

## ТЕРМОГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

1) *Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

2) *Институт химии новых материалов НАН Беларуси*

*В работе исследованы структура и свойства поверхности стали У8, подвергнутой термогидрохимической обработке (ТГХО). Процесс ТГХО включает: (1) химическую обработку поверхности в оксидной вододисперсной среде; (2) термообработку. В результате оптимизации процесса ТГХО коэффициент трения стальной поверхности снизился в 8,3 раза. Разработанная технология повышает стойкость стальных инструментов в 1,3 – 4,5 раза, по сравнению с традиционно термообработанными*

**Введение.** Проблема повышения износостойкости стальных инструментов, по-прежнему, остается актуальной. Решить ее можно путем поверхностного упрочнения инструментальных сталей с помощью различных методов обработки. Наибольший научный и практический интерес в этом плане представляет процесс термогидрохимической обработки (ТГХО), поскольку применим для готовых к эксплуатации стальных инструментов, не изменяет их первоначальные размеры, форму и структуру [1 – 4].

Согласно настоящим представлениям в области трения и изнашивания [5 – 7] 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, Киркиндала и др.); причем эффект Ребиндера реализуется в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ) [7, 8]. Согласно молекулярно-механической теории трения повышение износостойкости инструмента можно достичь при выполнении двух основных условий: при высокой твердости поверхности инструмента и низкой прочности его адгезионной связи с обрабатываемым материалом [6, 7].

В результате поверхностного легирования стали можно сформировать наноструктуру на основе тугоплавких и сверхтвердых материалов [1 – 4, 9]. Наноструктурированные материалы и покрытия облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения; в тоже время твердость наноматериалов из тугоплавких соединений возрастает 2 – 3 раза [10]. Именно покрытия, сформированные методом термогидрохимической обработки, имеют наноструктуру и обладают твердосмазочными свойствами (сверхпластичностью). [1 – 4]. В условиях интенсивной эксплуатации инструментов, когда в зоне трения отсутствует смазка или ее подача ограничена, наилучшим способом снижения коэффициента трения является нанесение твердосмазочных покрытий на режущую кромку инструмента. ТГХО является наиболее простым и универсальным методом. С его помощью можно создавать наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, других антифрикционных материалов и их композиций [1 – 4].

Из приведенного анализа следует, что процесс ТГХО имеет большие перспективы для своего развития, прежде всего для высокопроизводительных инструментов, испытывающих значительные механические и температурные нагрузки. Однако вопросы, связанные с ТГХО практически всех инструментальных материалов мало изучены.

В настоящей работе поставлены задачи: 1) сравнить триботехнические свойства стальной поверхности, подвергнутой ТГХО в вододисперсных оксидных средах; 2) оптимизировать процесс ТГХО инструментальной стали; 3) изучить структуру и напряженное состояние поверхностных слоев инструментальной стали, подвергнутой ТГХО; 4) 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.. Этот

процесс осуществляли в 2 этапа путем: (а) гидрохимической обработки (ГХО) поверхности при температуре 95 – 100 °С в течение 40 – 120 минут в вододисперсной среде на базе наноразмерных порошков оксидов; (б) последующей термической обработки (ТО), включающей нагрев до температуры 130 – 1050°С, выдержку в течение 30 – 60 минут и охлаждение. Вододисперсную среду предварительно готовили по специальной технологии диспергирования грубодисперсных частиц оксидов (размером не более 5 мкм) до наноуровня при добавлении 5% водорастворимого поверхностно-активного вещества (сульфанола). Готовым считался рабочий состав с кислотностью РН 6 – 8, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH<sub>4</sub>OH. При проведении химической обработки образцы выдерживали в ванне с готовым составом водной насыщающей среды, нагретой до температуры процесса. 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<sub>2</sub> или плавкого затвора В<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

