

УДК 621.78.001, 621.793.18

А.А. Шматов (Белорусский национальный технический университет, Минск)
E-mail: shmatov@cosmostv.by

Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке твердого сплава

Исследованы композиционная структура и антифрикционные свойства твердого сплава, подвергнутого термогидрохимической обработке (ТГХО). ТГХО включает химическую обработку в оксидной вододисперсной среде и термообработку. В результате оптимизации процесса ТГХО коэффициент трения твердосплавной поверхности снизился в 3,8 раза. Разработанная технология повышает стойкость твердосплавных режущих инструментов в 1,3–4,0 раза по сравнению с традиционными.

Ключевые слова: твердый сплав, инструмент, упрочнение, композиционная структура, твердосмазочное покрытие.

The composite structure and properties of hard alloy, 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 hard alloy surface in 3,8 as compared with untreated. Developed technology permit increasing the wear resistance of hard alloy cutting tools by the factor of 1,3–4,0 in comparison with traditional its.

Keywords: hard alloy, tool, strengthening, composite structure, solid-lubricant coating.

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 в результате упрочняющей обработки. Наибольший научный и практический интерес в этом плане представляет процесс ТГХО, поскольку применим для готовых к эксплуатации инструментов, не изменяет их первоначальные размеры, форму и структуру [1–4].

Большинство авторов [5–9] рассматривают упрочнение как способ "создания условий" для повышения конструкционной прочности (КП), которая представляет собой совокупность эксплуатационных свойств сталей и сплавов. Основными критериями КП являются надежность, долговечность, прочность и жесткость [9]. Для инструмента 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 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 мозаично-дискретную или градиентную структуры, рассматриваются как своеобразный КМ [10–16].

На основании анализа [10–16] установлено, что с помощью упрочняющей обработки сплавов можно создать различные структурные композиции, в которых достигается синергизм ее основных критериев прочности и надежности (рис. 1). Структура КМ, полученная путем обработки, может быть многоуровневая и построена из макроэлементов (слой, матрица), микро- и наноэлементов (зерно, субзерно, частица); при рациональном сочетании этих элементов в композицию комплексно сочетаются их противоположные свойства. На рис. 1 приве-

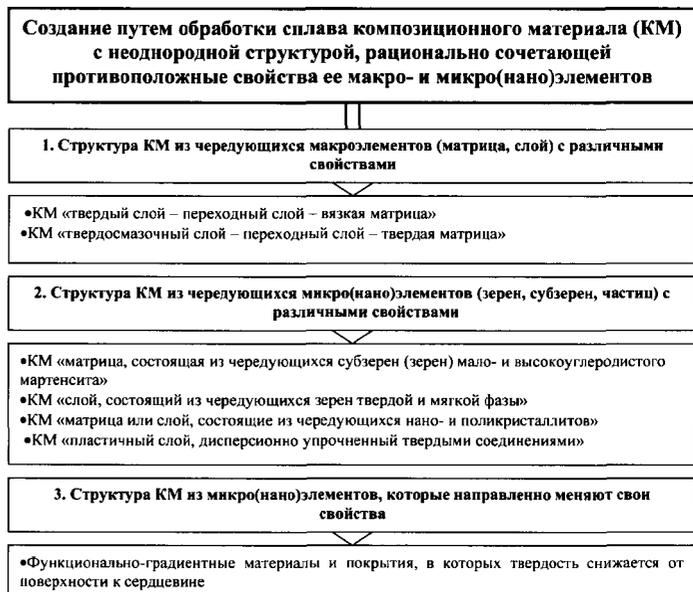


Рис. 1. Классификация композиционных структур, сформированных путем упрочняющей обработки сплавов

дены некоторые практически реализуемые варианты структурных композиций. Отмечены большие перспективы для развития упрочняющих технологий, которые могут сформировать в инструментах композиционные нанокристаллические, градиентные и мозаично-дискретные структуры [9–11, 15, 16].

Долговечность инструмента в первую очередь зависит от износостойкости поверхности. Согласно представлениям в области трения и изнашивания [17–19] 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) [19, 20]. 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 [18, 19].

