

УДК 621.78.001, 621.81

**ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТГХО  
ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК6***канд. техн. наук А.А. ШМАТОВ**(Белорусский национальный технический университет, Минск);**канд. техн. наук О.В. ЖИЛИНСКИЙ**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);**канд. техн. наук Т.В. ЛАКТЮШИНА**(Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, Минск);**канд. хим. наук Г.К. ЖАВНЕРКО, А.Е. СОЛОМЯНСКИЙ**(Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск)*

*Приведены результаты исследования триботехнических свойств твердосмазочных покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 (94 % WC, 6 % Co) в результате термогидрохимической обработки (ТГХО). Выполнена оптимизация насыщающего состава и температурно-временных параметров процесса ТГХО по коэффициенту трения полученных покрытий. Используя математические модели, построены диаграммы «параметры процесса – свойство». Разработан простой и экономичный способ термогидрохимической обработки твердых сплавов, использование которого позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов твердосплавного режущего инструмента по сравнению со стандартным. Обработка по оптимальному режиму ТГХО позволяет в условиях отсутствия смазки снизить коэффициент трения поверхности твердого сплава в 3,6...4,0 раза по сравнению с необработанным.*

**Введение.** Уровень развития современной техники характеризуется высокой интенсивностью эксплуатации инструментов и широким применением сложнотермостойких и других труднообрабатываемых сталей и сплавов для изготовления деталей машин и узлов. Это требует применения, во-первых, инструментов на основе материалов с высокими и даже сверхвысокими эксплуатационными свойствами, во-вторых, упрочняющих технологий, в том числе технологий нанесения на поверхность инструментов антифрикционных твердосмазочных покрытий.

Согласно современным представлениям в области трения и изнашивания [1 – 8] 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 твердого тела. При формировании оксидной пленки определенного состава и структуры можно создать поверхностное упрочнение (эффект Роско) и снижение сопротивления сдвигу при трении (эффект Ребиндера); причем эффект Ребиндера реализуется только в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ). Согласно вакансионно-диффузионному и адгезионно-деформационному механизмам трения повышения износостойкости твердого тела можно достичь при сочетании вышеназванных эффектов – при высокой твердости его поверхности и низкой прочности адгезионной связи.

Среди различных способов получения твердосмазочных покрытий следует выделить методы, которые позволяют сформировать наноструктуру на основе антифрикционных материалов [8 – 15]. 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 [6]. Наибольший интерес в этом аспекте представляют твердосмазочные покрытия с наноструктурой, полученные методом термогидрохимической обработки (ТГХО) [9 – 15]. Данные покрытия можно наносить на готовые к эксплуатации инструменты, поскольку в результате ТГХО сохраняются не только первоначальная форма и размеры инструментов, а также их исходная структура. При этом максимальная температура ТГХО не превышает температуру эксплуатации инструментов или начала разупрочняющих превращений в инструментальных материалах, в частности, для углеродистых сталей она не выше 150 °С, для быстрорежущих сталей – не выше 560 °С, для твердых сплавов – не выше 1050 °С. С другой стороны, наилучшим способом снижения коэффициента трения рабочей кромки инструментов в жестких и даже катастрофических условиях их эксплуатации, когда в зоне трения отсутствует смазка или ее подача ограничена, является нанесение твердосмазочных покрытий. Термогидрохимическая обработка 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 и др.), которые благодаря их высокой твердости, износостойкости и теплостойкости широко используются для изготовления различных видов режущих и штамповых инструментов. Однако вопросы, связанные с термогидрохимической обработкой практически всех инструментальных материалов мало изучены.

Помощь исследователю при трудоемком выборе оптимального варианта проведения процесса ТГХО инструментальных материалов могут оказать математические методы планирования экспериментов, которые позволяют получать максимум информации при минимуме затрат.

