

Для этого использовали методику, предложенную А.Н. Чичко, Т.В. Матюшинец.

Заключение. Таким образом, данные расчеты позволили провести оптимизацию конструкции литниковой системы и кокильной оснастки на различных стадиях процесса проектирования. При этом все варианты, построенные по классическим методикам, проходили этап моделирования полей температур и напряжений. Кроме того, для кокиля казана чугунного, выбранного на основе алгоритмов определяли вариант с минимально-затратной, с точки зрения материалоёмкости, литниковой системой и минимальной массой кокиля.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чичко, А.Н. Общая алгоритмическая схема процесса проектирования кокильной оснастки / А.Н. Чичко, Т.В. Матюшинец, Л.В. Марков // Литье и металлургия. – 2006. – №1. – С. 34–37.
2. Чичко, А.Н. Алгоритмы оптимизации кокильной оснастки для САПР технологических процессов литья / А.Н. Чичко, Т.В. Матюшинец // Литье и металлургия.
3. Чичко, А.Н. Расчет динамики изменения температур при заполнении металлической формы / А.Н. Чичко, Л.В. Марков // Литье и металлургия. – 2005. – № 2/1. – С. 57–63.

Материал поступил в редакцию 28.09.11

IVANKOVICH A.A., LISOVSKIJ A.L. Modeling of process of moulding copper pig-iron in conditions OAO "TechnolitPolock"

The given applications of designing of a technique chill copper pig-iron on OAO "TechnolitPolock" with use of mathematical modeling CAD and CAE-systems, and also 3D of designing with modeling of fields of temperatures and pressure are given.

УДК 621.78.001, 621.793.18

Шматов А.А., Девойно О.Г.

ТЕРМОГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ В ВОДОДИСПЕРСНЫХ ОКСИДНЫХ СРЕДАХ

Введение. Уровень развития современной техники характеризуется высокой интенсивностью эксплуатации инструментов и широким применением сложнлегированных труднообрабатываемых сталей и сплавов для изготовления деталей машин и узлов. Это требует применения, во 1-х, инструментов на основе материалов со сверхвысокими эксплуатационными свойствами, во 2-х, упрочняющих технологий, в том числе технологий нанесения на поверхность инструментов износостойких покрытий из тугоплавких материалов.

Согласно настоящим представлениям в области трения и изнашивания [1–3], 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 инструмента можно достичь при выполнении двух основных условий: при высокой твердости поверхности инструмента и низкой прочности его адгезионной связи с обрабатываемым материалом.

Большой интерес представляют низкотемпературные методы получения твердосмазочных покрытий из тугоплавких материалов. Как известно [1–6], покрытия приобретают твердосмазочные свойства в тех случаях, когда: (а) созданы из материалов со слоистой поликристаллической структурой (графит, сульфиды); (б) сформированы на основе наноструктурированных тугоплавких и сверхтвердых 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 Киркиндала, который приводит к селективному растворению из сплава легирующих элементов из-за различия их электрохимических потенциалов; в результате чего формируется квазжидкая пленка, снижающая коэффициент трения и трещинообразующий разогрев.

Среди указанных способов получения твердосмазочных покры-

тий следует выделить методы, которые позволяют сформировать наноструктуру на основе тугоплавких и сверхтвердых материалов [6–11]. Наноструктурированные покрытия обладают сверхпластичностью, они облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения; в то же время твердость наноматериалов из металлов и тугоплавких соединений возрастает в 2–3 раза [5]. Наибольший интерес в этом аспекте представляют твердосмазочные покрытия с наноструктурой, полученные низкотемпературным методом термогидрохимической обработки (ТГХО) [7–11]. Данные покрытия можно наносить на готовые к эксплуатации инструменты, поскольку в результате ТГХО сохраняется исходная структура твердых сплавов (не разупрочняется); при этом конечные размеры и форма изделий не меняются. С другой стороны, 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 рабочие части инструментов, что гарантирует их длительную работу. ТГХО 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.

Из приведенного анализа следует, что процесс ТГХО имеет большие перспективы для своего развития, прежде всего для высокопроизводительных инструментов, испытывающих значительные механические и температурные нагрузки. Особое внимание в этом плане следует уделить инструментам из твердых сплавов (марки ВК, ТК, ТТК), которые, благодаря их высокой твердости, износостойкости и теплостойкости, широко используются для изготовления различных видов режущих инструментов. Однако вопросы, связанные с термогидрохимической обработкой практически всех инструментальных материалов, мало изучены.

В настоящей работе поставлены задачи: 1) сравнить триботехнические свойства твердосмазочных покрытий на основе оксидов, карбидов и нитридов, осажденных на твердый сплав; 2) оптимизировать процесс ТГХО твердого сплава; 3) изучить структуру и оценить напряженное состояние поверхностных слоев твердого сплава, подвергнутого ТГХО.

Объекты и методика исследований. Все исследования проведены на твердом сплаве ВК6, который подвергали термогидрохимической обработке. Сам процесс ТГХО осуществляли в 2 этапа путем:

Шматов А.А., к.т.н., Белорусский национальный технический университет.