В результате поверхностного легирования и модифицирования сталей и сплавов можно сформировать наноструктуру на основе тугоплавких и сверхтвердых материалов [1–4, 21]. Наноструктурированные материалы и покрытия облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения; в тоже время твердость наноматериалов из тугоплавких соединений возрастает в 2–3 раза [9, 15]. Именно покрытия, сформированные методом термогидрохимической обработки, имеют наноструктуру и обладают твердосмазочными свойствами (сверхпластичностью) [1–4]. В условиях интенсивной эксплуатации инструмента, когда в зоне трения отсутствует смазка или ее подача ограничена, наилучшим способом снижения коэффициента трения является нанесение твердосмазочных покрытий на рабочую кромку инструмента. ТГХО является наиболее простым и универсальным методом. С его помощью можно создавать наноструктурированные твердосмазочные 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 высокопроизводительного инструмента, испытывающего значительные механические и температурные нагрузки. Однако вопросы, связанные с ТГХО, практически всех инструментальных материалов мало изучены.

Цель работы: 1 – сравнить триботехнические свойства твердосплавной поверхности, подвергнутой ТГХО в вододисперсных средах; 2 – оптимизировать процесс ТГХО твердого сплава; 3 – изучить структуру, химиче-

ский состав и напряженное состояние поверхностных слоев твердого сплава, подвергнутого ТГХО; 4 – апробировать разработанный процесс ТГХО в промышленности.

Методы проведения исследований

Все исследования проведены на твердых сплавах ВК6 и Т15К6, которые подвергали ТГХО. Этот процесс осуществляли в 2 этапа: 1 – безэлектролизная *гидрохимическая обработка* (ГХО) поверхности при температуре 95...100 °С в течение 40...120 мин в вододисперсной среде на базе наноразмерных порошков оксидов; 2 – последующая *термическая обработка* (ТО), включающая нагрев до температуры 130...1050 °С, выдержку в течение 30...60 мин и охлаждение. Вододисперсную среду предварительно готовили по специальной технологии диспергирования грубодисперсных частиц оксидов (размером не более 5 мкм) до наноуровня при добавлении 5%-го водорастворимого поверхностно-активного вещества (сульфанола, др.). Готовым считался рабочий состав с кислотностью РН 6...8, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH₄OH. 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 твердых сплавов проводили в воздушной среде до 250 °С, выше этой температуры – под слоем флюса SnCl₂ или плавкого затвора В₂O₃.

Для изучения структуры твердых сплавов, подвергнутых ТГХО, применяли микроструктурный, рентгеноструктурный, спектральный, рентгеноспектральный 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) [3]. Показатель относительной стойкости упрочненного инструмента 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 и их обсуждение

Процесс ТГХО имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности твердого сплава осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие, в подслое формируется модифицированная зона с полем высоких напряжений сжатия.

Полученные покрытия на твердых сплавах имеют малую толщину (до 1 мкм). 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 [18, 19, 21].

Полученные твердосмазочные покрытия, благодаря формированию нанокристаллической структуры, обладают сверхпластичными свойствами. Результаты (рис. 2, см. с. 3 обложки) сравнительных трибологических испытаний поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого 2 ч химической обработки (без термообработки), позволили сделать заключение, что в условиях сухого трения скольжения и воздушной атмосферы твердосмазочные *гидрохимические* (ГХ) покрытия на основе наноксидов имеют лучшие антифрикционные свойства, чем ГХ-покрытия на базе нанокарбидов и нанонитридов. Поэтому при проведении процесса ТГХО изначально важно сформировать на поверхности твердого сплава оксидосодержащие покрытия.

На основании оптимизации и компьютерного проектирования процесса ТГХО твердого сплава ВК6 с помощью синтеза технологий определены технически оптимальные режимы и составы вододисперсных наноксидных сред [3]. 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, с. 4 обложки).

