

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

УДК 621.78.001, 621.793.18

*Академик П. А. ВИТЯЗЬ, А. А. ШМАТОВ, О. Г. ДЕВОЙНО***УПРОЧНЕНИЕ ТВЕРДОГО СПЛАВА  
МЕТОДОМ ТЕРМОГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ***Белорусский национальный технический университет, Минск**Поступило 11.06.2012*

**Введение.** Уровень развития современной техники характеризуется высокой интенсивностью эксплуатации инструментов повышенной теплостойкости, особенно твердосплавных. Это требует существенного улучшения их эксплуатационных свойств, что можно достичь формированием в твердом сплаве композиционной структуры с помощью упрочняющей обработки. Наибольший научный и практический интерес в этом плане представляет процесс термогидрохимической обработки (ТГХО), поскольку применим для готовых к эксплуатации инструментов, незначительно меняет их первоначальные размеры, форму и структуру [1–3].

Упрочнение сталей и сплавов обеспечивает им повышение эксплуатационных свойств, и прежде всего конструкционной прочности (КП) [4; 5]. Основными критериями КП являются надежность, долговечность, прочность и жесткость [5]. Для инструментов очень важно иметь максимальную КП. Однако существующий антогонизм критериев прочности и надежности значительно снижает КП. Усиление или «синергизм» этих взаимно противоположных характеристик можно достичь формированием в инструментальных сплавах композиционной структуры (КС). Помимо традиционного подхода, когда КС первоначально создают в композиционных материалах (КМ), из которых потом изготавливают изделия, существуют и нетрадиционные подходы, когда КС формируют в результате упрочняющей обработки самих изделий; и в этом случае инструменты в паре с защитными покрытиями, а также имеющие дискретную или градиентную структуры, рассматривают как своеобразный КМ [6–11].

Долговечность инструментов в первую очередь зависит от износостойкости их поверхности. Согласно настоящим представлениям в области трения и изнашивания [12; 13] 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 в атмосферных условиях. При формировании оксидной пленки определенного состава и структуры можно создать поверхностное упрочнение (эффект Роско) и снизить сопротивление сдвигу при трении (эффект Ребиндера, Киркиндала, теория Берналла, др.); причем эффект Ребиндера наилучшим образом реализуется в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ) [13]. Согласно молекулярно-механической теории трения, повышение износостойкости инструмента можно достичь при выполнении двух основных условий: при высокой твердости поверхности инструмента и низкой прочности ее адгезионной связи с обрабатываемым материалом [12].

Большие перспективы имеют наноструктурированные материалы и покрытия на основе тугоплавких и сверхтвердых материалов, которые обладают сверхпластичностью и облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения; в то же время твердость наноматериалов из тугоплавких соединений возрастает в 2–3 раза [5; 14]. Именно покрытия, сформированные новым

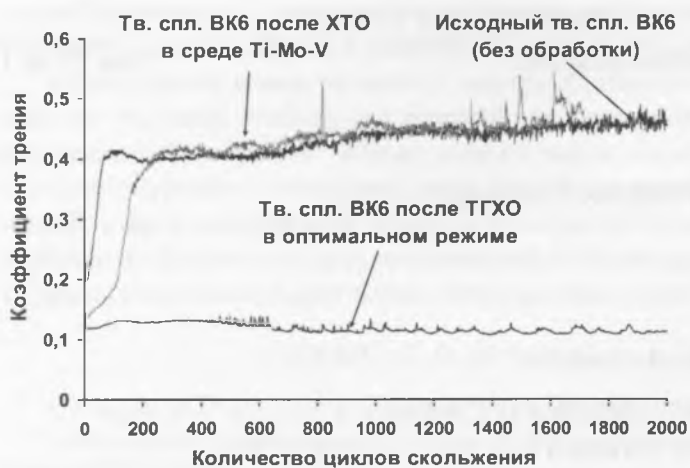


Рис. 1. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения (без смазки) от длительности изнашивания поверхности твердого сплава ВК6 до и после ТГХО в оптимальной вододисперсной среде на основе  $TiO_2 + MoO_3$ . Условия испытаний, проведенных на микротрибометре типа (ИММС, г. Гомель) по схеме «подвижный шарик – неподвижная плоскость»: сухое трение, нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм, скорость 4 мм/с; пара трения: упрочненный твердый сплав ВК6 (плоскость) – сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм)

среде на базе тугоплавких соединений и ПАВ (сульфанола); последующей термической обработки (ТО), включающей нагрев до температуры 130–1030 °С, выдержку в течение 20–60 мин и охлаждение [1; 2].