Девойно Олег Георгиевич, д.т.н., главный научный сотрудник НИИП плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

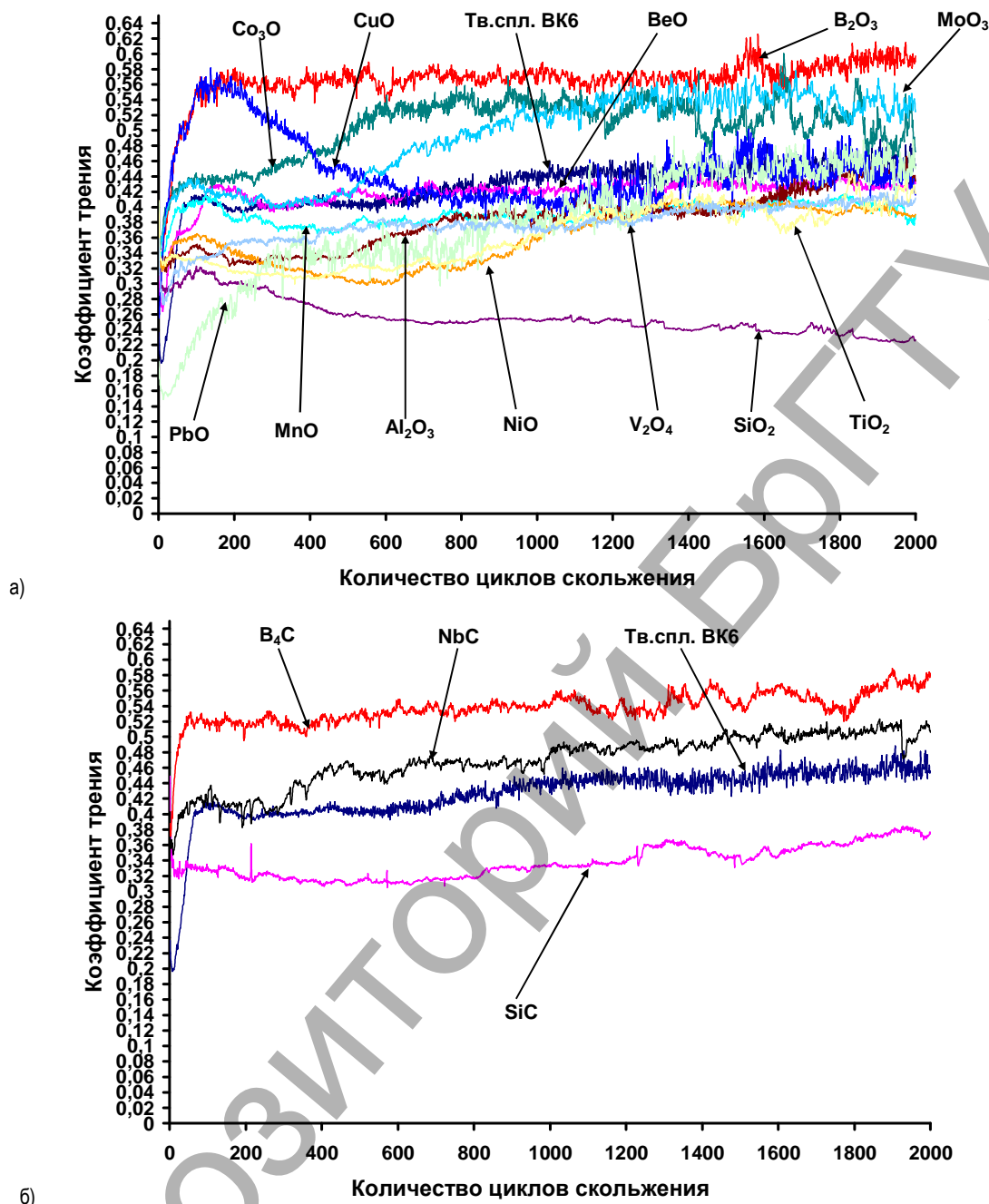


Рис. 1. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания ГХ покрытий на основе однокомпонентных оксидов: (а) однокомпонентных карбидов, (б) при сухом трении скольжения

(а) 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 наноразмера грубодисперсных частиц (размером не более 5 мкм) тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, нитридов) с добавлением 5% водорастворимого поверхностно-активного вещества (сульфанола). Готовым считался рабочий состав с кислотностью РН 6–8, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH₄ОН. При проведении химической обработки образцы помещали и выдерживали в ванне с готовым составом водной насыщающей среды, нагретой до температуры процесса. Поверхность образцов предварительно обезжировали и декапировали в 5 % растворе серной кислоты в течение 1–2 минут. После каждой операции подготовки и химической обработки образцы промывали в воде. Изотермическую выдержку стали прово-

дили в воздушной среде до 250 °С, выше этой температуры – под слоем флюса SnCl₂ или плавкого затвора В₂О₃.