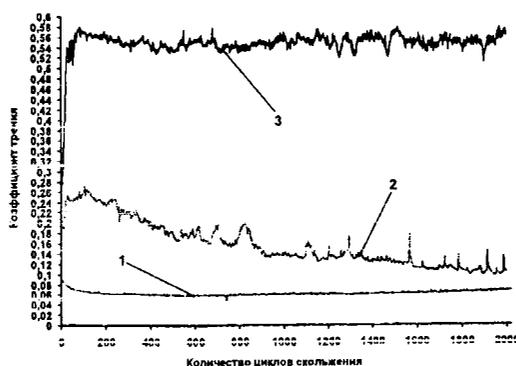
Для изучения структуры стали, подвергнутой ТГХО, применяли микроструктурный, рентгеноструктурный и другие анализы. Тонкую структуру покрытий исследовали на атомно-силовом микроскопе «Nanoscope 3D» (Veeco, USA). Определение триботехнических свойств поверхности осуществляли на микротрибометре возвратно-поступательного типа (ИММС, г. Гомель) по схеме «подвижный шарик – неподвижная плоскость» при условиях испытаний: нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм, скорость 4 мм/с; пара трения: упрочненный сплав (плоскость) – сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм) [4]. 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 ТГХО имеет двойственный характер упрочнения: (1) на поверхности стали осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие, (2) в подслое формируется модифицированная зона с полем высоких напряжений сжатия.

Оптимально полученные покрытия на сталях имеют малую толщину (200 – 500 нм). Это ограничивает число методов, с помощью которых можно изучить свойства термогидрохимических (ТГХ) покрытий. Для твердосмазочных покрытий широко применяют методы исследования триботехнических характеристик, определяющей из которых является коэффициент трения [6, 7, 9].

**Триботехнические исследования.** Полученные твердосмазочные покрытия, благодаря формированию нанокристаллической структуры, обладают сверхпластичными свойствами. На основании оптимизации и компьютерного проектирования процесса ТГХО стали У8 с помощью синтез – технологий определены технически – оптимальные режимы и составы вододисперсных нанооксидных сред [4]. Обработка стали У8 по оптимальному режиму (ХО, 1 ч. в составе TiO<sub>2</sub>+MoO<sub>3</sub>, 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. 1.).

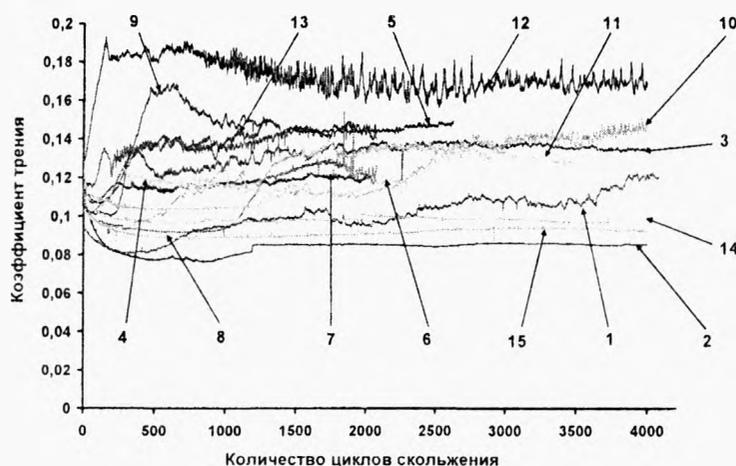
Для инструмента, у которого место контакта с обрабатываемой деталью меняется со временем [11], важно на протяжении всего периода эксплуатации иметь не только минимальные, но неизменные значения коэффициента трения. Таким требованиям отвечают ТГХ покрытия (рис. 2.); и в этом они имеют преимущества перед перед PVD алмазным покрытием (рис. 1.) и другими известными твердосмазочными покрытиями [9].