В результате оптимизации процесса ТГХО выявлена важная эксплуатационная особенность разработанных покрытий. ТГХ оксидные покрытия отличаются от ныне известных наноструктурированных покрытий [9, 15, 21] более высокой термической стабильностью: даже после

нагрева до 1035 °С и выдержки в течение 10 мин полученные покрытия (см. рис. 3) сохраняют очень низкий коэффициент трения ($f = 0,106$).

Для инструмента, у которого место контакта с обрабатываемой деталью меняется со временем [22], важно на протяжении всего периода эксплуатации иметь не только минимальные, но и неизменные значения коэффициента трения. Таким требованиям отвечают ТГХ-покрытия; и в этом они имеют преимущества перед известными твердосмазочными покрытиями, у которых сначала коэффициент трения высокий, а затем он медленно снижается по мере приработки покрытий, причем с большой амплитудой колебаний [4, 21].

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

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

Структурные исследования. Такие исследования в работе были проведены на твердосплавных образцах, упрочненных ТГХО в оптимальной вододисперсной среде на основе оксидов $TiO_2 + MoO_3$.

С помощью атомно-силового микроскопа "Nanoscope 3D" изучали морфологию и кинетику формирования покрытий сначала в результате ГХ-обработки твердого сплава ВК6 в оптимальном вододисперсном составе, а затем после нагрева до температур от 100 до 1050 °С. ТГХ-покрытия на твердом сплаве ВК6 имеют сложную структуру поверхности, состоящую из неоднородных по цвету и форме зерен (рис. 5) на основе комплексно легированных оксидов. Эти покрытия имеют столбчатую (волоконистую) структуру, которая лучше выявляется на толстых слоях, поскольку средняя длина волокон составляет

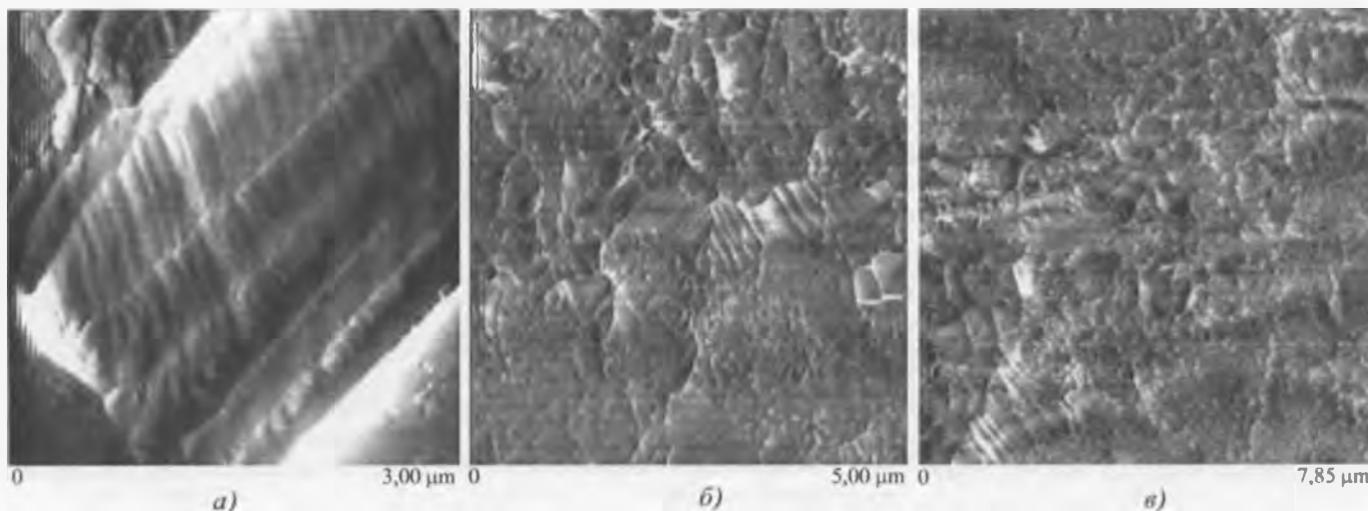


Рис. 5. Структура излома (а) и микрорельеф (б, в) поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого ТГХО в оптимальной вододисперсной среде на основе $TiO_2 + MoO_3$ (при разном увеличении)