Для изучения структуры стали, подвергнутой термогидрохимической обработке, применяли микроструктурный, рентгеноструктурный, микроанализ. Исследования тонкой структуры покрытий и морфологии поверхности проводили на атомно-силовом микроскопе (АСМ) «Nanoscope 3D» (Veeco, USA).

Определение триботехнических свойств полученных твердосмазочных покрытий осуществляли на микротрибометре возвратно-поступательного типа (ИММС, г. Гомель) по схеме «подвижный шарик – неподвижная плоскость» при следующих условиях испытаний: нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм, скорость 4 мм/с; пара трения: упрочненная сталь (плоскость) – сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм) [10]. 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.

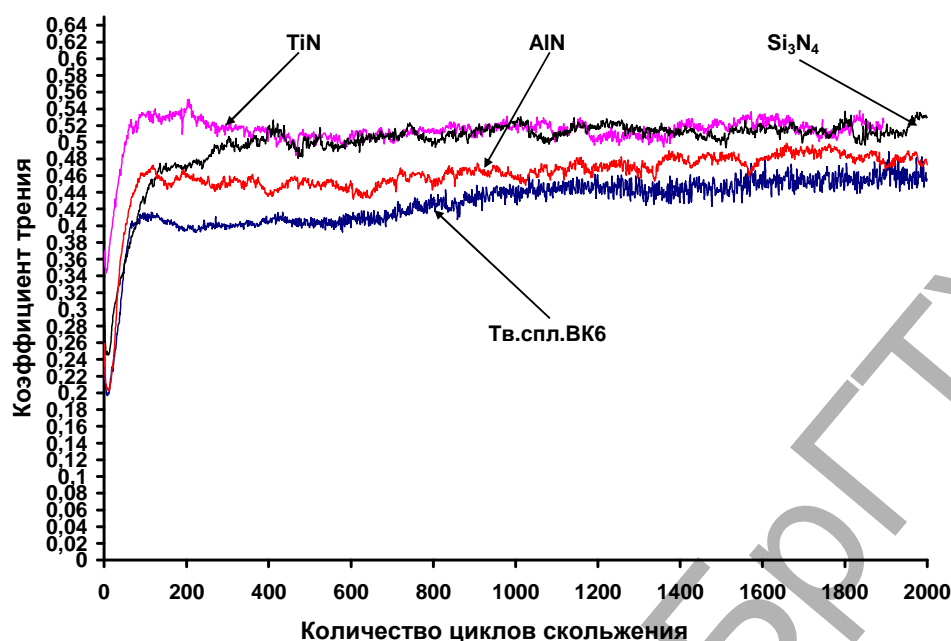


Рис. 2. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания ГХ покрытий на основе однокомпонентных нитридов при сухом трении скольжения

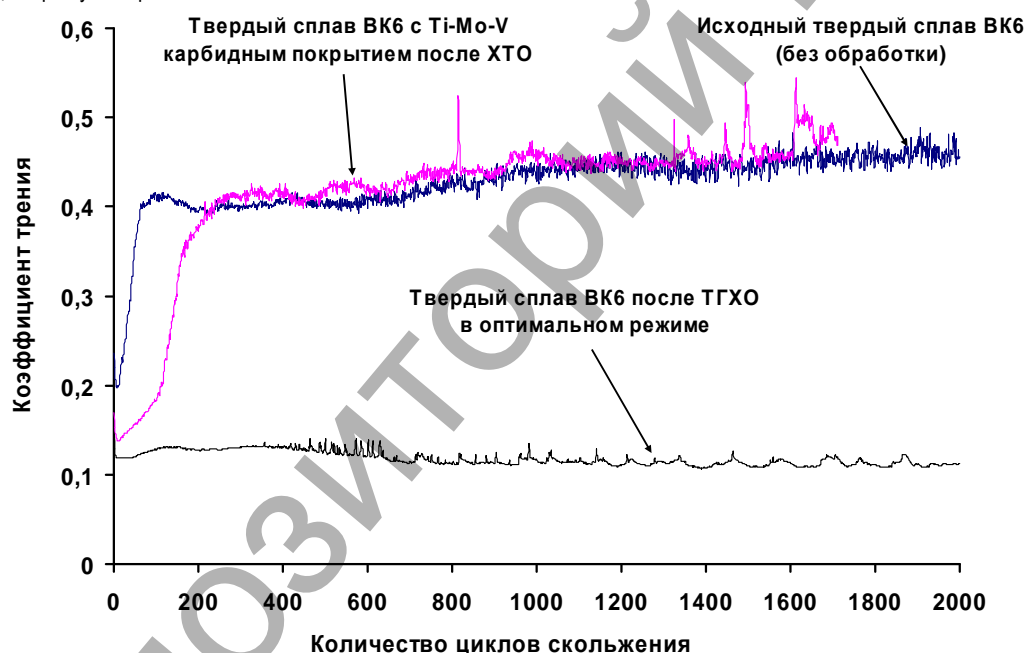


Рис. 3. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания (без смазки) поверхности твердого сплава ВК6 до и после ТГХО

Результаты исследований. Процесс термогидрохимической обработки имеет двойственный характер упрочнения: (1) на поверхности стали осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие на базе комплексных тугоплавких соединений, (2) в подслое создается зона высоких напряжений сжатия.

