

## Сопrotивляемость изнашиванию стали, упрочненной термогидрохимической обработкой

*Исследованы антифрикционные свойства, структура и морфология износа стальной поверхности, подвергнутой термогидрохимической обработке (ТГХО). Процесс ТГХО включает: химическую обработку поверхности в оксидной вододисперсной среде и термообработку. В результате оптимизации ТГХО коэффициент трения стальной поверхности снизился в 8,3 раза. Разработанная технология повышает стойкость стальных инструментов и изделий в 1,3...4,5 раза, по сравнению с традиционными.*

**Ключевые слова:** сталь, изнашивание, упрочнение, твердосмазочное покрытие, инструмент.

*The antifriction properties, structure and wear morphology of steel surface, subjected to thermo-hydrochemical treatment, are examined in the paper. The process involves the chemical treatment in an oxide aqueous nano-sized suspension and 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 steel tools and parts by the factor of 1,3...4,5 in comparison with traditional its.*

**Keywords:** steel, wear, strengthening, solid-lubricant coating, tool.

### Введение

Проблема повышения износостойкости стальных инструментов и деталей машин остается актуальной. Решить ее можно путем упрочнения стали различными методами обработки. В этом плане наибольший научный и практический интерес представляет упрочняющая термогидрохимическая обработка (ТГХО) стали в вододисперсной среде (ВДС), поскольку процесс применим для готовых к эксплуатации изделий, незначительно меняет их первоначальные размеры, форму, шероховатость и структуру [1–4]. ТГХО является наиболее простым и универсальным методом. С помощью этого метода можно создавать износостойкие наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, других антифрикционных материалов и их композиций.

Согласно 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, Киркинда, теория Берналла, др.), причем эффект Ребиндера наилучшим образом реализуется в присутствии *поверхностно-активных веществ* (ПАВ) [8]. Согласно молекулярно-механической теории трения повышение износостойкости изделия можно достичь при выполнении двух основных условий: при высокой твердости поверхности стали (покрытия) и низкой прочности ее адгезионной связи с контактирующим материалом в зоне трения.

Как известно [5–11], материалы и покрытия обладают твердосмазочными свойствами в тех случаях, когда: имеют слоистую поликристаллическую структуру (графит, сульфиды); сформированы на основе наноструктурированных материалов; реализуется теория Берналла, согласно которой твердое тело приобретает свойства жидкости, если в кристаллической решетке содержится более 10 % вакансий; реализуется эффект Ребиндера, который ведет к пластификации поверхностного слоя и созданию положительного градиента механических свойств в зоне тре-

ния; 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.

В результате поверхностного легирования и модифицирования сталей и сплавов можно сформировать наноструктуру на основе тугоплавких и сверхтвердых материалов [1–4, 12]. Наноструктурированные материалы и покрытия облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения, в то же время твердость наноматериалов из тугоплавких соединений возрастает в 2–3 раза [9–11]. 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. Именно покрытия, сформированные методом термогидрохимической обработки, имеют наноструктуру и обладают твердосмазочными свойствами (сверхпластичностью) [1–4].

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

В работе поставлены задачи: сравнить триботехнические свойства поверхности стали, подвергнутой ТГХО в различных ВДС; оптимизировать процесс ТГХО стали; изучить структуру и морфологию износа стальной поверхности, упрочненной ТГХО; апробировать процесс ТГХО в промышленности.

### Материалы и методы проведения исследований

Исследования проведены на углеродистой инструментальной стали У8 (0,8 % С), которую подвергли ТГХО. Сам процесс ТГХО осуществляли путем проведения двух операций: *химической обработки* (ХО) поверхности при температуре 95...100 °С в течение 40...120 мин в специально приготовленной ВДС на базе наноразмерных порошков оксидов и других тугоплавких материалов; последующей *термической обработки* (ТО), включающей нагрев до температуры 130...1050 °С, выдержку в течение 30...60 мин и охлаждение. Насыщающую ВДС предварительно готовили по специальной технологии диспергирования до наноуровня грубодисперсных частиц (размером не более 5 мкм) тугоплавких соединений (оксидов) и других материалов с добавлением 5 % водораствори-

мого ПАВ (сульфанола и др.). Готовым считался рабочий состав с кислотностью РН 6–8, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH<sub>4</sub>ОН. 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 мин. После каждой операции подготовки и химической обработки образцы промывали в воде. Изотермическую выдержку стали до 250 °С проводили в воздушной среде, выше этой температуры – под слоем флюса SnCl<sub>2</sub> или плавкого затвора В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>.