В материаловедении традиционно решают прямые задачи, когда на основании минимального количества экспериментов, проведенных по заранее заданным температурно-временным режимам (согласно плану экспериментов) определяют свойства материала, затем создают математические модели, описывающие влияние факторов, и с помощью графической интерпретации выбирают оптимальные параметры процесса [16]. Но такой подход не может решить всего комплекса вопросов, возникающих при проектировании технологии, поскольку функционирование любой технологической системы (в данном случае таковой является технология ТГХО твердого сплава ВК6) происходит в условиях постоянного случайного изменения значений параметров системы под влиянием различных внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Сами технологические системы как объекты проектирования обладают рядом специфических особенностей: многокритериальностью, многопараметричностью, стохастичностью (рассеивание параметров), наличием нелинейных внутрисистемных связей и т.д. При исследовании, проектировании и освоении таких объектов требуется решение не только прямых, но и обратных задач, когда исследователь заранее задает комплекс необходимых свойств материала и с помощью компьютерного моделирования находит оптимальные температурно-временные параметры процесса. Данный методологический подход, получивший название многомерного проектного синтеза технологической системы, успешно применяется при разработке новых технологий и материалов [15, 17 – 20].

Целью данной работы исходя из вышеизложенного явились исследование и компьютерное проектирование технологии ТГХО твердого сплава ВК6 с применением метода многомерного проектного синтеза технических объектов, материалов и технологий.

**Объекты и методика исследований.** Термогидрохимической обработке подвергали твердый сплав ВК6, который широко используется на практике для черного точения, фрезерования, рассверливания, зенкерования чугунов, жаропрочных и цветных сплавов и неметаллических материалов [6, 7]. Сам процесс ТГХО осуществляли путем проведения двух операций:

- гидрохимической обработки (ГХО) поверхности инструмента при температуре 95...100 °С в течение 10...120 минут в специально приготовленной водной суспензии на базе ультра- и наноразмерных порошков оксидов титана и молибдена;
- последующей термической обработки (ТО) при нагреве в защитной (безокислительной) среде до температуры 1000...1050 °С, выдержке в течение 10 минут и охлаждении.

Специальную водную суспензию предварительно готовили по специальной технологии путем последовательного введения и механического смешивания ультра- и наноразмерных оксидов металлов в определенном соотношении и добавлении 5 % активатора процесса: водорастворимого сульфанола (ПАВ). Готовым считался рабочий состав с кислотностью рН 6...8, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения  $\text{NH}_4\text{OH}$ .

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 минуты. После каждой операции химической обработки образцы промывали в воде.

Для определения триботехнических характеристик твердосмазочных термогидрохимических (ТГХ) покрытий на микротрибометре (рис. 1) применяли образцы стандартных твердосплавных режущих пластин.

При проектировании технологического процесса ТГХО твердого сплава ВК6 применяли синтез-технологии метода многомерного проектного синтеза технологических объектов, материалов и технологий в виде базовой компьютерной программы СИНТЕЗ МК [17].

Предлагаемый метод позволяет оперировать не только математическими, но и техническими критериями оптимальности. Для реализации процедур многомерного проектного синтеза технологической системы при проведении ТГХО твердого сплава ВК6 использован комплекс новых методов, наиболее значимыми из которых являются:

- метод решения обратных многокритериальных задач;
- метод компьютерного выбора технически оптимального варианта;

- метод выделения областей устойчивости исследуемой технологической системы в многомерном пространстве технологических параметров;
- метод построения графического изображения состояний технологической системы.

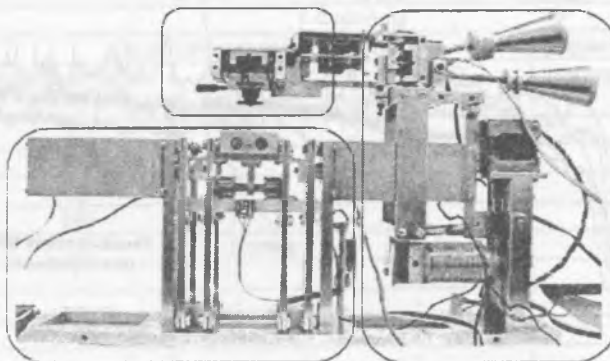


Рис. 1. Микротрибометр возвратно-поступательного типа с максимальной прилагаемой нагрузкой 1 Н (производства ИММС, г. Гомель, Беларусь)

Метод многомерного проектного синтеза технологической системы в отличие от известных методов [16] имеет лучшие возможности и позволяет:

- выбирать технически оптимальный вариант, обладающий наибольшей устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов производства;
- одновременно решать обратные многокритериальные задачи – выделение в пространстве состояний областей устойчивости, где «существуют» варианты материала с заданными свойствами и выбор технически оптимального варианта технологической системы в одной из областей устойчивости при обеспечении требуемого уровня воспроизводимости свойств материала;
- выбирать в пространстве технологических параметров область устойчивого состояния системы, в которой одновременно достигаются и стабильно воспроизводятся заданные свойства материала.