**Результаты и их обсуждение.** Впервые установлено, что процесс ТГХО имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности твердого сплава осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие; в подслое формируется зона с высокими напряжениями сжатия, сравнимыми с уровнем напряжений, создаваемых методами поверхностной пластической деформации.

Результаты сравнительных трибологических испытаний поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого ГХО, показали, что в условиях сухого трения скольжения и воздушной атмосферы полученные гидрохимические (ГХ) покрытия на основе наноксидов имеют лучшие антифрикционные свойства, чем ГХ покрытия на базе нанокарбидов и нанонитридов, увеличение

методом ТГХО, имеют наноструктуру и обладают твердосмазочными свойствами [1–3]. 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. С помощью ТГХО можно осаждают на различные материалы наноструктурированные покрытия на базе оксидов, сульфидов, карбидов, других тугоплавких соединений и их композиций [1–3].

В настоящей работе исследования проведены на твердых сплавах ВК6 и Т15К6, которые подвергали ТГХО. Этот процесс осуществляли в 2 этапа путем безэлектролизной гидрохимической обработки (ГХО) при температуре 95–100 °С в течение 20–120 мин в специально приготовленной вододисперсной

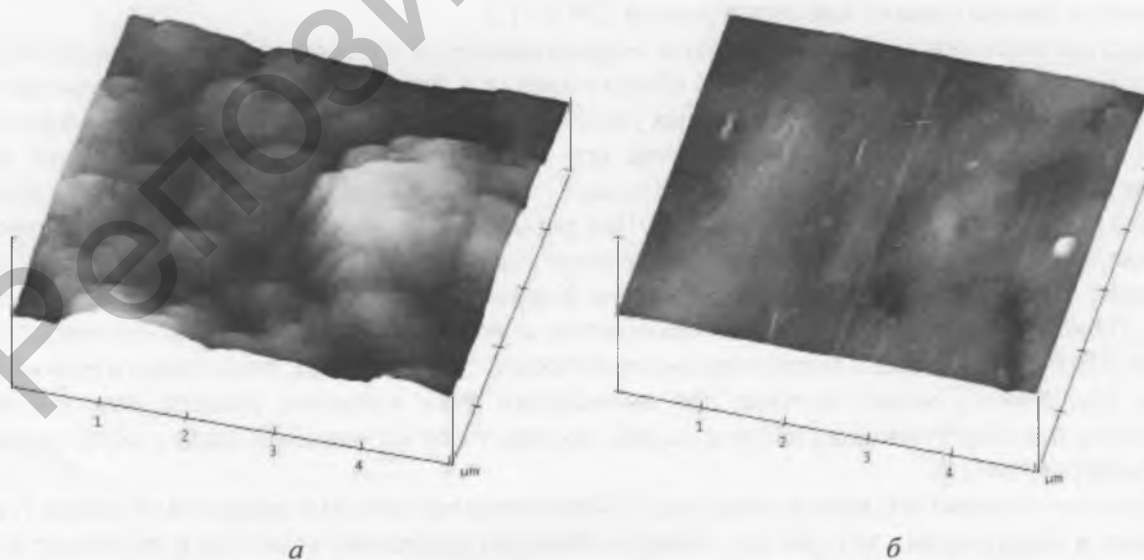


Рис. 2. Морфология поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого ТГХО в оптимальной вододисперсной среде на основе  $TiO_2 + MoO_3$ , до (а) и после (б) испытаний на трение

числа компонентов из тугоплавких соединений в водной насыщающей среде ведет, как правило, к снижению коэффициента трения покрытий [1–3].

С помощью синтез-технологий определен оптимальный режим и состав вододисперсной среды [1]. Обработка твердого сплава ВК6 по оптимальному режиму (ХО при 100 °С, 20 мин в составе  $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$ , затем ТО при 1035 °С, 15 мин) позволила в 3,8 раза снизить коэффициент трения поверхности при сухом скольжении, по сравнению с исходным состоянием (рис. 1). ТГХ покрытия в отличие от известных твердосмазочных покрытий [14] сохраняют минимальные значения коэффициента трения на протяжении всего периода эксплуатации (рис. 1). Эти наноструктурированные покрытия при трении хорошо пластифицируются (рис. 2). Важной особенностью процесса ТГХО является крайне высокая термическая стабильность нанокompозитных структур полученных покрытий, которые после нагрева до 1035 °С сохраняют низкий коэффициент трения ( $f = 0,09$ ) при отсутствии смазки.