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

Рис. 1. – Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания (без смазки) поверхности стали У8 до и после ТГХО

В результате оптимизации процесса ТГХО выявлена важная эксплуатационная особенность разработанных покрытий. ТГХ оксидные покрытия отличаются, от ныне известных наноструктурированных покрытий [9, 10], более высокой термической стабильностью: даже после нагрева до 1050 °С и выдержки в течение 0,5 ч. полученные покрытия сохраняют очень низкий коэффициент трения ( $f = 0,09$ ) (рис. 2.).



1 – 100°C; 2 – 200°C; 3 – 250°C; 4 – 300°C; 5 – 350°C; 6 – 400°C; 7 – 450°C; 8 – 500°C; 9 – 550°C; 10 – 600°C; 11 – 650°C; 12 – 700°C; 13 – 870°C; 14 – 1000°C; 15 – 1050°C;

Рис. 2. Влияние температуры термообработки при ТГХО стали У8 на коэффициент трения ее поверхности в условиях отсутствия смазки

Режим ХО:  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 2\text{ ч}$ . Состав водной среды на основе  $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$

**Структурные исследования.** Такие исследования в настоящей работе были проведены на стальных образцах, упрочненных ТГХО в оптимальных вододисперсных средах на основе оксидов  $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$ .

С помощью атомно-силового микроскопа «Nanoscope 3D» изучали морфологию и кинетику формирования наноструктурированных слоев сначала в результате гидрохимической обработки стали У8, а затем после нагрева до температур от 100 до 1050 °С. ТГХ покрытия на на стали У8 имеют сложную структуру поверхности, состоящую из неоднородных по цвету и форме зерен (рис. 3.). Все полученные покрытия формируются с нано- или нанокомпозитной структурой.

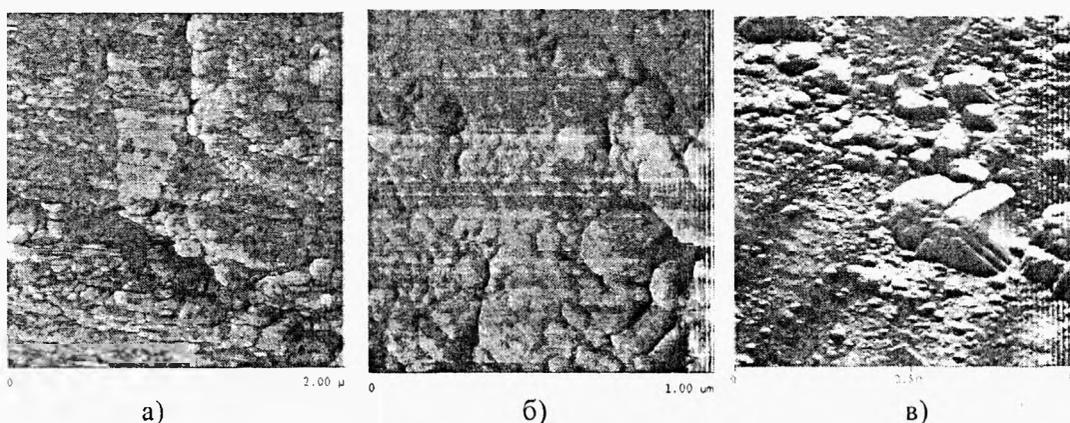


Рис. 3. – Структура поверхности стали У8 после ГХО в вододисперсной среде на основе  $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$  в течение 30 мин. (а), 1 ч. (б) и ТГХО при нагреве до 1000°C (в)

Первоначально 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)» [12]: на подложке формируются высокоорганизованные пленки с сильно развитой зернограничной поверхностью. Скорость роста гидрохимических слоев на стали составляет 200 – 250 нм/ч. При последующем нагреве стали У8 размер зерен в полученных ГХ покрытиях увеличивается с повышением температуры (табл. 1); при этом сначала преобладает наноразмерная структура слоев, а выше 500 °С формируется нанокompозитная структура, в которой появляются отдельные зерна (размером более 100 нм).