Оптимально полученные покрытия на твердых сплавах имеют малую толщину (до 1 мкм). Это ограничивает число методов, с помощью которых можно изучить свойства термогидрохимических (ТГХ) тонкопленочных покрытий. Для твердосмазочных покрытий широко применяются методы исследования триботехнических характеристик, определяющей из которых является коэффициент трения [2, 3, 6].

Триботехнические исследования. Полученные твердосмазочные покрытия, благодаря формированию нанокристаллической структуры, обладают сверхпластичными свойствами. Результаты (рис. 1, 2) сравнительных триботехнических испытаний поверхности твердого сплава, подвергнутой в течение 2-х часов химической обработке (без

термообработки) позволили сделать заключение, что в условиях сухого трения скольжения и воздушной атмосферы: твердосмазочные гидрохимические (ГХ) покрытия на основе нанооксидов имеют лучшие антифрикционные свойства, чем ГХ покрытия на базе нанокарбидов и нанонитридов. Процесс ТГХО может стать наиболее простым способом целенаправленного повышения износостойкости готовых изделий и изначально важно сформировать на поверхности твердых сплавов ГХ покрытия на основе оксидов, а не других тугоплавких сплавов.

На основании оптимизации и компьютерного проектирования процесса ТГХО твердого сплава ВК6 с помощью синтез – технологий определены технически – оптимальные режимы и составы вододисперсных нанооксидных сред [10]. Обработка твердого сплава ВК6 по оптимальному режиму (ХО при 100 °С, 19 мин. в составе $TiO_2 + MoO_3$, затем ТО при 1035 °С, 10 мин.) позволила существенно (в 3,8 раза) снизить коэффициент трения поверхности при сухом скольжении, по сравнению с исходным состоянием (рис. 3).

Для инструмента, у которого место контакта с деталью меняется со временем (приработка не идет в одной точке) [12], очень важно на протяжении всего времени эксплуатации иметь не только минимальные, но неизменные значения коэффициента трения; этим требованиям отвечают ТГХ-покрытия. Они имеют преимущества перед известными твердосмазочными покрытиями [6, 11], у которых сначала коэффициент трения высокий, а затем он медленно снижается по мере приработки покрытий, причем с большой амплитудой колебаний.

Структурный анализ поверхности ТГХ-упрочненного твердого сплава ВК6 свидетельствует о том, что полученные наноструктурированные покрытия при трении хорошо пластифицируются (рис. 4).

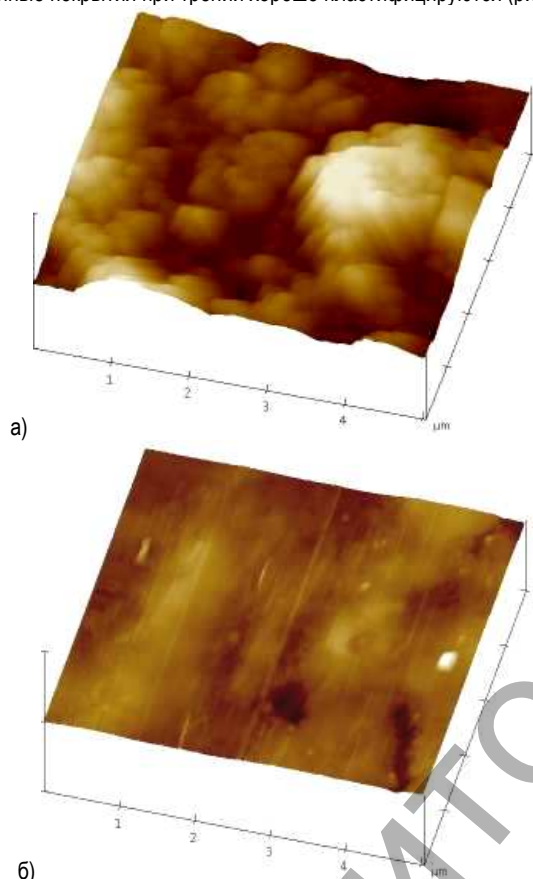


Рис. 4. Морфология поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого ТГХО, до (а) и после испытанного на трение (б) режим ТГХО: ХО в составе TiO_2 - MoO_3 при $T = 100$ °С, $\tau = 15$ мин.; ТО при $T = 1000$ °С, $\tau = 10$ мин.

В результате оптимизации процесса ТГХО выявлена важная эксплуатационная особенность разработанных покрытий. ТГХ-оксидные покрытия отличаются от ныне известных наноструктурированных покрытий [5, 6] более высокой термической стабильностью: даже после нагрева до 1035 °С и выдержки в течение 10 мин. полученные покрытия сохраняют очень низкий коэффициент трения ($f = 0,106$) (табл. 1, 2).

