

УДК 621.78.01 + 621.793.18

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

## Компьютерное проектирование процесса получения твердосмазочного SiC-покрытия на твердом сплаве

*Приведены результаты исследования триботехнических свойств твердосмазочных покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 (94 % WC + 6 % Co) при термогидрохимической обработке (ТГХО). Выполнена оптимизация состава вододисперсной среды на основе SiC и температурно-временных параметров процесса ТГХО по коэффициенту трения полученных покрытий. С использованием математических моделей построены диаграммы "параметры процесса — свойство". Обработка по оптимальному режиму ТГХО позволяет в условиях отсутствия смазки снизить коэффициент трения твердосплавной поверхности в 3,2 раза по сравнению с необработанной.*

**Ключевые слова:** твердый сплав, инструмент, упрочнение, твердосмазочное SiC-покрытие.

*The results examination of the frictional properties of solid-film lubricant, obtained by thermo-hydrochemical treatment of hard alloy ВК6 (94 % WC + 6 % Co), are presented. Optimization of the SiC suspension 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 3.2 as compared with untreated.*

**Keywords:** hard alloy, tool, strengthening, SiC solid-lubricant coating.

### Введение

Развитие современной техники характеризуется широким применением сложнолегированных и других труднообрабатываемых сплавов для деталей машин и узлов и требует все большего использования высокопроизводительных твердосплавных инструментов. Однако они имеют недостаточную эксплуатационную стойкость. Существуют различные способы ее повышения. Основной тенденцией развития зарубежных технологий являются разработка и применение процессов получения покрытий из износостойких тугоплавких соединений методами физического осаждения из паровой фазы (PVD), химического осаждения из парогазовой фазы (CVD), напылением, химико-термической обработкой (ХТО) в вакууме, которые активированы нетрадиционными источниками нагрева (плазмой, лазером, электронным лучом и др.). Однако эти способы упрочнения имеют ряд недостатков, главными из которых являются: 1) высокие температуры проведения процессов, приводящие к деформации изделий и разупрочнению исходной матрицы; 2) малая производительность и высокая стоимость применяемого обо-

рудования; 3) большая трудоемкость и энергоемкость процессов; 4) вредное энергетическое воздействие на здоровье человека и др. [1—4]. Поэтому наибольший научный и практический интерес представляет процесс термогидрохимической обработки (ТГХО), поскольку он отличается высокими эффективностью и производительностью, применим для готовых к эксплуатации инструментов, незначительно изменяет их первоначальные размеры, форму и структуру [5—12].

ТГХО используется для химического осаждения на поверхности различных материалов антифрикционных твердосмазочных покрытий, которые обладают резервными возможностями в жестких и катастрофических условиях эксплуатации инструментов и машин [5—12]. Как известно [13—16], покрытия приобретают твердосмазочные свойства в случае, когда: а) созданы из материалов со слоистой поликристаллической структурой (графит, сульфиды и др.); б) сформированы на основе наноструктурированных тугоплавких и сверхтвердых материалов; в) реализуется теория Берналла, согласно которой любое 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 вследствие различия их электрохимических потенциалов, в результате чего формируется квазижидкая пленка, снижающая коэффициент трения и фрикционный разогрев.

ТГХО является наиболее простым и универсальным методом получения твердосмазочных покрытий. С помощью этого метода можно создавать наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, алмаза, углеродных и других антифрикционных материалов [5–12]. При формировании таких покрытий реализуется эффект Ребиндера за счет введения в вододисперсную среду поверхностно-активных веществ (ПАВ) [15]. Полученные 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 [2–4]. Согласно вакансионно-диффузионному и адгезионно-деформационному механизмам трения повышения износостойкости твердого тела можно достичь при сочетании названных выше эффектов: высокой твердости его поверхности и низкой прочности адгезионной связи [13, 14, 16].

Поскольку в результате ТГХО исходная структура материала сохраняется (не разупрочняется), а конечные размеры и форма изделий практически не изменяются, данные покрытия можно наносить на готовые к эксплуатации инструменты и детали машин. С другой стороны, в условиях интенсивной эксплуатации изделий, когда в зоне трения отсутствует смазка или ее подача ограничена, наилучшим способом снижения трения рабочих частей изделий является нанесение на них твердосмазочных покрытий [5–12, 17].

Карбид кремния (SiC) — это универсальный материал будущего: он имеет множество применений в технике благодаря малой стоимости, простоте изготовления, легкости, абразивной износостойкости, высокой коррозионной и жаростойкости, хорошим электрическим свойствам и пр. Поэтому использование карбида кремния позволит получать покрытия и материалы многофункционального назначения [2, 4].

Из изложенного 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 ТГХО практически всех инструментальных материалов, мало изучены.

Огромную 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 [18]. Но такой подход не позволяет решить весь комплекс вопросов, возникающих при проектировании технологии, поскольку функционирование любой технологической системы (в данном случае таковой является технология ТГХО твердого сплава в вододисперсной среде на базе SiC) 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 [5, 6, 11, 19, 20].