**Таблица 1. – Влияние параметров ТГХО стали У8 на размер зерен в покрытии**

Время химического осадения 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

Рентгеноструктурные исследования (табл. 2) показали, что после ТГХО стали У8 (HRC 60) формируются остаточные сжимающие напряжения 1-го рода. Все съемки выполнялись на дифрактометре ДРОН - 3.0 в режиме сканирования по точкам в монохроматизированном  $\text{CuK}\alpha$  излучении. Расчет макронапряжений в твердых сплавах осуществляли по методике [13]. Величина макронапряжений сжатия возрастает в 1,7 раза, по сравнению с необработанной сталью и сравнима с уровнем напряжений, создаваемых методами пластической деформации (ППД, МГПД.) [14, 15]. Если при ППД создается плотность дислокаций, равная  $10^{10} - 10^{12}$  на  $\text{см}^{-2}$  [16], то при ТГХО стали число дислокаций существенно не меняется, по сравнению с исходным состоянием (табл. 2).

**Таблица 2 – Результаты рентгеновской съемки стали У8**

Режим обработки и стали	Фаза(линии $2\theta_{\perp}$ , град	$2\theta_0$ , град	$d_{\perp}$ , нм	$d_0$ , нм	$\sigma$ , 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, не отмечено также статических искажений решетки [13]. Рентгеновским анализом не установлен фазовой состав ТГХ покрытий, поскольку их наноструктура считается рентгеноаморфной [12, 17].

Улучшение износостойкости инструментальной стали при ее гидрохимической обработке, можно объяснить реализацией эффекта Ребиндера, который носит адгезионный характер взаимодействия поверхности любых твердых тел с поверхностно-активными веществами [8]. В нашем случае присутствие ПАВ в насыщающей среде позволяет интенсифицировать процесс поверхностного диспергирования оксидов и стали, образуя устойчивую дисперсную систему на основе мицелл, которые на начальной стадии износа способны направленно двигаться в зону контакта и снижать силы адгезии [5-7]. 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.** В результате производственных испытаний установлено, что ТГХО с использованием вододисперсных оксидных составов позволяет увеличить износостойкость различных видов стальных инструментов в 1.3 – 4.5 раз, по сравнению со стандартно термообработанными (табл. 3). Процесс термогидрохимической обработки внедрен в Беларуси на предприятиях «МТЗ», «БелАЗ», «Мотовело» и др.

**Таблица 3 – Результаты испытаний изделий и инструментов, подвергнутых ТГХО**

Вид инструмента	Материал инструмент(название компании)	Место испытаний	Стойкость KW
метчики	б.р. стали	«VUNZ»(Чехия), «Daewoo»(Корея), «БелАЗ»	2 – 4.1
ленточные пилы	б.р. стали	«VUNZ»(Чехия)	2.5 – 3
сверла	б.р. стали	«PS»(Словакия), «VUNZ»(Чехия), «БелАЗ»	1.8 – 2.9
зенкера	б.р. стали	«САЛЮТ» (РФ), «Искра» (РФ), ВТЗ (РФ)	1.8 – 3
развертки	б.р. стали	«Мотовело», «БАТЭ», «АГУ»	1.5 – 2.7
протяжка	б.р. стали	«Мотовело», «АГУ»	2 – 2.5
резцы	б.р. стали	«Мотовело», «БелАЗ»	1.3 – 1.9
долбяки	б.р. стали	«Мотовело»	1.6 – 2.1
фрезы	б.р. стали	«Мотовело», «БелАЗ», «МТЗ»	2 – 4.5
ножи для обработки	б.р. стали	«Skloplast»(Словакия)	1.9 – 2.2
стекловолокна			
штампы	штамповые	«ZVL-LSA»(Словакия), «БелАЗ»	1.8 – 2.5
холодного деформирования	стали		

**Выводы.** Разработанный процесс термогидрохимической обработки имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности стали осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие, а в подслое создается зона высоких напряжений сжатия, сравнимых с уровнем напряжений, создаваемых методами поверхностной пластической деформации.