**Результаты проектирования технологии ТГХО твердого сплава ВК6.** Для достижения этого твердый сплав подвергали гидрохимической обработке в кипящей вододисперсной суспензии на основе  $TiO_2-MoO_3$  с добавлением 5 % ПАВ (сульфанол) в течение 10...30 минут, а затем осуществляли его нагрев до температуры 1000...1050 °С, поскольку в таких условиях формируются покрытия с наилучшими антифрикционными свойствами (рис. 2). Причем оптимальные для стали [15] время гидрохимической обработки (1...2 ч) и температура термообработки (100...200 °С) не обеспечивают значительного снижения коэффициента трения для твердого сплава (рис. 2, а). Структурный анализ поверхности ТГХ упрочненного твердого сплава ВК6 свидетельствует о том, что полученные наноструктурированные покрытия при трении хорошо пластифицируются (рис. 3). При оптимизации процесса варьировали только температуру и время гидрохимической обработки, долевое содержание основного компонента химически активной среды и температуру термообработки.

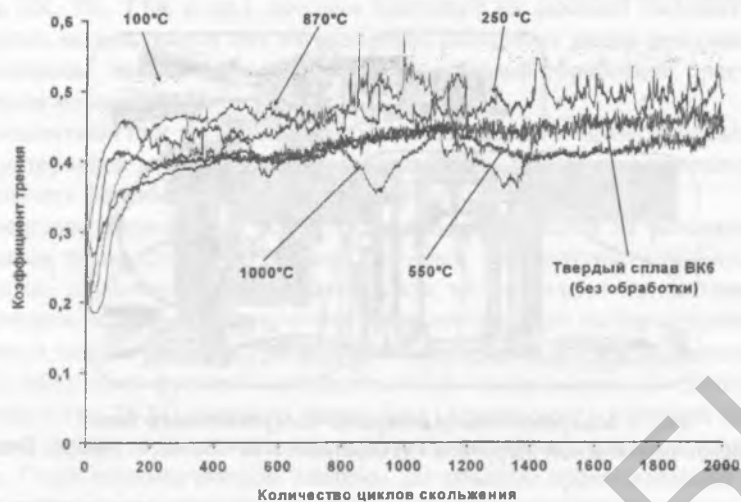
В таблице 1 представлены результаты триботехнических испытаний ТГХ упрочненного твердого сплава ВК6, полученные при реализации 11 опытов плана экспериментов [16]. На основании данных этой таблицы рассчитаны линейные и нелинейные математические модели, описывающие влияние варьируемых параметров процесса на коэффициент трения ТГХ покрытий. Однако адекватным признана только нелинейная математическая модель следующего вида:

$$Y_1 = -0,223 - 12,14 \cdot 10^{-4} X_1 - 20,84 \cdot 10^{-4} X_2 - 18,34 \cdot 10^{-4} X_3 + 9,59 \cdot 10^{-4} X_4 - 9,62 \cdot 10^{-7} X_1^2 + 6,93 \cdot 10^{-5} X_2^2 - 4,86 \cdot 10^{-7} X_4^2 + 2,08 \cdot 10^{-5} X_1 X_3 - 1,04 \cdot 10^{-5} X_2 X_3,$$