Для изучения структуры стали, подвергнутой ТГХО, применяли микроструктурный, рентгеноструктурный, микрорентгеноспектральный анализы. Тонкую структуру и морфологию поверхности исследовали на *атомно-силовом микроскопе* (АСМ) "Nanoscope 3D" (Veeco, USA). Рентгеновские съемки стальной поверхности выполняли на дифрактометре "ДРОН-3,0" в режиме сканирования по точкам в монохроматизированном CuK<sub>α</sub>-излучении. Расчет макронапряжений в стали осуществляли по методике одной съемки как сумму главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  по формуле [13, 14]:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -E/\mu [D_{\perp} - D_0]/D_0,$$

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

Определение триботехнических свойств стальной поверхности осуществляли 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) [2–4]. Показатель относительной стойкости упрочненного инструмента (или детали) определяли по формуле  $K_w = t_2/t_1$ , где  $t_1$ ,  $t_2$  – время работы (длина рабочего хода) исходного и упрочненного инструмента соответственно.

### Результаты исследований и их обсуждение

Процесс ТГХО имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности стали осаждается наноструктурированное твердосмазочное тугоплавкое покрытие, в подслое создается модифицированная зона с высокими напряжениями сжатия [3, 4].

Оптимально полученные *термогидрохимические* (ТГХ) покрытия на сталях имеют малую толщину (200...500 нм). Это ограничивает число методов изучения их свойств. Для наноструктурированных покрытий применяют методы исследования триботехнических характеристик, определяющей из которых является коэффициент трения [6, 7, 12].

**Триботехнические исследования.** Полученные покрытия, благодаря формированию нанокристаллической структуры, обладают твердосмазочными свойствами. Результаты (рис. 1, а, б, см. с. 3 обложки) сравнительных трибологических испытаний поверхности стали У8, подвергнутой 2 ч химической обработки (без термообработки), позволили сделать заключение, что в условиях сухого трения скольжения и воздушной атмосферы увеличение числа тугоплавких компонентов в насыщающей ВДС ведет к снижению коэффициента трения твердосмазочных покрытий. Поэтому изначально важно сформировать на поверхности сталей покрытия, полученные в многокомпонентных оксидосодержащих и других средах.

На основании оптимизации и компьютерного проектирования процесса ТГХО стали У8 с помощью синтез-технологий определены технически оптимальные режимы и составы нанооксидных ВДС [2]. Обработка стали У8 по оптимальному режиму (ХО, 1 ч в составе  $TiO_2+MoO_3$ , затем ТО при 200 °С, 0,5 ч) позволила, по сравнению с исходным состоянием, существенно (в 8,3 раза) снизить коэффициент трения стальной поверхности при скольжении по ней подвижного шарика из стали ШХ 15 при отсутствии смазки (рис. 2, см. с. 3 обложки). ТГХ покрытия имеют преимущества перед известными твердосмазочными покрытиями [12], поскольку сохраняют минимальные значения коэффициента трения ( $f = 0,066$ ) на протяжении всего периода эксплуатации и не требуют приработки стальных изделий [15].

Еще одной важной особенностью разработанных покрытий является высокая термическая стабильность ТГХ оксидных покрытий, которые, в отличие от известных наноструктурированных покрытий [9, 10, 12], после нагрева до 1050 °С сохраняют низкий

коэффициент трения ( $f = 0,09$ ) при отсутствии смазки (рис. 3, см. с. 3 обложки).