Таблица 1. Оптимальные параметры процесса ТГХО твердого сплава ВК6 и поля их рассеивания

Наименование параметра процесса	Номинальное значение	Разрешенные поля рассеивания
Температура гидрохимической обработки, °С	100	9
Время гидрохимической обработки, мин.	19	10
Доля MoO_3 в смеси оксидов, %	59	28
Температура термообработки, °С	1035	28

Таблица 2. Оптимальные показатели свойств покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО в вододисперсном составе на основе TiO_2 - MoO_3

Наименование оптимального показателя свойств	Номинальное значение	Поле рассеивания
Коэффициент трения, f	0,106	0,006

Антифрикционные свойства покрытий определяются их химическим составом, морфологией строения, микрорельефом, структурой, напряженным состоянием и др.

Структурные исследования. Такие исследования в настоящей работе были проведены на твердосплавных образцах, упрочненных ТГХО в оптимальных вододисперсных средах на основе оксидов титана и молибдена.

С помощью атомно-силового микроскопа «Nanoscope 3D» изучали морфологию и кинетику формирования наноструктурированных слоев сначала в результате гидрохимической обработки твердого сплава ВК6 в дисперсном составе на основе $TiO_2 + MoO_3$, а затем после нагрева до температур от 100 до 1050 °С. Как видно на рис. 5, термогидрохимические покрытия на твердом сплаве ВК6 имеют сложную структуру поверхности, состоящую из неоднородных по цвету и форме зерен. Все полученные покрытия формируются с нано- или нанокомпозитной структурой.

Насыщающая способность вододисперсной оксидной среды в керамическом твердом сплаве значительно выше, чем в стали: толщина покрытия на сплаве ВК6 после 2 часов гидрохимической обработки составила 5-7 мкм (более 20 раз), при этом комплексные органические соединения насквозь проникают в твердосплавную режущую пластину толщиной 5 мм (рис. 5). Наличие этих органических соединений на базе ПАВ и оксидов $TiO_2 + MoO_3$, определяли с помощью фокусированного пучка ионов Ga (ФИП) на установке НаноФаб-100, оснащенной модулями сканирующей зондовой микроскопии. Наибольшая концентрация органических соединений (светлых на рис. 5) сосредоточена с поверхности образца из твердого сплава ВК6 на глубине до 150 мкм в виде скопления частиц неправильной формы размером 1-15 мкм. В результате травления верхних слоев поверхности твердого сплава высокоэнергетичными ионами Ga при высоком увеличении ($\times 7260$) выявлена слоистая структура органических образований в подслое (рис. 6). Органические соединения преимущественно сосредоточены на границах карбидных фаз и в порах твердосплавной основы; однако эти соединения осаждаются даже внутри карбидных зерен, имеющих правильную форму.

Напряженное состояние. Рентгеноструктурные исследования показали, что после ТГХО твердых сплавов Т15К6 и ВК6 формируются остаточные макронапряжения (1-го рода), наличие которых установлено по смещению линий на рентгенограммах. Все съемки 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 [14, 15]:

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

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.

Расчеты (табл. 3) показали, что в результате ТГХО в приповерхностной зоне стали У8 (HRC 60) создаются сжимающие напряжения. Величина макронапряжений сжатия возрастает в 1,7 раза, по сравнению с необработанной сталью и сравнима с уровнем напряжений, специально создаваемых методами пластической деформации (ППД, МГПД и др.) [16, 17]. При ППД путем холодной пластической деформации создается плотность дислокаций, равная 10^{10} - 10^{12} на $см^2$ [18, 19], в то время как при ТГХО, по сравнению с исходным состоянием, число дислокаций существенно не меняется (табл. 3).

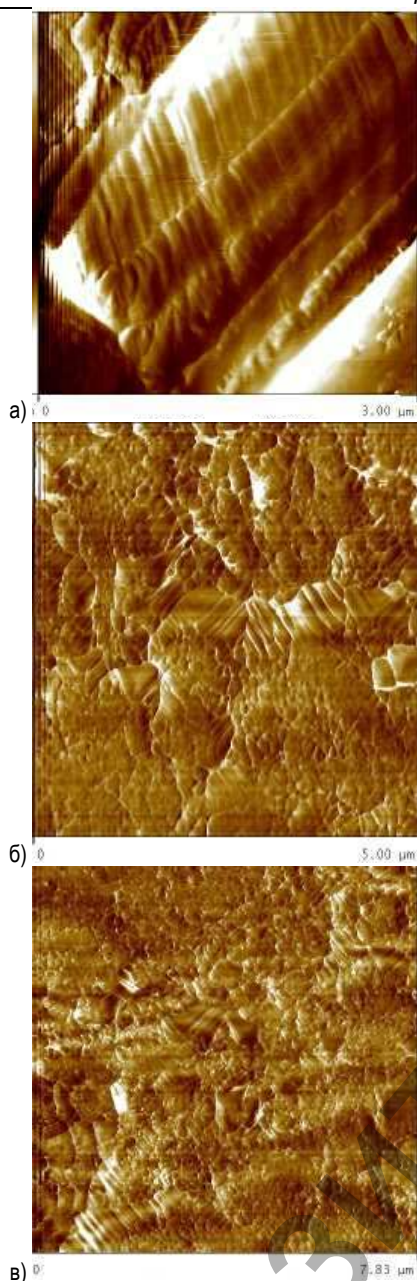


Рис. 5. Структура излома (а) и микро рельеф (б, в) поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого ТГХО в оптимальной вододисперсной среде на основе TiO_2+MoO_3 (при разном увеличении)