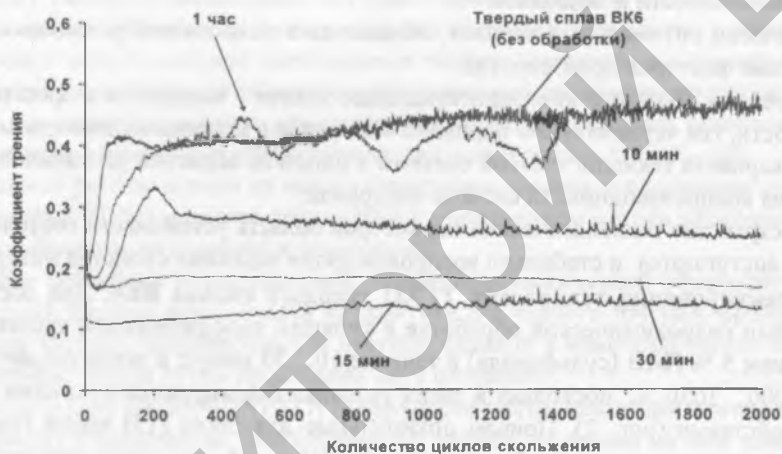
где  $Y_1$  – коэффициент трения;  $X_1$  – температура химической обработки;  $X_2$  – время химической обработки;  $X_3$  – доля  $MoO_3$  в смеси оксидов;  $X_4$  – температура отпуска.

Из-за многокритериальности, стохастичности и нелинейности технологической системы «процесс ТГХО твердого сплава ВК6» прогнозирование её поведения усложняется. У каждого реального объекта значения параметров отличаются от расчетных и случайным образом распределены в поле рассеивания. Вследствие этого нет гарантии полного попадания точек оптимизации реальной системы в область устойчивости, т.е. не всегда можно улучшить свойства материала до заданного уровня свойств. Чтобы такого не произошло, при проектировании технологического процесса предусмотрен определенный запас

устойчивости системы, который позволяет избежать ухудшения качества функционирования системы по критерию воспроизводимости свойств материала.



а)



б)

Рис. 2. Влияние параметров процесса ТГХО

на коэффициент трения твердого сплава ВК6 при сухом трении скольжения.

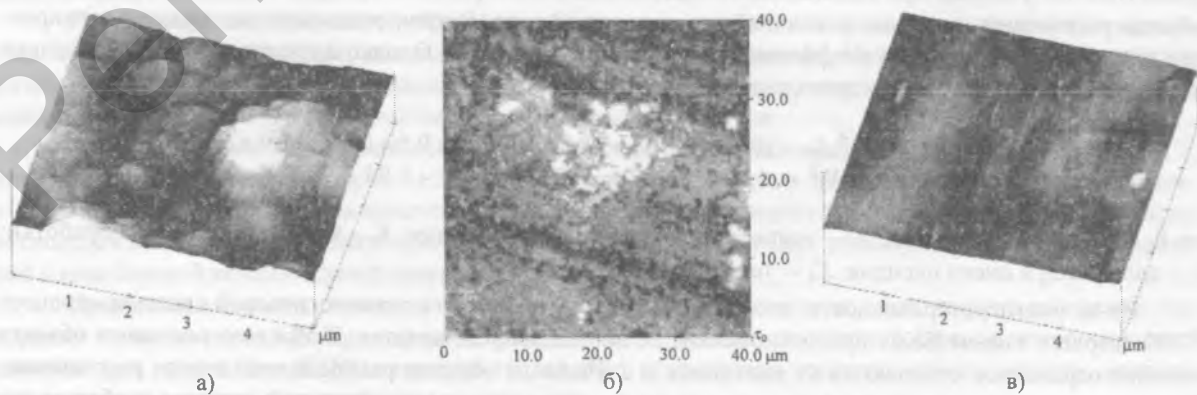
Режим ТГХО: состав водной среды для ХО на основе  $TiO_2 + MoO_3$ ;

а – кинетика по температуре термообработки ( $\tau = 10$  мин) при ГХО  $T = 100^\circ C$ ,  $\tau = 1 \dots 2$  ч;

б – кинетика по времени гидрохимической обработки ( $T = 100^\circ C$ ) при ТО  $T = 1000^\circ C$ ,  $\tau = 10$  мин;

условия испытаний: 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)



а)

б)

в)

Рис. 3. Морфология поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого ТГХО, до (а, б) и после испытаний на трение (в) режим ТГХО:

ХО в оптимальном составе  $TiO_2 - MoO_3$  при  $T = 100^\circ C$ ,  $\tau = 15$  мин; ТО при  $T = 1000^\circ C$ ,  $\tau = 10$  мин