Таблица 1

Влияние нагрева после ГХО твердого сплава ВК6 на размер зерен в покрытии

Температура нагрева ГХ 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

700 нм (рис. 5, а). ТГХ-покрытия на твердом сплаве, так же как на стали [4], формируются с нано- или наноконструктурой. Первоначально на поверхности сплава осаждаются зародыши размером 16 нм; с увеличением времени химической обработки эти частицы заполняют поверхность, а затем и пространство, незначительно меняя свои размеры. В результате по принципу "свободного падения апельсинов (кластеров)" [23] на подложке формируются высокоорганизованные пленки с сильно развитой зернограничной поверхностью. Скорость роста гидрохимических слоев на твердом сплаве составляет 2,5...3 мкм/ч. При последующем нагреве твердого сплава ВК6 размер зерен в полученных ГХ-покрытиях увеличивается с повышением температуры (табл. 1); при этом сначала преобладает наноразмерная структура слоев, а выше 500 °С формируется нанокомпозитная структура, в которой появляются отдельные зерна (размером более 100 нм). Отмеченные ранее высокие антифрикционные свойства покрытий на твердом сплаве после высокотемпературного нагрева до 1030 °С обусловлены формированием такой композиционной (нанополикристаллической) структуры, в которой оптимально сочетаются размеры и количество нано- и поликристаллических зерен.

Вододисперсная насыщающая среда модифицирует керамический твердый сплав в 10 раз быстрее, чем сталь [4]: толщина твердосмазочного покрытия на сплаве ВК6 после 2 ч ГХО составила 6 мкм, при этом кластерные ор-

ганические соединения проникают в твердосплавную режущую пластину на всю толщину, 5 мм (рис. 6). Наличие органических соединений на базе ПАВ и оксидов TiO_2+MoO_3 определяли с помощью фокусированного пучка ионов Ga на установке "НаноФаб-100", оснащенной модулями сканирующей зондовой микроскопии. Наибольшая концентрация органических соединений (см. рис. 4 – светлые пятна) сосредоточена на поверхности твердосплавного образца (на глубине до 150 мкм) в виде скоплений частиц неправильной формы размером 1...15 мкм. В результате травления поверхностных слоев твердого сплава высокоэнергетичными ионами Ga при увеличении ($\times 7260$) выявлена слоистая структура органических образований (см. рис. 6), которые преимущественно сосредоточены на границах карбидных фаз и порах твердосплавной основы.

Результаты спектрального (табл. 2) и рентгеноспектрального анализов (рис. 7) свидетельствуют о совместном легировании титаном и молибденом поверхности твердого сплава при ТГХО в вододисперсном составе на основе TiO_2+MoO_3 . Отмечено, что при ТГХО формируются дискретные структуры сложнолегированных оксидов с участием карбидов основы. Химический состав полученных ГХ-покрытий содержит не только элементы водной насыщающей среды (Ti, Mo), но и элементы твердосплавной основы (C, W). Однако рентгеновским анализом не установлен фазовый состав ТГХ-покрытий, поскольку их наноструктура считается рентгеноаморфной [16, 24].