Микронапряжения (2-го рода) в ТГХ упрочненных твердых сплавов выявлены не были, поскольку на рентгенограммах отсутствовало уширение интерференционных линий. Не отмечено также статических искажений решетки, т.к. после ТГХО твердых сплавов остается неизменным (не уменьшается) отношение интенсивностей интерференционных линий и фона ($I_{hkl}/I_{фон}$) [14, 15]. 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, то зональные сжимающие напряжения благоприятно уравнивают разрушающие напряжения, возникающие при эксплуатации инструментов, увеличивают их выносливость и живучесть. Формирование высоких напряжений сжатия с помощью ТГХО положительно сказывается на работоспособности твердосплавных инструментов, поскольку позволяет (1) компенсировать растягивающие напряжения в поверхностном слое, которые возникают при работе инструментов, (2) релаксировать растягивающие напряжения, возникшие в результате механической, термической или другой обработки в процессе изготовления твердосплавных инструментов.

Рассматривая вопрос улучшения износостойкости твердого сплава в результате его термогидрохимической обработки с позиции современных теорий трения и износа, можно найти объяснение в реализации эффекта Ребиндера [3, 4]. Эффект Ребиндера носит адгезионный характер взаимодействия поверхности любых твердых тел с поверхностно-активными веществами. В нашем случае присутствие ПАВ в покрытии позволяет на начальной стадии износа интенсифицировать процесс поверхностного диспергирования, образуя устойчивую дисперсную систему на основе мицелл, которые способны направленно двигаться в зону контакта и снижать силы адгезии [1–3]. 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.

Предлагаемая термогидрохимическая обработка твердого сплава, благодаря простоте технологии и хорошим антифрикционным свойствам покрытий при отсутствии смазки и перегреве, может найти широкое применение в технике для увеличения ресурса работы инструментов, работающих в особо тяжелых и иногда катастрофических условиях.

Применение результатов исследований. Результаты производственных испытаний свидетельствуют о том, что ТГХО с использованием вододисперсных оксидных составов позволяет увеличить износостойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3–4,0 раз, по сравнению с необработанными (табл. 4). Причем наивысшие показатели износостойкости упрочненных твердосплавных режущих инструментов достигнуты при черновой токарной и фрезерной обработке сталей и цветных сплавов.

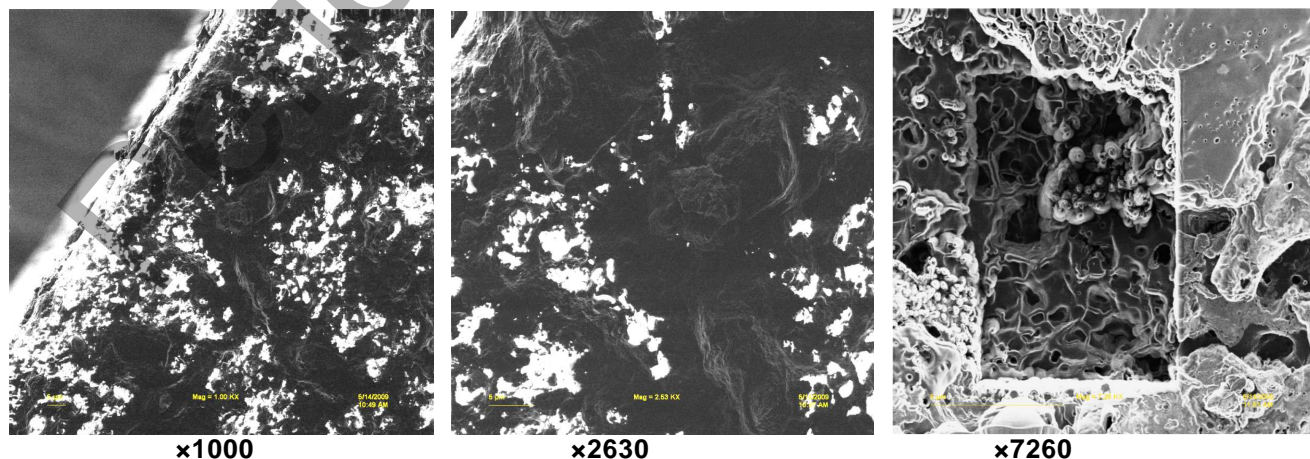


Рис. 6. Распределение органического соединения (светлый фон) в твердом сплаве ВК6, подвергнутого ТГХО в оптимальной вододисперсной среде на основе TiO_2+MoO_3 (при разном увеличении)