**Напряженное состояние в поверхностном слое.** Рентгеноструктурные исследования [13, 14] показали (табл. 1), что после оптимально упрочненной ТГХО стали У8 (60HRC) формируются остаточные сжимающие макронапряжения (1-го рода), величина которых в 1,7 раза выше, чем до обработки и сравнима с уровнем напряжений, создаваемых методами холодной пластической деформации (ППД, МГПД и др.) [16, 17]. При ППД увеличивается плотность дислокаций до  $10^{10}...10^{12} \text{ см}^{-2}$  [9, 18], в то время как при ТГХО, по сравнению с исходным состоянием, число дислокаций существенно не меняется. Микронапряжения (2-го рода) в ТГХ упрочненных твердых сплавах выявлены не были, не отмечено также статических искажений решетки [13, 14].

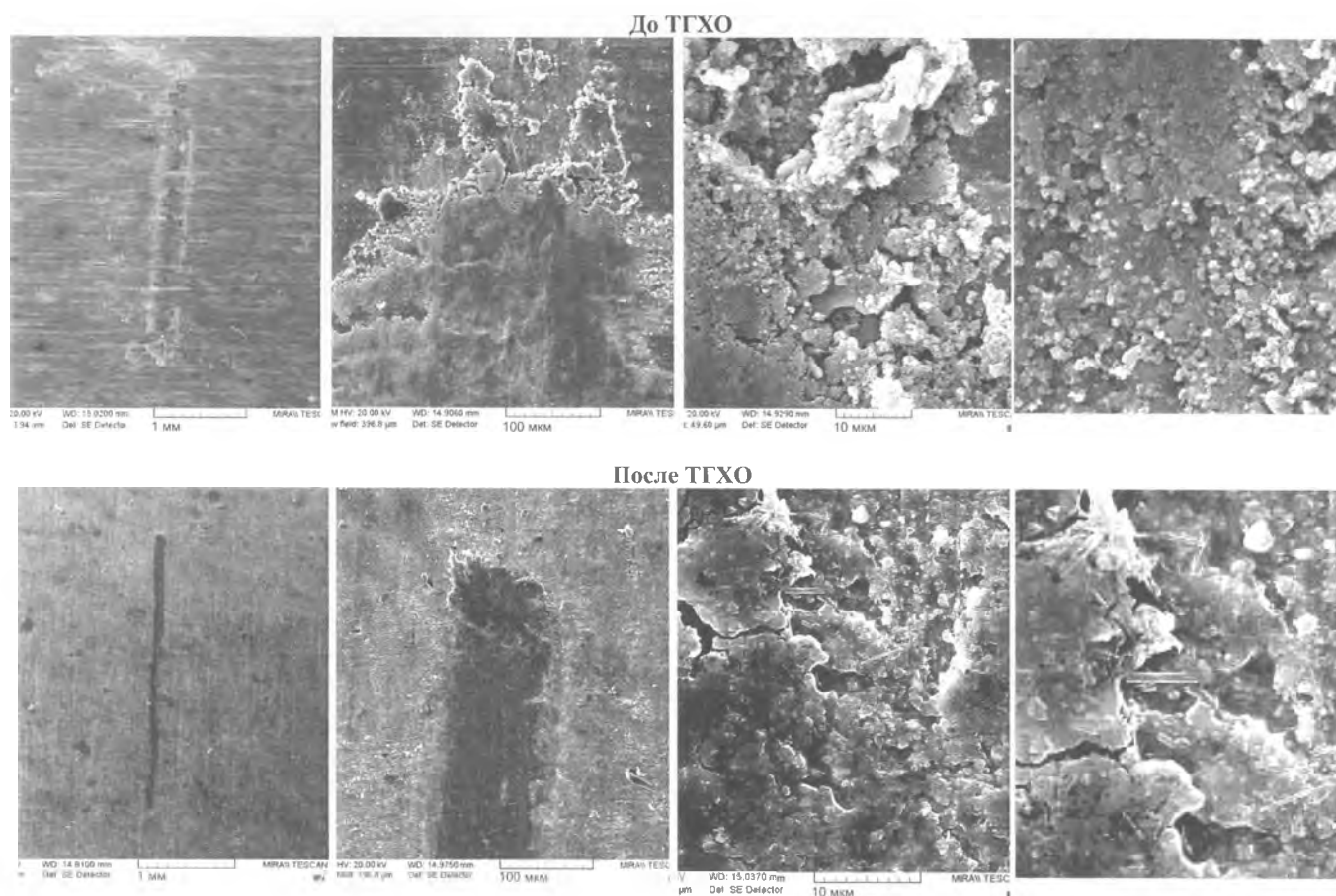
Формирование высоких напряжений сжатия с помощью ТГХО положительно сказывается на работоспособности стальных инструментов и деталей, поскольку позволяет компенсировать нежелательные растягивающие напряжения в поверхностном слое, возникающие при эксплуатации изделий, а также релаксировать растягивающие напряжения, созданные механической, термической или другой обработкой в процессе изготовления изделий.

