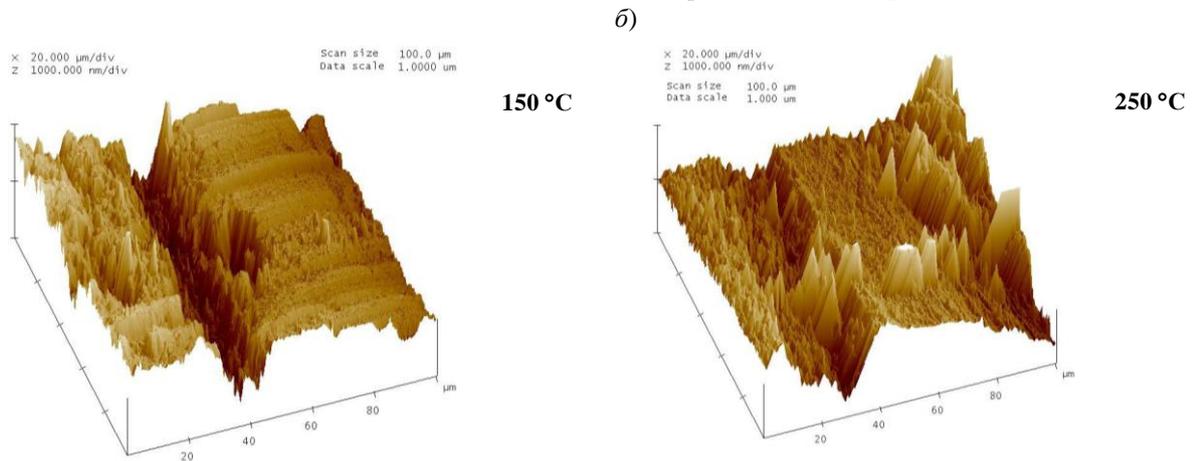


Рис. 4. Изменение морфологии поверхности стали У8 от времени гидрохимической обработки (а).

Режим ГХО: $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; состав водной среды на основе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$



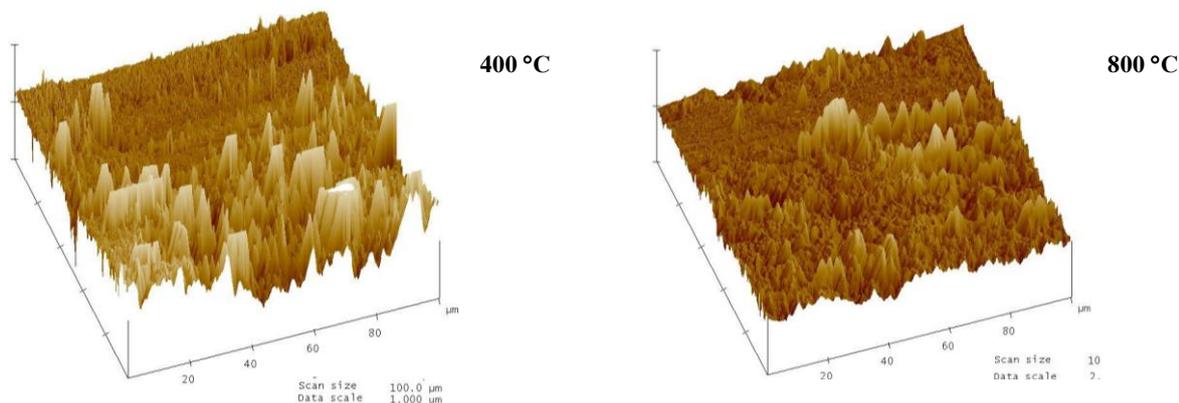


Рис. 4 – Окончание. Изменение морфологии поверхности стали У8 от температуры последующего нагрева (б)

Исследование шероховатости поверхности на профилографе-профилометре. С помощью прибора «Perfometer M2» изучено влияние исходной шероховатости подложки и продолжительности ГХО на шероховатость (параметр Ra) полученного покрытия (табл. 2; рис. 5).

Результаты исследований (см. рис. 4) говорят о том, что гидрохимические покрытия имеют лучшую антифрикционную морфологию поверхности, чем термогидрохимические покрытия, поскольку при ГХО стали формируется структура поверхности с округлой формой выступов и впадин, а при ТГХО структура поверхности меняется и представляет собой пикообразные выступы и впадины, частота и высота которых возрастает с повышением температуры нагрева. В этом плане оптимальной температурой термообработки гидрохимических покрытий является температура 200 °С.

Таблица 2

Шероховатость поверхности стали У8 с покрытием в зависимости от качества исходной поверхности и времени ГХО

№ образца	Шероховатость поверхности				
	до обработки	после 1 ч ГХО	после 2 ч ГХО	после 4 ч ГХО	после 6 ч ГХО
	Ra, мкм	Ra, мкм	Ra, мкм	Ra, мкм	Ra, мкм
1	0,043	0,212	0,399	0,674	0,911
2	0,289	0,316	0,323	0,648	0,942
3	0,501	0,503	0,540	0,793	0,982
4	2,221	2,185	2,113	2,183	1,977
5	2,675	2,569	2,369	2,199	1,938
6	5,424	5,733	5,575	5,448	5,035
7	7,208	7,523	6,675	7,656	7,341