Таблица 1

Результаты исследования коэффициента трения покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО в вододисперсном составе на основе  $TiO_2-MoO_3$

Номер опыта	Факторы			Термообработка температура $T$ , °C	Параметры оптимизации Коэффициент трения, $f$
	Гидрохимическая обработка				
	температура $T$ , °C	время $\tau$ , мин	доля $MoO_3$ в смеси оксидов, %		
Условное обозначение	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1$
Основной уровень (0)	95	20	50	1025	
Интервал варьирования	5	10	25	25	
Верхний уровень (+1)	100	30	75	1050	
Нижний уровень (-1)	90	10	25	1000	
1	+	+	+	+	0,105
2	-	+	+	-	0,121
3	+	-	+	+	0,107
4	-	-	+	+	0,110
5	+	+	-	+	0,108
6	-	+	-	-	0,135
7	+	-	-	-	0,114
8	-	-	-	+	0,113
9	0	0	0	0	0,108
10	0	0	0	0	0,109
11	0	0	0	0	0,111

При традиционной методологии оптимизации технологических параметров системы решения задач технологического проектирования системы не совсем корректны, поскольку процессы рассматриваются как детерминированные, т.е. проходящие при соблюдении точных значений параметров технологической системы. В действительности детерминированных систем не существует, так как значения параметров реальных технологических систем всегда являются случайными, а сами системы стохастическими. Выбор технически оптимального варианта ТГХО твердого сплава ВК6 осуществляли методами компьютерного проектирования технологических систем, которые предназначены для решения нелинейных и стохастических задач при наличии взаимосвязанных, часто противоречивых требований к свойствам материала и показателям качества системы. Компьютерное проектирование технологии ТГХО твердого сплава ВК6 с помощью программы СИНТЕЗ МК осуществляли в несколько этапов. Результаты выбора оптимального варианта изучаемой технологической системы сведены в таблицы 2, 3.

Таблица 2

Оптимальные параметры процесса ТГХО твердого сплава ВК6 и поля их рассеивания

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

Таблица 3

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

При решении обратной многокритериальной задачи были заданы желаемые уровни показателей свойств твердосмазочных покрытий, полученных ТГХО твердого сплава ВК6 (табл. 4).

Таблица 4

Заданные границы свойства покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО в вододисперсном составе на основе  $TiO_2-MoO_3$

Наименование желаемого показателя свойств	Минимальное значение	Максимальное значение
Коэффициент трения, $f$	0,10	0,11

Результаты виртуальных испытаний работоспособности системы в условиях влияния дестабилизирующих факторов производства приведены в таблице 5.

Таблица 5

Определение запаса работоспособности технологической системы по входным параметрам

Наименование параметра процесса	Значение параметра	Значение производственного допуска	Поле производственного допуска	Коэффициент работоспособности
Температура гидрохимической обработки, °С	100	± 1	2	4,5
Время гидрохимической обработки, мин	19	± 1	2	5,0
Доля MoO <sub>3</sub> в смеси оксидов, %	59	± 1	2	14,0
Температура термообработки, °С	1035	± 5	10	2,8

Для графической интерпретации результатов, полученных при решении задач исследования и проектирования технологии ТГХО твердого сплава ВК6, построены дискретные портреты (рис. 4).