Таблица 3. Результаты рентгеновской съемки твердых сплавов

МАТЕРИАЛ	РЕЖИМ ОБРАБОТКИ	ФАЗА (линия)	$2\theta_1$, ГРАД	$2\theta_2$, ГРАД	D_{\perp} , НМ	D_0 , НМ	σ , МПА	Плотность дислокаций, 10^9 см ⁻²
Т15К6	БЕЗ ОБР.	WC (211)	117,30	117,29	0,90206	0,9020	-120	1,84246
	ТГХО	[25-1047]	117,26	117,29	0,90212	0,9020	-235	2,47587
ВК6	БЕЗ ОБР.	WC (211)	117,30	117,29	0,90203	0,9020	-71	1,96186
	ТГХО	[25-1047]	117,25	117,29	0,90209	0,9020	-210	1,97629

Таблица 4. Результаты испытаний твердосплавных инструментов, подвергнутых ТГХО

Вид инструмента	МАТЕРИАЛ ИНСТРУМЕНТА	ОБРАБАТЫВАЕМЫЙ МАТЕРИАЛ	ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ, K_w
ПО «БелАЗ»			
РЕЖУЩИЕ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ	ТВЕРДЫЙ СПЛАВ Т15К6	Сталь 40Х (НВ217)	>2
РУП «Кузнечный завод тяжелых штампов» (КЗТШ)			
РЕЖУЩИЕ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ	ТВЕРДЫЙ СПЛАВ Т15К6	Сталь 20	1,8 – 1,9
АП «Минский подшипниковый завод»			
ТОРЦЕВЫЕ ФРЕЗЫ СБОРНЫЕ	ТВЕРДЫЙ СПЛАВ Т15К6	КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ	2,1
РЕЗЦЫ ГАЛЬТЕЛЬНЫЕ			2
РУПП «Автогидроусилитель» (АГУ)			
РЕЖУЩИЕ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ	ТВЕРДЫЙ СПЛАВ Т15К6	Сталь 30ХГТ (НВ229)	2
РУП «Белорусский металлургический завод» (БМЗ)			
ТОРЦЕВЫЕ ФРЕЗЫ СБОРНЫЕ	ТВЕРДЫЙ СПЛАВ МК8	Медный сплав М1РО	1,6 – 2
РЕЖУЩИЕ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ЧЕРНОВОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ	ТВЕРДЫЙ СПЛАВ РТ40	Сталь 20	2,6 – 3,3
РЕЖУЩИЕ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ	ТВЕРДЫЙ СПЛАВ МР4	Сталь 3	1,3
ВОЛОКИ	ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ	МЕТАЛЛОКОРД	1,4 – 1,8
ОАО Минский мотовелозавод (ММВЗ или Мотовело)			
РЕЖУЩИЕ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ЧЕРНОВОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ	ТВЕРДЫЙ СПЛАВ Т15К6	Сталь ШХ15 и сталь 4Х5МФС	3 – 4

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

Заключение. Разработанный процесс термогидрохимической обработки имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности твердого сплава осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие на базе оксидов, а в подслое формируется зона высоких напряжений сжатия, сравнимых с уровнем напряжений, создаваемых методами ППД.

Сравнительные трибологические испытания поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого гидрохимической обработке, показали, что полученные твердосмазочные покрытия на основе наноксидов имеют лучшие антифрикционные свойства, чем покрытия на базе нанокарбидов и нанонитридов.

В результате оптимизации процесса термогидрохимической обработки коэффициент трения стальной поверхности снизился в 3,8 раза, по сравнению с исходным состоянием. Термогидрохимические 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 1035 °С сохраняют очень низкий коэффициент трения ($f = 0,106$) при отсутствии смазки.

Предложен простой и экономичный способ термогидрохимической обработки, использование которого позволяет повысить износостойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3–4,0 раза выше, по сравнению со стандартными.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гаркунов, Д.Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник. – М: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с.

2. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
3. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
4. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т.2 – 135 с.
5. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / Под ред. В.С. Чердиченко. – М.: Омега-Л, 2008. – 752 с.
6. Витязь, П.А. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П.А. Витязь [и др.]. – Мн.: Бел. наука, 2007. – 170 с.
7. Способ упрочнения инструмента из быстрорежущей стали: патент 2023027 (Российская Федерация) / А.А. Шматов, Л.Г. Ворошнин – опубл. 15.11.94 // Бюл. 21, 1994.
8. Shmatov, Alexander A. Low-temperature and high-temperature thermochemical hardening technologies for hard alloys / Alexander A. Shmatov // ESDA 2006: Proceedings of the International Conference – Turin, Italy, 2006. – P. 127–132.
9. 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.
10. Шматов, А.А. Исследование и компьютерное проектирование процесса ТГХО твердого сплава ВК6 / А.А. Шматов, О.В. Жилинский, Т.В. Лактюшина, Г.К. Жавнерко, А.Е. Соломянский // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. – 2010. – №8. – С. 125–133.
11. 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.