**Морфология износа стали.** Морфологические исследования треков износа поверхности стали У8, оптимально упрочненной ТГХО, свидетельствуют о сверхпластичности ТГХ-покрытий. Поле разрушения исходной стали У8 во много раз шире, чем у стали, упрочненной ТГХО (рис. 4). К тому же продукты разрушения исходной стали – это крупные и мелко раздробленные частицы округлой формы, у ТГХ обработанной стали – это направленно пластифицированные слои с отдельными мелкими частицами разной формы и единичными иглами, по-видимому, составляющих волокнистой структуры покрытия. Ровные боковые стороны трека, не нарушающие волокнистость структуры покрытия, также подтверждают отсутствие следов пластической деформации, создаваемой контртелом (рис. 5).

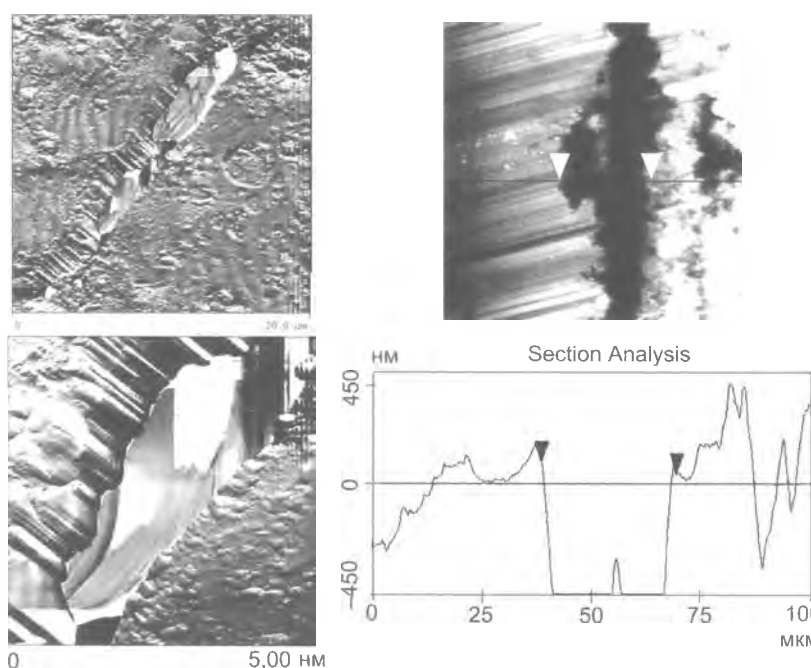
Таблица 1

Результаты рентгеновской съемки стали У8

| Режим обработки стали | Фаза (линия)             | $2\theta_L$ , град. | $2\theta_0$ , град. | $d_L$ , 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                                       |



**Рис. 4.** Морфологические исследования треков износа поверхности стали У8 до и после ТГХО (при разном увеличении): Пара трения: ТГХО сталь У8 (плоскость) – сталь ШХ15 (сфера Ø4 мм); нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм, скорость 4 мм/с