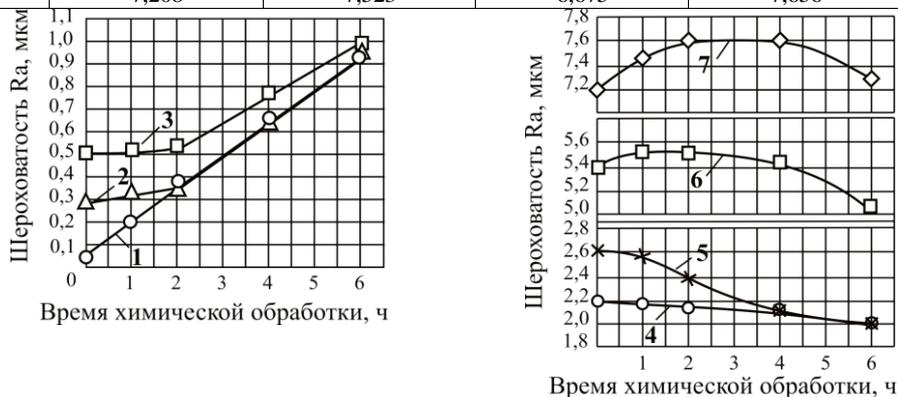


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности стали У8 с покрытием от времени ГХО и качества исходной поверхности: 1 – 7 – номер образца (см. табл. 2)

Полученные данные свидетельствуют о том, что после одночасовой ГХО стали У8 (HRC 60) шероховатость шлифованной поверхности с $Ra_{\text{исх}} = 0,289 \dots 7,208$ мкм изменяется незначительно (кривые 2 – 7), а шероховатость полированной поверхности с $Ra_{\text{исх}} = 0,043$ мкм повышается. При увеличении длительности процесса ГХО от 2 до 6 часов шероховатость полированной до $Ra_{\text{исх}} = 0,043$ мкм и шлифованной до $Ra_{\text{исх}} = 0,043; 0,289$ и $0,501$ мкм поверхностей дополнительно повышается (кривые 1 – 3). Шероховатость грубо шлифованных поверхностей с $Ra_{\text{исх}} = 2,2 \dots 7,2$ мкм, как правило, остается на прежнем уровне (кривые 4 – 7). Поэтому одночасовая выдержка при ГХО стали У8 является предпочтительной, поскольку исходная шероховатость хорошо и грубо шлифованных поверхностей не изменяется, а шероховатость полированной поверхности ухудшается незначительно.

На основании сравнения результатов триботехнических исследований и изучения морфологии и шероховатости стальной поверхности, подвергнутой ТГХО, можно сделать вывод о том, что высокое качество поверхности и максимальное снижение коэффициента трения полученных покрытий достигается при выполнении оптимального режима ТГХО стали У8: при одночасовой продолжительности ГХО в вододисперсной среде на основе $TiO_2 + MoO_3$ и последующей изотермической выдержке при температуре $200\text{ }^\circ\text{C}$.

Выводы:

1) в результате оптимизации процесса термогидрохимической обработки стали У8 коэффициент трения стальной поверхности при сухом трении скольжения по ней 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, и минимальные значения коэффициента трения на протяжении всего времени эксплуатации остаются на одном уровне;

2) при гидрохимической обработке стали формируется структура поверхности, состоящая из выступов и впадин округлой формы, а при термогидрохимической обработке морфология поверхности меняется и представляет пикообразные выступы и впадины, частота и высота которых возрастают с повышением температуры нагрева;

3) после гидрохимической обработки в течение $10 \dots 120$ минут и последующего нагрева до $250\text{ }^\circ\text{C}$ шероховатость полученных покрытий остается в пределах одного класса;

4) на основании сравнения триботехнических исследований и изучения морфологии и шероховатости поверхности установлено, что высокое качество поверхности и максимальное снижение коэффициента трения покрытий достигается при выполнении оптимального режима ТГХО стали У8: при одночасовой продолжительности ГХО в вододисперсной среде на основе $TiO_2 + MoO_3$ и последующей изотермической выдержке при температуре $200\text{ }^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 648 с.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 1998. – 583 с.
3. 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. изобретений. – 1994. – № 21.
4. Шматов, А.А. Комбинированное объемно-поверхностное упрочнение стального режущего инструмента / А.А. Шматов // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2008. – № 4. – С. 16 – 21.
5. 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.
6. 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. – 2010. – № 2. – С. 139 – 146.

7. 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.
8. Шматов, А.А. Модифицирование стали в вододисперсной среде / А.А. Шматов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – С. 82 – 89.
9. Гаркунов, Д.Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник. – М.: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с.
10. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
11. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
12. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под ред. В. С. Чередниченко. – М.: Омега-Л, 2008. – 752 с.
13. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 170 с.
14. Бельский, С.Е. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента / С.Е. Бельский, Р.Л. Тофпенец. – Минск: Наука и техника, 1984. – 128 с.

Поступила 30.10.2012

INFLUENCE OF THERMO-HYDROCHEMICAL TREATMENT ON MORPHOLOGY ROUGHNESS OF STEEL SURFACE

A. SHMATOV, J. SINKEVICH

The morphology and roughness 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 hydrochemical treatment in a special aqueous nano-sized suspension and (2) subsequent heat treatment. After hydrochemical treatment for 10 – 120 minutes and then heated to 250 °C the roughness of the obtained coatings is the same class. Treatment with optimal regime permits decreasing the friction coefficient of the steel surface in 8,3 as compared with untreated.