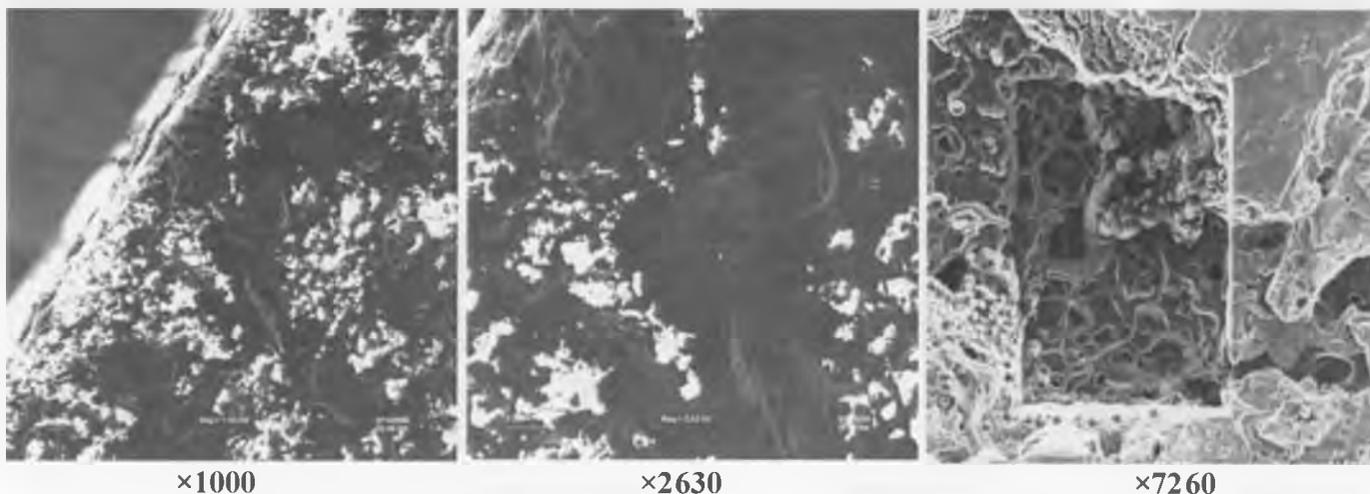


Рис. 6. Распределение органического соединения (светлый фон) в твердом сплаве ВК6, подвергнутого ТГХО в оптимальной вододисперсной среде на основе TiO_2+MoO_3 (при разном увеличении)

Результаты спектрального анализа поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого ТГХО в оптимальной вододисперсной среде на основе TiO₂+MoO₃

Элемент	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element, %	Sigma, %	Atomic, %
C	ED	1,154	4,38	56,21	0,09	66,25
O	ED	0,622	2,24	36,58	0,07	32,37
Na	ED	1,057	1,76	0,63	0,01	0,38
Al	ED	0,951	1,64	0,15	0,01	0,08
Ti	ED	0,773	1,28	0,24	0,03	0,07
Mo	ED	0,739	1,66	5,02	0,10	0,74
W	ED	0,722	1,88	1,07	0,05	0,08
Всего				100,00		100,00

В результате ТГХО твердого сплава формируются два типа композиционных структур:

– структура композиции "твердосмазочный слой – переходный слой – твердая матрица", состоящая из макроэлементов (матрица, слой) с различными свойствами, такая структура образуется при выполнении всех режимов ТГХО;

– нанокomпозитная структура самого твердосмазочного покрытия, состоящая из оптимально чередующихся нано- и микроэлементов (нано- и поликристаллитов), такая структура образуется только после нагрева ГХ покрытия выше 500 °С.

Напряженное состояние. Рентгеноструктурные исследования показали, что после ТГХО твердых сплавов Т15К6 и ВК6 формируются остаточные макронапряже-

ния (1-го рода). Все съемки выполнялись на дифрактометре "ДРОН-3.0" в режиме сканирования по точкам в монохроматизированном CuK_α-излучении. Расчет макронапряжений в сплавах осуществляли по методике одной съемки, как сумму напряжений σ₁, σ₂ по формуле [25, 26]

$$\sigma_1 + \sigma_2 = E / \mu [(d_1 - d_0) / d_0],$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; d₀ – межплоскостное расстояние для ненапряженного материала; d₁ – среднее межплоскостное расстояние для напряженного материала в направлении, перпендикулярном к поверхности образца.

В результате установлено (табл. 3), что величина макронапряжений сжатия ТГХ обработанных твердых сплавов

возрастает в 2–3 раза, по сравнению с необработанными и сравнима с уровнем напряжений, создаваемых методами пластической деформации (ППД, МГПД и др.) [27, 28]. Если при ППД сплавов создается плотность дислокаций, равная 10¹⁰...10¹² см⁻² [9, 29], то при ТГХО твердых сплавов число дислокаций существенно не меняется, по сравнению с исходным состоянием (см. табл. 3).