*Спектральный анализ в зоне трека износа стали.* Такой анализ для стали У8, подвергнутой оптимальной ТГХО, показал (рис. 6, 7), что не только в ТГХ-покрытии, но и во всей области трения присутствуют оксиды металлов; ТГХ обработанная сталь остается дискретной по химическому составу и в местах трения ее контртелом; в ТГХ-покрытии содержится большое количество железа (до 50 %); среди других легирующих элементов Мо преобладает (до 33,5 %) в составе покрытия, но его содержание резко снижается в зоне трения; содержание тита-

**Рис. 5.** Микрорельеф трека износа поверхности стали У8 после ТГХО: Пара трения: ТГХО сталь У8 (плоскость) – сталь ШХ15 (сфера Ø4 мм); условия испытаний: нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм; скорость 4 мм/с

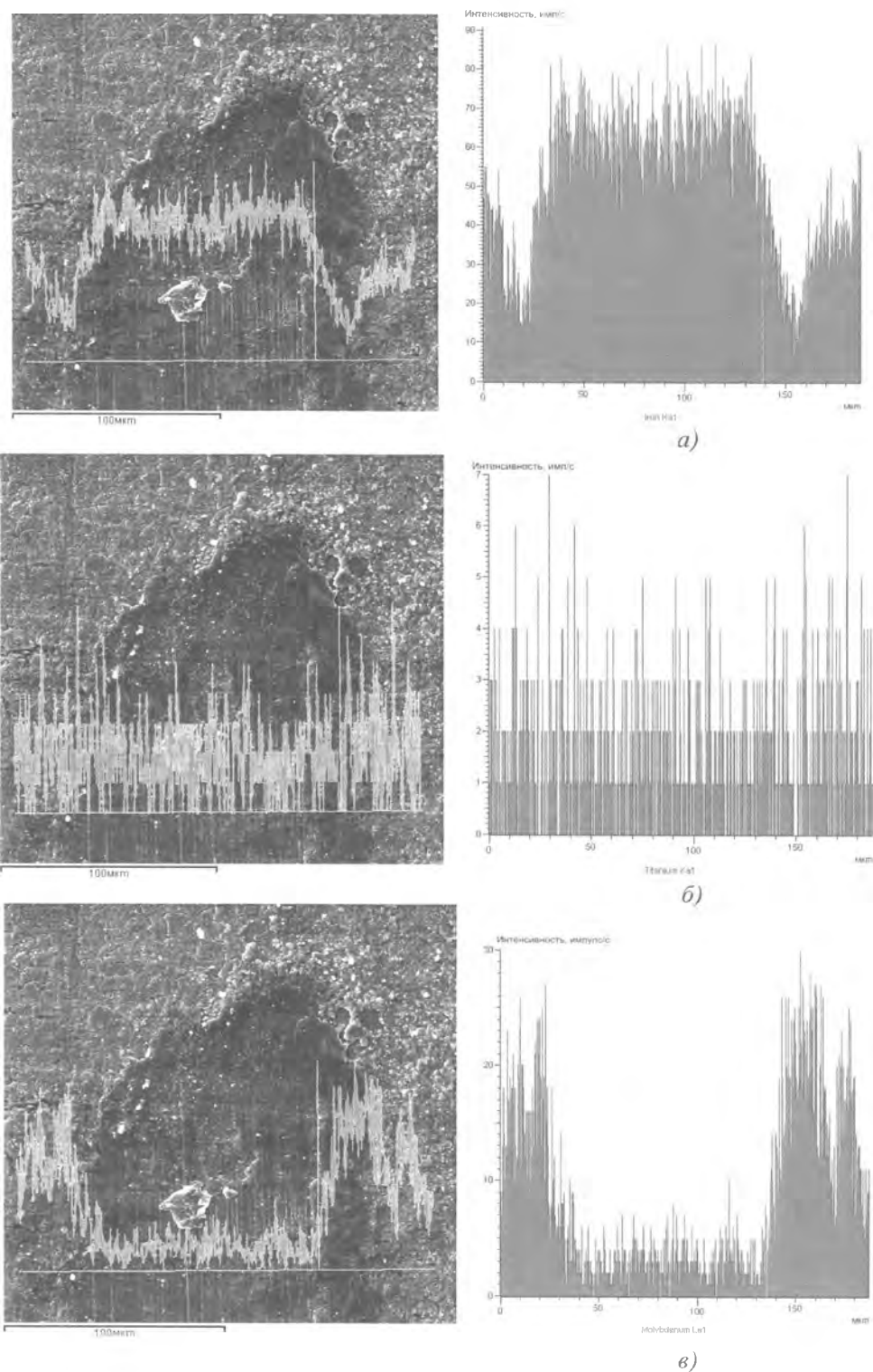
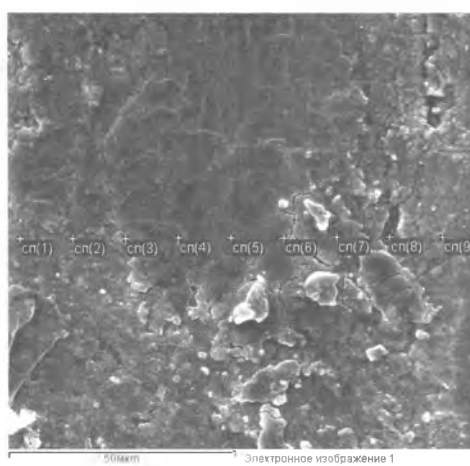
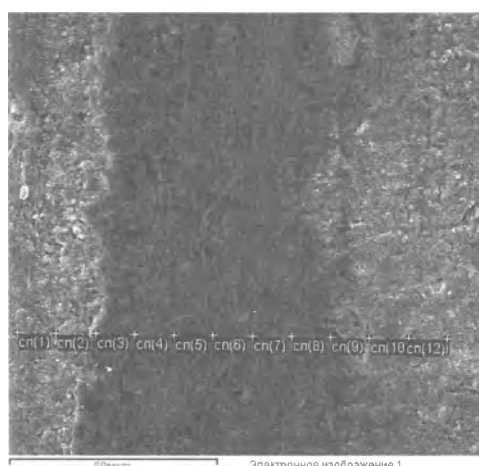