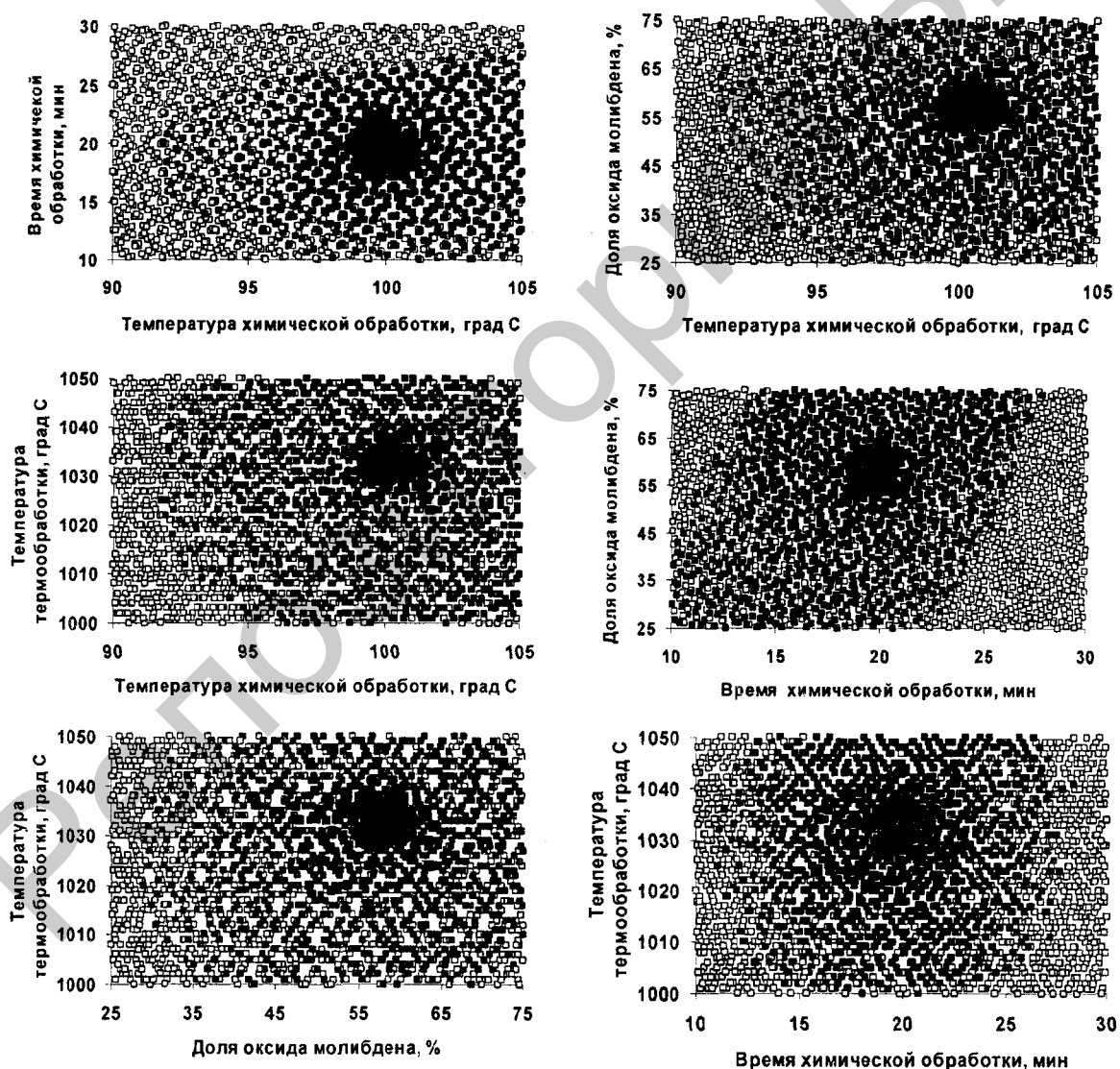


Рис. 4. Дискретные портреты виртуального пространства технологической системы процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсном составе на основе TiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub>:

- ◆ – вариант системы, обеспечивающий заданные свойства твердого сплава ВК6;
- ◇ – вариант системы, не обеспечивающий заданные свойства твердого сплава ВК6

В результате решения задачи проектирования технологии ТГХО твердого сплава ВК6 установлены фактические показатели основного его триботехнического свойства (табл. 6), стопроцентная воспроизводимость которого достигается при точном соблюдении параметров процесса в пределах производственных допусков (см. табл. 5). Это подтвердили и результаты испытаний (рис. 5).