12. Бельский, С.Е. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента / С.Е. Бельский, Р.Л. Тофпенец. – Минск: Наука и техника, 1984. – 128 с.
13. Суздаев, И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздаев. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
14. Уманский, Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
15. Горелик, С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М.: Металлургия, 1970. – 107 с.
16. Научные основы повышения малоциклового прочности / Н.А. Махутов [и др.]; под ред. Н. А. Махутова. – М.: Наука, 2006. – 623 с.
17. Бойцов, В.Б. Технологические методы повышения прочности 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 вузов / 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.

Материал поступил в редакцию 04.09.11

SHMATOV A.A., DEVOINO O.G. Thermo-hydrochemical treatment for hard alloys in the special aqueous suspensions of oxides

The structure and properties of the oxide solid-lubricant coatings, obtained by thermo-hydrochemical treatment of hard alloys, are examined in the paper. The process involves (1) the chemical treatment in an special aqueous suspension of nano-sized oxides and (2) subsequent heat treatment. Optimization of the thermo-hydrochemical process was performed. Treatment with optimal regime permits decreasing the friction coefficient of the hard alloy surface in 3,8 as compared with untreated. Developed technology permit increasing the wear resistance of cutting tools by the factor of 1.3 – 4.0 in comparison with traditional its.

УДК 621.941-529.004

Туромша В.И., Мищенко С.Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА И СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЗАНИИ С ПОСТОЯННОЙ ПЛОЩАДЬЮ СЕЧЕНИЯ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ

Введение. При токарной обработке деталей сложной формы методом следа [1] на станках с ЧПУ процесс резания является нестационарным. Он характеризуется непрерывным изменением глубины резания, которая определяется формой заготовки (обычно цилиндром) и контуром готовой детали. Обработка с переменной глубиной встречается также при точении деталей из заготовок с неравномерным припуском, т.е. имеющих значительные отклонения по форме и размерам от заданных значений (например, заготовок, получаемых методом свободнойковки) [2]. Глубина резания при этом определяется сравнением двух виртуальных геометрических моделей. Первая модель представляет собой информационный массив «облако точек», получаемый сканированием заготовки или ее измерением на координатно-измерительной машине. Размерные параметры второй модели определяются конструкторской документацией.

Точение с переменной глубиной t может осуществляться с постоянной величиной подачи, но в этом случае неизбежна потеря производительности, поскольку изменяется нагрузка станка по мощности. В современных системах ЧПУ возможно управление подачей S_o (мм/об) в соответствии с изменением t (мм), например, за счет обеспечения постоянства площади сечения срезаемого слоя K (мм²/об), т.е.

$$K = t \times S_o = const. \quad (1)$$

Для математического моделирования таких процессов обработки деталей необходимым условием является аналитическое определение периода стойкости T и величины износа h_p режущего инструмента. Известные [3] степенные зависимости вида

$$T = C_T t^x S_o^y v^u; \quad h_p = V_h \tau = C_V t^q S_o^m v^m \tau \quad (2)$$

(C_T, C_V, x, y, u, q, m – эмпирические коэффициенты и показатели степени; V_h – скорость изнашивания инструмента (мкм/мин); τ – время резания; v – скорость резания (м/мин)) справедливы для стационарного резания. При нестационарном (переменном) резании

формулы (2) дают большую погрешность вычисления.

Исходные зависимости для определения T и h_p при обработке деталей с переменными t и S_o . В работе [4] для процессов обработки деталей с переменными параметрами режима резания получена математическая модель в общем виде, позволяющая определить T и h_p

$$T = C_T \frac{\tau_k - \tau_n}{\int_{\tau_n}^{\tau_k} \frac{d\tau}{t^x S_o^y v^u}}; \quad h_p = C_V \int_{\tau_n}^{\tau_k} t^q S_o^m v^m, \quad (3)$$

где τ_n и τ_k – соответственно время начала и время конца обработки элементарной поверхности ($\tau = \tau_k - \tau_n$).

При постоянной скорости резания с учетом формулы (1) модель (3) примет вид

$$T = C_T v^u K^y \frac{\tau_k - \tau_n}{\int_{\tau_n}^{\tau_k} t^{y-x} d\tau}; \quad h_p = C_V v^m K^u \int_{\tau_n}^{\tau_k} t^{q-u} d\tau. \quad (4)$$

Для ее решения необходимо установить функцию $t = f(\tau)$ для различных форм обрабатываемой детали, а также определить пределы интегрирования.

Независимо от формы обрабатываемого контура, суммарная площадь сечения срезаемого слоя $\sum K$ за время резания τ равна

$$\sum K = nK\tau,$$

где n – частота вращения обрабатываемой детали (об/мин).

Отсюда можно выразить τ

$$\tau = \sum K / nK. \quad (5)$$

Туромша Вячеслав Иванович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусского национального технического университета.

Мищенко Сергей Николаевич, аспирант кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.