С помощью атомно-силового микроскопа Nanoscope 3D изучена морфология и кинетика формирования ТГХ покрытий на твердом сплаве ВК6. ТГХ покрытия имеют сложную структуру поверхности, состоящую из неоднородных по цвету и форме зерен (рис. 3) на основе сложнoлегированных оксидов титана и молибдена с участием карбидов вольфрама матрицы. Эти покрытия имеют столбчатую (волоконистую) структуру, средняя длина волокон составляет 700 нм (рис. 3, а). ТГХ покрытия на твердом сплаве формируются с наноструктурой, состоящей из нанозерен (размером менее 100 нм), или композиционной структурой, состоящей из нанокристаллических и поликристаллических зерен (размером более 100 нм). Первоначально на поверхности

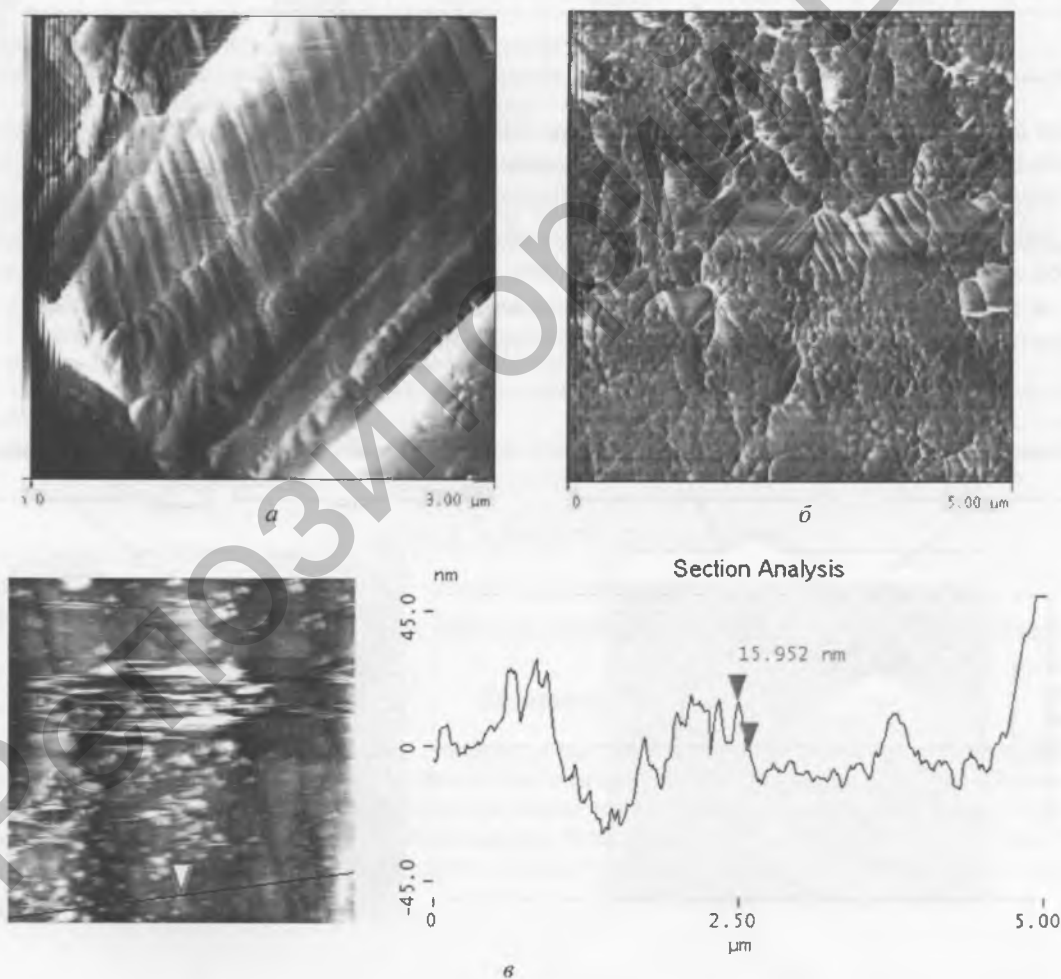


Рис. 3. Структура излома (а), структура поверхности (б) и микрорельеф поверхности, характеризующий наноразмерность зерен (в) покрытия, полученного при ТГХО твердого сплава ВК6 в оптимальной вододисперсной среде на основе  $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$