Таблица 6

Фактические показатели свойств твердого сплава ВК6 после ТГХО  
и границы их рассеивания по результатам виртуальных испытаний технологической системы

Наименование показателя свойств	Номинальное значение	Границы рассеивания показателей свойств	
		нижняя	верхняя
Коэффициент трения, $f$	0,1063	0,1058	0,1067

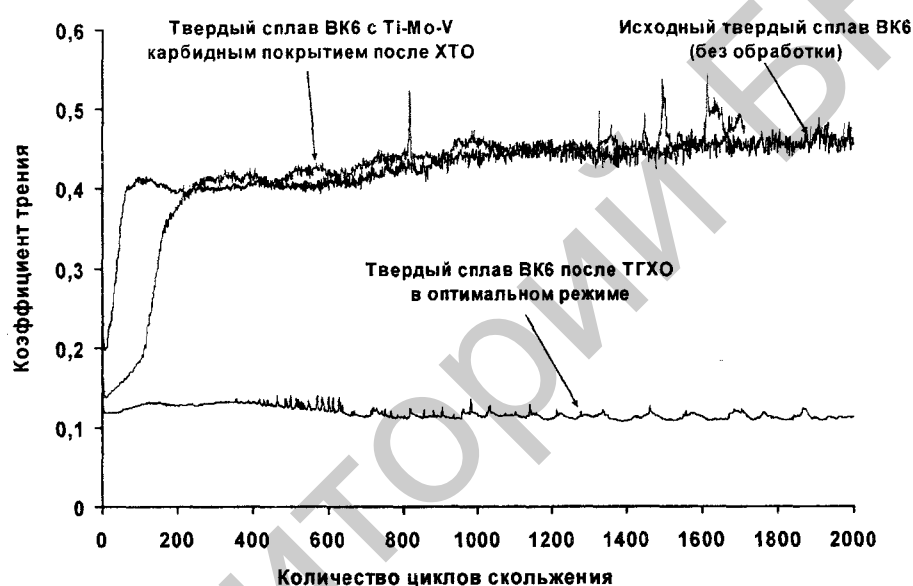


Рис. 5. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения твердого сплава ВК6 до и после упрочнения. Условия испытаний: сухое трение, нагрузка 1 Н, длина хода (трека) 3 мм, скорость 4 мм/с; оптимальный режим ТГХО: ХО в составе  $TiO_2-MoO_3$  при  $T = 100^\circ C$ ,  $\tau = 19$  мин; ТО при  $T = 1035^\circ C$ ,  $\tau = 10$  мин

Рассматривая вопрос улучшения износостойкости инструмента в результате его термогидрохимической обработки с позиции современных теорий трения и износа, можно найти объяснение в реализации эффекта Ребиндера, когда снижается коэффициент трения [1 – 5]. 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 твердосмазывающий эффект.

**Применение результатов исследований.** Результаты производственных испытаний показали, что ТГХО с использованием разработанных вододисперсных составов позволяет увеличить стойкость различных видов твердосплавного инструмента в 1,3...4,0 раза по сравнению с необработанным (табл. 7).

Анализируя таблицу 7, следует отметить, что наивысшие показатели износостойкости твердосплавного режущего инструмента достигнуты при черновой токарной и фрезерной обработке сталей и цветных сплавов. Технология ТГХО внедрена в Беларуси на предприятиях «БелАЗ», «МТЗ», «Мотовело» и др.



Таблица 7

Результаты испытаний твердосплавного инструмента, подвергнутого ТГХО

Вид инструмента	Материал инструмента	Обрабатываемый материал	Повышение стойкости инструмента, $K_p$
<b>ПО «БелАЗ»</b>			
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь 40Х (НВ217)	> 2
<b>РУП «Кузнецкий завод тяжелых штампов» (КЗТШ)</b>			
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь 20	1,8...1,9
<b>АП «Минский подшипниковый завод»</b>			
Торцевые фрезы сборные	Твердый сплав Т15К6	Конструкционные и инструментальные стали	2,1
Резцы гальтельные			2
<b>РУПП «Автогидроусилитель» (АГУ)</b>			
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь 30ХГТ (НВ229)	2
<b>РУП «Белорусский металлургический завод» (БМЗ)</b>			
Торцевые фрезы сборные	Твердый сплав МК8	Медный сплав МІРО	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
<b>ОАО Минский мотовелозавод (ММВЗ или Мотовело)</b>			
Режущие пластины для черновой фрезерной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь ШХ15 и сталь 4Х5МФС	3... 4

**Выводы**

1) выполнено математическое моделирование и компьютерное проектирование процесса ТГХО твердого сплава ВК6 с помощью компьютерных синтез-технологий метода многомерного проектного синтеза технических объектов, материалов и технологий. Определены технически-оптимальные режимы для реализации процесса в производстве с гарантированным достижением заданных свойств твердосплавных инструментов, подвергнутых ТГХО;

2) обработка по оптимальному режиму ТГХО позволяет существенно (в 3,6...4,0 раза) снизить коэффициент трения твердого сплава ВК6 в условиях сухого трения скольжения;

3) разработан простой и экономичный способ термогидрохимической обработки твердых сплавов, использование которого позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов твердосплавного режущего инструмента в 1,3...4,0 раза по сравнению со стандартным.