Рис. 6. Микроструктура и интенсивность рентгеновского излучения Fe (а), Ti (б), Mo (в) (% мас.) в зоне трека износа ТГХ упрочненной стали У8

на в покрытии и зоне трения незначительное и не превышает 1,5 % ; наименьшее содержание Мо соответствует наименьшему содержанию кислорода в по-

крытии, т.е. основным оксидообразователем на поверхности стали является Мо; в местах бокового среза контртелом поверхности стали содержание железа



|        | O     | Si   | Ti   | Cr   | Mn   | Fe   | Mo    |
|--------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| сп(1)  | 18.87 | 0.22 | 0.29 | 0.06 | 0.11 | ост. | 16.50 |
| сп(2)  | 18.09 | 0.32 | 0.17 | 0.25 | 0.29 | ост. | 22.57 |
| сп(3)  | 17.94 | 0.34 | 0.29 | 0.29 | 0.63 | ост. | 14.14 |
| сп(4)  | 11.82 | 0.15 | 0.09 | 0.02 | 0.42 | ост. | 16.47 |
| сп(5)  | 8.07  | 0.14 | 0.09 | 0.37 | 0.17 | ост. | 5.70  |
| сп(6)  | 13.27 | 0.05 | 0.13 | 0.19 | 0.59 | ост. | 10.53 |
| сп(7)  | 13.49 | 0.10 | 0.12 | 0.28 | 0.89 | ост. | 11.73 |
| сп(8)  | 21.15 | 0.12 | 0.33 | 0.58 | 0.11 | ост. | 26.57 |
| сп(9)  | 17.52 | 0.47 | 0.28 | 0.38 | 0.27 | ост. | 23.35 |
| сп(10) | 17.81 | 0.33 | 0.13 | 0.02 | 0.06 | ост. | 22.60 |
| сп(11) | 17.42 | 0.23 | 0.30 | 0.28 | 0.54 | ост. | 15.51 |
| сп(12) | 23.11 | 0.28 | 0.24 | 0.08 | 0.03 | ост. | 29.78 |