сплава осаждаются наноразмерные зародыши; с увеличением времени химической обработки эти частицы заполняют поверхность, а затем и пространство, незначительно меняя свои размеры. В результате на подложке формируются высокоорганизованные пленки с сильно развитой зерно-границной поверхностью [15]. Скорость роста ГХ слоев на твердом сплаве составляет 2,5–3 мкм/ч, что в 10 раз быстрее, чем на стали [3]. При последующем нагреве твердого сплава размер зерен в полученных ГХ покрытиях увеличивается; при этом сначала преобладает наноразмерная структура слоев с 25–100 нм зернами, а при температуре выше 500 °С формируется нанокompозитная структура, в которой появляются отдельные зерна размером более 100 нм [2]. Высокие антифрикционные свойства покрытий после нагрева до 1035 °С обусловлены формированием такой КС, в которой оптимально сочетаются размеры и количество нано- и поликристаллических зерен.

Рентгеноструктурные исследования [16] показали (таблица), что после ТГХО твердых сплавов формируются остаточные сжимающие макронапряжения (1-го рода), величина которых в 2–3 раза выше, чем до обработки и сравнима с уровнем напряжений, создаваемых методами пластической деформации (ППД, МГПД и др.) [15]. Микронапряжения (2-го рода) в ТГХ упрочненных твердых сплавах выявлены не были, не отмечено также статических искажений решетки [16].

Результаты рентгеновской съемки твердых сплавов

Материал	Режим обработки	Фаза (линия)	$2\theta_1$ , град	$2\theta_0$ , град	$d_1$ , нм	$d_0$ , нм	$\sigma$ , МПа
Т15К6	без обр.	WC (211)	117,30	117,29	0,90206	0,9020	-120
	ТГХО	[25-1047]	117,26	117,29	0,90212	0,9020	-235
ВК6	без обр.	WC (211)	117,30	117,29	0,90203	0,9020	-71
	ТГХО	[25-1047]	117,25	117,29	0,90209	0,9020	-210

Таким образом, согласно анализу [6–11], при ТГХО формируются два типа КС: структурная композиция «твердосмазочный слой – переходный слой с высокими напряжениями сжатия – твердая матрица» (рис. 4, а), состоящая из макроэлементов (матрица, слой) с различными свойствами; такая структура образуется при выполнении всех режимов ТГХО; нанокompозитная структура самого твердосмазочного покрытия (рис. 4, б), состоящая из оптимально чередующихся нано- и микроэлементов (нано- и поликристаллитов размером менее и более 100 нм); такая структура образуется только после нагрева ГХ покрытия выше 500 °С.