В результате оптимизации процесса термогидрохимической обработки коэффициент трения стальной поверхности 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. Отмечена высокая термическая стабильность нанокompозитных структур полученных покрытий, которые даже после нагрева до 1050 °С сохраняют очень низкий коэффициент трения ( $f = 0,09$ ) при отсутствии смазки.

Разработан простой способ термогидрохимической обработки, который позволяет повысить стойкость различных видов стальных инструментов в 1.3 – 4.5 раза выше, по сравнению со стандартно термообработанными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 2023027 (Российская Федерация) Шматов А. А., Ворошнин Л. Г. Способ упрочнения инструмента из быстрорежущей стали. Оpubл. 15.11.94. Бюл. 21, 1994.
2. Шматов А. А. Комбинированное объемно-поверхностное упрочнение стального режущего инструмента / А. А. Шматов // Вест. 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 // Сб. науч. тр. / Наноструктурные материалы: получение, свойства, применение.– Минск, 2009. – С. 221–230.
4. Шматов А. А.

Компьютерное проектирование процесса ТГХО для формирования твердосмазочных покрытий на инструментальной стали У8 / А. А. Шматов, О. В. Жилинский, С. И. Марочкина, Г. К. Жавнерко, А. Е. Соломянский // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. – 2010. – №2. – С. 139–146. 5. Гаркунов Д. Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д. Н. Гаркунов, П.И. Корник. – М.: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с. 6. Мышкин Н. К. Трение, смазка, износ/Н. К. Мышкин М. И. Петроковец.–М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с. 7. Польшер Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польшер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с. 8. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т.2 – 135 с. 9. Витязь П. А. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П. А. Витязь [и др.]. – Мн.: Бел. наука, 2007. – 170 с. 10. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под ред. В. С. Чередниченко. – М.: Омега-Л, 2008 – 752 с. 11. Бельский С. Е. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента / С. Е. Бельский, Р. Л. Тофпенец. – Минск: Наука и техника, 1984. – 128 с. 12. Суздальев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздальев. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с. 13. Горелик, С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ / С.С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М: Металлургия, 1970. – 107 с. 14. Научные основы повышения малоциклового прочност / Н. А. Махутов [и др.]; под ред. Н. А. Махутова. – М.: Наука, 2006. – 623 с. 15. Бойцов В. Б. Технологические методы повышения прочност и долговечности: учеб. пособие / В. Б. Бойцов, А. О. Чернявский. – М.: Машиностроение, 2005. – 128 с. 16. Материаловедение: учебник для втузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 648 с. 17. Наноструктурные материалы – 2008. (НАНО-2008): материалы Первой междунар. науч. конф. – Минск: Белорус. наука, 2008. – 765 с.

УДК 621.941.2

Куптель В.Г.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Разработана математическая модель механизма возникновения и поддержания в зоне резания направленных колебаний, учитывающая кинематическую схему обработки и конструктивные параметры инструмента и позволяющая в зависимости от заданных режимов резания прогнозировать и описывать траекторию движения режущей кромки инструмента. В результате выполненного компьютерного моделирования доказана возможность реализации траекторий движения режущей кромки инструмента, обеспечивающих переменное сечение срезаемого слоя при продольном наружном точении. Установлено, что для поддержания необходимой интенсивности вибраций при изменении осевой составляющей силы резания  $P_x$  от 350 Н до 650 Н жесткость упругих элементов  $j_x$  должна соответствовать диапазону 200–350 Н/мм.*

Для определения траекторий движения режущей кромки инструмента и выбора рациональных конструктивных и технологических параметров инструментов в зависимости от различных технологических условий обработки при черновом и полувальцовом продольном наружном точении целесообразно разработать математическую модель возникновения и поддержания в зоне резания направленных колебаний. С этой целью предложена схема точения с вибрациями в осевом направлении (рис. 1.), основанная на принципе возбуждения колебаний режущей кромки инструмента, посредством установки между резцом и корпусом державки упругого элемента, создающего в направлении движения подачи наименьшую регулируемую жесткость.