а)

|       | O     | Si   | Ti   | Cr   | Mn   | Fe   | Mo    |
|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| сп(1) | 14.74 | 0.27 | 0.17 | 0.09 | 0.01 | ост. | 25.65 |
| сп(2) | 15.13 | 0.28 | 0.07 | 0.13 | 0.30 | ост. | 20.03 |
| сп(3) | 21.52 | 0.12 | 0.33 | 0.22 | 0.22 | ост. | 22.28 |
| сп(4) | 15.61 | 0.19 | 1.10 | 0.39 | 0.35 | ост. | 31.29 |
| сп(5) | 23.89 | 0.17 | 0.26 | 0.35 | 0.01 | ост. | 33.34 |
| сп(6) | 23.19 | 0.37 | 0.31 | 0.13 | 0.06 | ост. | 30.47 |
| сп(7) | 19.25 | 0.49 | 1.46 | 0.04 | 0.37 | ост. | 22.24 |
| сп(8) | 8.86  | 0.11 | 0.08 | 0.17 | 0.33 | ост. | 9.98  |
| сп(9) | 21.48 | 0.23 | 0.07 | 0.02 | 0.05 | ост. | 26.42 |

б)

Рис. 7. Микроструктура и результаты микрорентгеноспектрального анализа (% мас.) в центре (а) и с краю (б) трека износа ТГХ упрочненной стали У8

снижается до минимального, а содержание титана и молибдена увеличивается до максимального.

На основании спектрального анализа трека износа ТГХ упрочненной стали сделано заключение, что

процесс изнашивания носит окислительный характер, а химический состав материала в зоне трения дискретен, неоднороден и содержит помимо легирующих элементов большое количество железа.

**Применение результатов исследований.** В результате исследований разработана технология безэлектролизного термогидрохимического упрочнения сталей. Производственные испытания показали, что ТГХО с использованием разработанных вододисперсных составов позволяет увеличить эксплуатационную стойкость различных видов стальных инструментов и деталей машин (табл. 2) в 1,3–4,5 раза, по сравнению со стандартно термообработанными. Отмечено, что наивысшие показатели стойкости упрочненных инструментов достигаются при черновой механической обработке труднообрабатываемых коррозионно-стойких, жаропрочных и цветных сплавов.

Благодаря простоте технологии и высоким антифрикционным свойствам упрочненной поверхности

Таблица 2

Результаты испытаний изделий и инструментов, подвергнутых ТГХО

| Вид инструмента* | Материал инструмента | Место испытаний (название компании)                                                                                 | $K_{\text{п}}$ |
|------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Метчики          | Быстрорежущая сталь  | "VUNZ" (Чехия), Daewoo (Корея), "Салют" (РФ), "УМПО" (РФ), "ПМЗ" (РФ), "Энергомаш" (РФ), "БелАЗ", "МТЗ", "Мотовело" | 2,0...4,1      |
| Ленточные пилы   |                      | "VUNZ" (Чехия)                                                                                                      | 2,5...3,0      |
| Сверла           |                      | "PS" (Словакия), "VUNZ" (Чехия), "Дукс" (РФ), "Энергомаш" (РФ), "Мотовело", "БелАЗ"                                 | 1,8...2,9      |
| Зенкера          |                      | "Салют" РФ, "Искра" (РФ), "Энергомаш" (РФ)                                                                          | 1,8...3,0      |
| Развертки        |                      | "Мотовело", "БАТЭ", "АГУ"                                                                                           | 1,5...2,7      |
| Протяжки         |                      | "Мотовело", "АГУ"                                                                                                   | 2,0...2,5      |
| Резцы            |                      | "Мотовело", "БелАЗ"                                                                                                 | 1,3...1,9      |

| Вид инструмента                  | Материал инструмента  | Место испытаний (название компании)          | $K_w$     |
|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------|-----------|
| Долбяки                          | Быстрорежущая сталь   | "Мотовело"                                   | 1,6...2,1 |
| Фрезы                            |                       | "Энергомаш" (РФ), "Мотовело", "БелАЗ", "МТЗ" | 2,0...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...2,0 |

в условиях отсутствия смазки и нагрева данный процесс находит все более широкое применение в технике для увеличения ресурса работы интенсивно эксплуатируемых инструментов и деталей машин. Процесс внедрен в Беларуси на предприятиях "МТЗ", "БелАЗ", "Мотовело" и др.