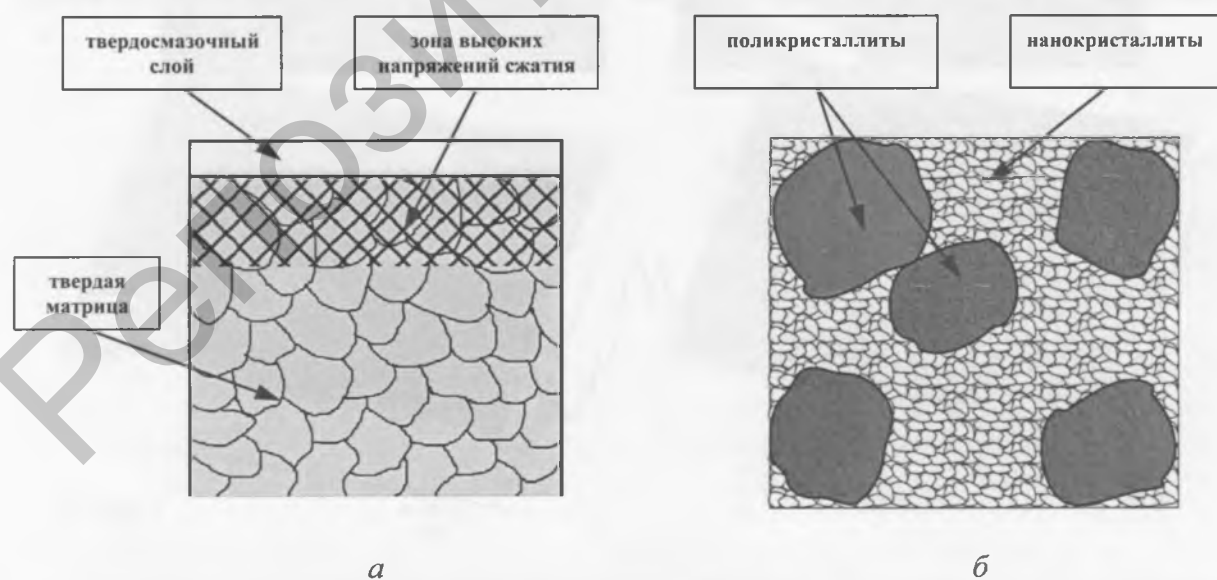


Рис. 4. Схематическое представление композиционных структур, создаваемых при ТГХО твердого сплава: а – КС типа «твердосмазочный слой – переходный слой с высокими напряжениями сжатия – твердая матрица», б – КС, состоящая из оптимально чередующихся нано- и поликристаллитов

**Заключение.** На основании проведенных исследований установлено, что термогидрохимическая обработка твердого сплава ВК6 по оптимальному режиму в вододисперсной среде на основе  $TiO_2 + MoO_3$  и ПАВ позволяет существенно (в 3,8 раза) снизить коэффициент трения твердосплавной поверхности при скольжении по ней подвижного шарика из стали ШХ 15 в условиях отсутствия смазки. Отмечена высокая термическая стабильность нанокompозитных структур полученных покрытий, которые после нагрева до 1035 °С сохраняют низкий коэффициент трения ( $f = 0,09$ ) при отсутствии смазки.

В результате разработана технология безэлектролизного термогидрохимического упрочнения твердого сплава. Производственные испытания показали, что ТГХО в оптимальном составе на базе оксидов титана и молибдена с добавкой ПАВ позволяет увеличить эксплуатационную стойкость различных видов твердосплавных инструментов (режущих пластин и резцов для токарной и фрезерной обработки) в 1,3–4,0 раза по сравнению с необработанными. Причем наивысшие показатели стойкости упрочненных режущих инструментов достигнуты при черновой токарной и фрезерной обработке труднообрабатываемых нержавеющей, жаропрочных и цветных сплавов. Процесс внедрен в Беларуси на предприятиях «МТЗ», «БелАЗ», «Мотовело» и др.

### Литература

1. Шматов А. А. и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. 2010. № 8. С. 125–133.
2. Шматов А. А., Девойно О. Г., Лисовская Ю. О. // Ползуновский вестн. 2012. № 1. С. 362–366.
3. Шматов А. А. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Промышленность. 2012. № 3. С. 82–89.
4. Приходько В. М., Петрова Л. Г., Чудина О. В. Металлофизические основы упрочняющих технологий. М., 2003. – 384 с.
5. Материаловедение: учеб. для вузов / под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. М., 2005. – 648 с.
6. Щерба В. Я., Лисовский А. Л. Новые композиционные материалы. Новополоцк, 2009. – 220 с.
7. Справочник по композиционным материалам / пер. с англ.; под ред. Дж. Любина. М., 1988.
8. Верещака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М., 1986. – 192 с.
9. Антоныч В. С., Ляшенко Б. А., Сорока Е. Б. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 3. С. 28–39.
10. Лыгденев Б. Д. Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-термоциклической обработкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новокузнецк, 2004. – 21 с.
11. Наноструктурные материалы – 2008. (НАНО-2008): материалы Первой междунар. науч. конф. Минск, 2008. – 765 с.
12. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. М., 2007. – 368 с.
13. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. М., 1984. – 264 с.
14. Витязь П. А. Твердосмазочные покрытия в машиностроении. Минск, 2007. – 170 с.
15. Научные основы повышения малоциклового прочностного ресурса / Н. А. Махутов и др.; под ред. Н. А. Махутова. М., 2006. – 623 с.
16. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М., 1970. – 107 с.

*P. A. VITIAZ, A. A. SHMATOV, O. G. DEVOINO*

shmatov@cosmostv.by

### STRENGTHENING OF HARD ALLOY BY THE THERMO-HYDROCHEMICAL TREATMENT METHOD

#### Summary

The composite structure and the antifriction properties of hard alloy subjected to thermo-hydrochemical treatment are examined in the article. The process involves (1) the chemical treatment in an oxide aqueous nano-sized suspension and (2) heat treatment. Optimization of the thermo-hydrochemical process was performed. Treatment with an optimal regime permits decreasing the friction coefficient of the hard alloy surface by a factor of 3.8 as compared with the untreated one. The developed technology permits increasing the wear resistance of hard alloy cutting tools by a factor of 1.3-4.0 in comparison with traditional ones.