**ЛИТЕРАТУРА**

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. Воронков, Г.Я. Феномен поверхности – мир межфазной границы / Г.Я. Воронков. – М.: Поколение, 2009. – 208 с.
6. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под ред. В.С. Чердниченко. – М.: Омега-Л, 2008. – 752 с.
7. Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.



8. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 170 с.
9. Способ упрочнения инструмента из быстрорежущей стали: пат. 2023027 РФ, МПК5 С21D 9/22 / А.А. Шматов, Л.Г. Ворошнин. – № 5000073; заявл. 30.07.91; опубл. 15.11.94.
10. Способ упрочнения алмазного инструмента на металлической связке: пат. 10783 РБ, МПК В24D 3/34 / О.О. Смиловенко, В.И. Жорник, А.И. Полуян, А.А. Шматов, Н.Н. Прокопович. – № 20050979; заявл. 13.10.05; опубл. 24.03.08.
11. Способ упрочнения алмазного инструмента на металлической связке: пат. 12985 РБ, МПК В24D 18/00 / О.О. Смиловенко, А.И. Полуян, В.И. Жорник, Н.Н. Прокопович, А.А. Шматов. – № 20081057; заявл. 08.08.08, опубл. 30.04.10.
12. Шматов, А.А. Комбинированное объемно-поверхностное упрочнение стального режущего инструмента / А.А. Шматов // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2008. – № 5(47). – С. 16–21.
13. Шматов, А.А. Низкотемпературное поверхностное упрочнение алмазного инструмента / А.А. Шматов, О.О. Смиловенко // Вестн. БНТУ. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 1. – С. 27–32.
14. Шматов, А.А. Нанотехнология низкотемпературного термохимического упрочнения готового к эксплуатации инструмента / А.А. Шматов // Наноструктурные материалы: получение, свойства, применение: сб. науч. тр. – Минск, 2009. – С. 221–230.
15. Компьютерное проектирование процесса ТГХО для формирования твердосмазочных покрытий на инструментальной стали У8 / А.А. Шматов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 2. – С. 139–146.
16. Новик, Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Раздел IV / Ф.С. Новик. – М.: МиСИС, 1971. – 148 с.
17. Витязь, П.А. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования / П.А. Витязь, О.В. Жилинский, Т.В. Лактюшина // Физическая мезомеханика. – Томск, 2004. – Т. 7. – С. 3–11.
18. Проектирование процесса термоциклической обработки стали Р6М5 с помощью компьютерных синтез-технологий / А.А. Шматов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 19–25.
19. Оптимизация и компьютерное проектирование термоциклической обработки быстрорежущей стали Р18 / А.А. Шматов [и др.] // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 6. – С. 20–25.
20. Исследование и компьютерное проектирование процесса улучшающей термоциклической обработки стали У8 / А.А. Шматов [и др.] // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 4. – С. 53–58.

Поступила 24.05.2010

#### INVESTIGATION AND COMPUTER DESIGN OF THCT PROCESS FOR HARD ALLOY BK6

A. SHMATOV, O. ZHILINSKY, T. LAKTJUSHINA,  
G. ZHAVNERKO, A. SOLOMJANSKY

*The results examination of the frictional properties of solid-film lubricant, obtained by thermo-chemical treatment of hard alloy BK6 (94 wt. % WC, 6 wt. % Co), are presented. Optimization of the active composition and temperature – time parameters of the process was performed for the friction coefficient of the films. The diagrams "property vs. process parameters" were plotted using the obtained mathematical expressions. Treatment with optimal regime permits decreasing the friction coefficient of the hard alloy surface in 3,6...4,0 as compared with untreated.*