### Выводы

1. Процесс ТГХО имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности стали осаждается твердосмазочное покрытие, а в подслое создается модифицированная зона высоких напряжений сжатия, сравнимых с уровнем напряжений, создаваемых методами поверхностной пластической деформации.

2. Трибологические испытания стальной поверхности, подвергнутой ГХО, показали, что увеличение числа тугоплавких компонентов в вододисперсной насыщающей среде ведет к снижению коэффициента трения осажденных покрытий.

3. В результате оптимизации процесса ТГХО стали У8 коэффициент трения стальной поверхности при сухом скольжении по ней подвижного шарика из стали ШХ15 снизился в 8,3 раза, по сравнению с исходным состоянием. Разработанные покрытия имеют преимущества перед известными твердосмазочными покрытиями, поскольку не требуют приработки и сохраняют на протяжении всего времени эксплуатации минимальные значения коэффициента трения ( $f = 0,066$ ). Отмечена высокая термическая стабильность полученных покрытий, которые после нагрева до 1050 °С сохраняют низкий коэффициент трения ( $f = 0,09$ ) при отсутствии смазки.

4. На основании спектрального анализа трека износа ТГХО стали отмечено, что процесс изнашивания носит окислительный характер, а химический состав материала в зоне трения дискретен, неоднороден и содержит помимо легирующих элементов большое количество железа.

5. Разработан простой безэлектролизный способ ТГХО, который позволяет повысить эксплуатационную стойкость стальных инструментов и деталей ма-

шин в 1,3–4,5 раза в сравнении со стандартно термообработанными.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шматов А.А. Нанотехнология низкотемпературного термохимического упрочнения готового к эксплуатации инструмента // Наноструктурные материалы: получение, свойства, применение: сб. научн. тр. Минск: 2009, С. 221–230.
2. Компьютерное проектирование процесса ТГХО для формирования твердосмазочных покрытий на инструментальной стали У8 // А.А. Шматов и др.: Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. 2010. № 2. С. 139–146.
3. Шматов А.А., Жавнерко Г.К. Твердосмазочные тугоплавкие покрытия, полученные на сталях методом термогидрохимической обработки // Порошковая металлургия (Минск). 2011. № 34. С. 244–253.
4. Шматов А.А. Модифицирование стали в вододисперсной среде // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. 2012. № 3. С. 82–89.
5. Гаркунов Д.Н., Корник П.И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. М.: Изд-во МСХА, 2003. 344 с.
6. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит, 2007. 368 с.
7. Польпер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
8. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. Т. 2 135 с.
9. Материаловедение: учебник для вузов / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.
10. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под ред. В.С. Чердниченко. М.: Омега-Л, 2008. 752 с.
11. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2009. 416 с.
12. Витязь П.А. Твердосмазочные покрытия в машиностроении. Минск: Бел. наука, 2007. 170 с.
13. Бельский С.Е., Тофпенек Р.Л. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента. Минск: Наука и техника, 1984. 128 с.
14. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский и др. М.: Металлургия, 1982. 632 с.
15. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1970. 107 с.
16. Научные основы повышения малоциклового прочностного / Н.А. Махутов и др.; под. ред. Н.А. Махутова. М.: Наука, 2006. 623 с.
17. Бойцов В.Б., Чернявский А.О. Технологические методы повышения прочностных и долговечности. М.: Машиностроение, 2005. 128 с.
18. Фетисов Г.П., Гарифуллин Ф.А. Материаловедение и технология металлов. М.: Изд-во Оникс, 2007. 624 с.