Микронапряжения (2-го рода) в ТГХ упрочненных твердых сплавах выявлены не были, не отмечено также статических искажений решетки [25, 26].

Если растягивающие напряжения способствуют самопроизвольному зарождению и распространению трещин, то зональные сжимающие напряжения благоприятно уравнивают разрушающие напряжения,

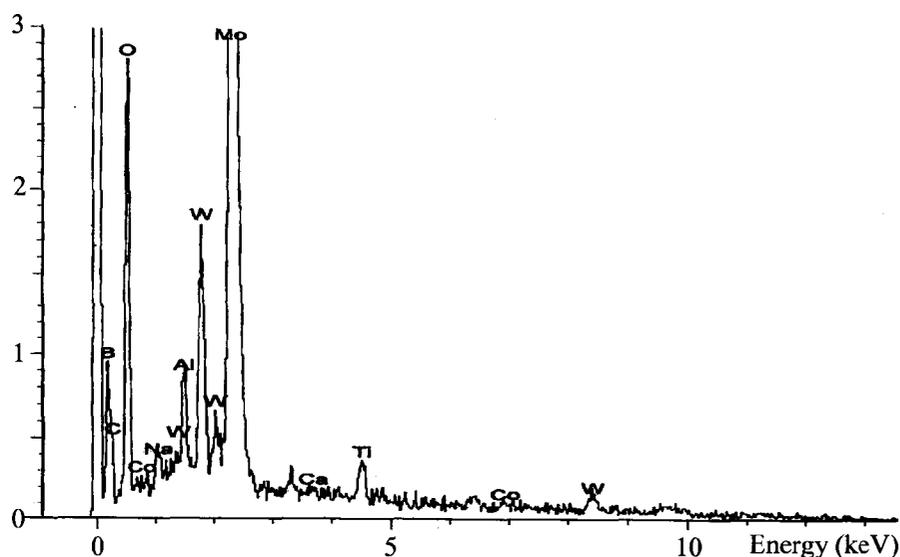


Рис. 7. Результаты рентгеноспектрального анализа поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого ТГХО в оптимальной вододисперсной среде на основе TiO₂+MoO₃

Таблица 3

Результаты рентгеновской съемки твердых сплавов

Материал	Режим обработки	Фаза (линия)	$2\theta_L, ^\circ$	$2\theta_0, ^\circ$	$d_L, \text{нм}$	$d_0, \text{нм}$	$\sigma, \text{МПа}$	Плотность дислокаций, 10^9см^{-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

возникающие при эксплуатации твердосплавных инструментов, увеличивают их выносливость и живучесть.

Применение результатов исследований. Результаты производственных испытаний свидетельствуют о том, что ТГХО с использованием разработанных вододисперсных составов позволяет увеличить эксплуатацион-

ную стойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3–4,0 раза по сравнению с необработанными (табл. 4). Причем наивысшие показатели стойкости упрочненных режущих инструментов из твердых сплавов достигнуты при черновой токарной и фрезерной обработках сталей и цветных сплавов. Процесс вне-

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			2,0
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 М1Р0	1,6...2,0
Режущие пластины для черновой токарной обработки	Твердый сплав РТ40	Сталь 20	2,6...3,3
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав МР4	Ст 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	Стали ШХ15 и 4Х5МФС	3...4

дрен в Беларуси на предприятиях МТЗ, БелАЗ, Мотовело и др.

Выводы

1. Разработанный процесс ТГХО имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности твердого сплава осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие, а в подслое создается модифицированная зона с высокими напряжениями сжатия, сравнимыми с уровнем напряжений, создаваемых методами поверхностной пластической деформации.

2. При ТГХО формируются два типа композиционных структур:

– структура композиции "твердосмазочный слой – переходный слой – матрица", состоящая из макроэлементов (матрица, слой) с различными свойствами;

– наноконструктивная структура твердосмазочного покрытия после его нагрева выше 500 °С, в которой оптимально чередуются нано- и микроэлементы (нано- и поликристаллиты).

3. В результате оптимизации процесса ТГХО коэффициент трения твердосплавной поверхности при сухом скольжении снизился в 3,8 раза по сравнению с исходным состоянием. Отмечена высокая термическая стабильность наноконструктивных структур полученных покрытий, которые после нагрева до 1035 °С сохраняют низкий коэффициент трения ($f = 0,106$) при отсутствии смазки.

4. Разработан простой безэлектролизный способ ТГХО, который позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3–4,0 раза в сравнении со стандартными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Shmatov A.A.** Low-temperature and high-temperature thermochemical hardening technologies for hard alloys // ESDA 2006: Proceedings of the International Conference. Turin. Italy. 2006. P. 127–132.

2. **Шматов А.А.** Нанотехнология низкотемпературного термохимического упрочнения готового к эксплуатации инструмента // Наноструктурные материалы: получение, свойства, применение: сб. научн. тр. Минск. 2009. С. 221–230.

3. **Исследование** и компьютерное проектирование процесса ТГХО твердого сплава ВК6 / А.А. Шматов и др. // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. 2010. № 8. С. 125–133.

4. **Шматов А.А., Жавнерко Г.К.** Твердосмазочные тугоплавкие покрытия, полученные на сталях методом термогидрохимической обработки // Порошковая металлургия (Минск). 2011. № 34. С. 244–253.

5. **Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П.** Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

6. **Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В.** Металлофизические основы упрочняющих технологий. М.: Машиностроение, 2003. 384 с.

7. **Тушинский Л.И., Плохов А.В.** Исследование структуры и физико-химических свойств покрытий. Новосибирск: Наука, 1980. 178 с.

8. **Савицкий Е.М., Клячко В.С.** Металлы космической эры. М.: Металлургия, 1978. 120 с.

9. **Материаловедение:** учебник для вузов / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.

10. **Верещака А.С., Третьяков И.П.** Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.

11. **Щерба В.Я., Лисовский А.Л.** Новые композиционные материалы. Новополоцк: ПГУ, 2009. 220 с.

12. **Справочник по композиционным материалам:** пер. с англ. / Под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. Т. 1. 447 с. Т. 2. 581 с.

13. **Антонюк В.С., Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б.** Выбор параметров покрытий с дискретной структурой при упрочнении поверхности режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 3. С. 28–39.

14. **Лыгденов Б.Д.** Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-термоциклической обработкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07. Новокузнецк, 2004. 21 с.

15. **Материаловедение.** Технология конструкционных материалов / под ред. В.С. Чередниченко. М.: Омега-Л, 2008. 752 с.

16. **Наноструктурные материалы–2008.** (НАНО-2008): материалы Первой междунар. науч. конф. Мн.: Белорус. наука, 2008. 765 с.

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

18. **Мышкин Н.К., Петроковец М.И.** Трение, смазка, износ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.

19. **Польцер Г., Майсснер Ф.** Основы трения и изнашивания. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.

20. **Фридман Я.Б.** Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. Т. 2. 135 с.

21. **Витязь П.А.** Твердосмазочные покрытия в машиностроении. Минск: Бел. наука, 2007. 170 с.

22. **Бельский С.Е., Тофпенек Р.Л.** Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента. Минск: Наука и техника, 1984. 128 с.

23. **Суздаев И.П.** Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: Ком-Книга, 2006. 592 с.

24. **Гусев А.И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2009. 416 с.

25. **Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия** / Я.С. Уманский и др. М.: Металлургия, 1982. 632 с.

26. **Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А.** Рентгенографический и электроннооптический анализ. М.: Металлургия, 1970. 107 с.

27. **Научные основы** повышения малоциклового прочностности / Н.А. Махутов и др.; под ред. Н.А. Махутова. М.: Наука, 2006. 623 с.

28. **Бойцов В.Б., Чернявский А.О.** Технологические методы повышения прочности и долговечности. М.: Машиностроение, 2005. 128 с.

29. **Фетисов Г.П., Гарифуллин Ф.А.** Материаловедение и технология металлов. М.: Изд-во Оникс, 2007. 624 с.