В связи с изложенным **целью данной работы** является оптимизация и компьютерное проектирование технологии ТГХО для получения на твердом сплаве ВК6 твердосмазочного SiC-покрытия с применением метода многомерного проектного синтеза технических объектов, материалов и технологий.

### Объекты и методика исследований

Термогидрохимической обработке подвергали твердый сплав ВК6 (94 % WC + 6 % Co), который широко используется для точения, фрезерования, рассверливания, зенкерования чугунов, жаропрочных и цветных сплавов, неметаллических материалов. Сам процесс

ТГХО осуществляли путем проведения двух операций: а) гидрохимической обработки (ГХО) поверхности твердого сплава при температуре 95...100 °С в течение 10...300 мин в специально приготовленной водной суспензии на базе ультра- и наноразмерных порошков карбида кремния; б) последующей термической обработки (ТО) при нагреве в защитной (безокислительной) среде до температуры 120...1050 °С, выдержки в течение 10...15 мин и охлаждения. Водную суспензию предварительно готовили по специальной технологии при смешивании ультра- и наноразмерного карбида кремния с 4...8 % сульфанола (ПАВ). Готовым считался рабочий состав с кислотностью рН = 7...9, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH<sub>4</sub>ОН. При проведении ГХО образцы помещали и выдерживали в ванне с готовым рабочим составом, нагретой до температуры процесса. Поверхность образцов предварительно обезжиривали и декапировали в 5...10 %-м растворе серной кислоты в течение 1...2 мин. После каждой операции ГХО образцы промывали в воде.

Тонкую структуру покрытий исследовали на атомно-силовом микроскопе Nanoscope 3D (Veeco, USA). Определение триботехнических свойств поверхности осуществляли на микротрибометре возвратно-поступательного типа (рис. 1) по схеме "подвижный шарик — неподвижная плоскость" при условиях испытаний: нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм; скорость 4 мм/с; пара трения: упрочненный твердый сплав (плоскость) — сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм) [6]. Показатель относительной стойкости упрочненного твердосплавного инструмента определяли по формуле  $K_w = t_2/t_1$ , где  $t_1$  —

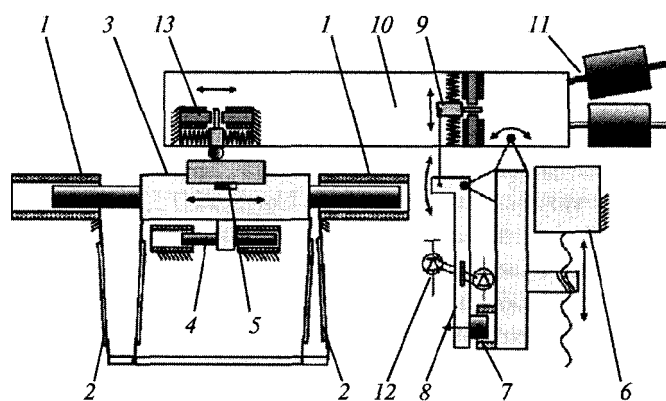


Рис. 1. Микротрибометр возвратно-поступательного типа с максимальной прилагаемой нагрузкой 1 Н (производства ИММС, г. Гомель, Беларусь):

1 — электромагнит привода; 2 — направляющая изгиба; 3 — столик-держатель образца; 4 — датчик положения; 5 — датчик трибоакустической эмиссии; 6 — шаговый привод; 7 — электромагнит системы нагружения; 8 — рычаг; 9 — датчик нагрузки; 10 — головка; 11 — балансировочный груз; 12 — оптопара; 13 — датчик силы трения

время работы (длина рабочего хода) исходного инструмента;  $t_2$  — время работы упрочненного инструмента.

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" [19, 20]. 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 и метод построения графического изображения состояний технологической системы.

Метод многомерного проектного синтеза технологической системы в отличие от метода, приведенного в работе [18], позволяет:

выбирать технически оптимальный вариант, обладающий наибольшей устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов производства;

одновременно решать обратные многокритериальные задачи: выделять в пространстве системы области устойчивости и выбирать технически оптимальный вариант 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 исследований

При оптимизации и проектировании процесса ТГХО твердый сплав подвергали гидрохимической обработке в вододисперсной среде, содержащей SiC и ПАВ, при нагреве до температуры, близкой к температуре кипения, в течение 14...20 мин, а последующий нагрев осуществляли до температуры 700...750 °С. В таких условиях на твердом сплаве ВК6 формируются твердосмазочные SiC-покрытия с наилучшими антифрикционными свойствами без изменения исходной структуры матрицы (рис. 2). Причем оптимальные параметры процесса ТГХО для стали [11] (время гидрохимической обработки 60...70 мин и температура термообработки 140...155 °С) не обеспечивают максимального снижения коэффициента трения для твердого сплава. Структурный анализ поверхности ТГХ-упрочненного твер-

дого сплава ВК6 [6] свидетельствует о том, что такие твердосмазочные покрытия при сухом трении хорошо пластифицируются (рис. 3).

При оптимизации процесса варьировали температуру и время гидрохимической обработки, долевое содержание основного компонента химически активной среды и температуру термообработки. В табл. 1 пред-

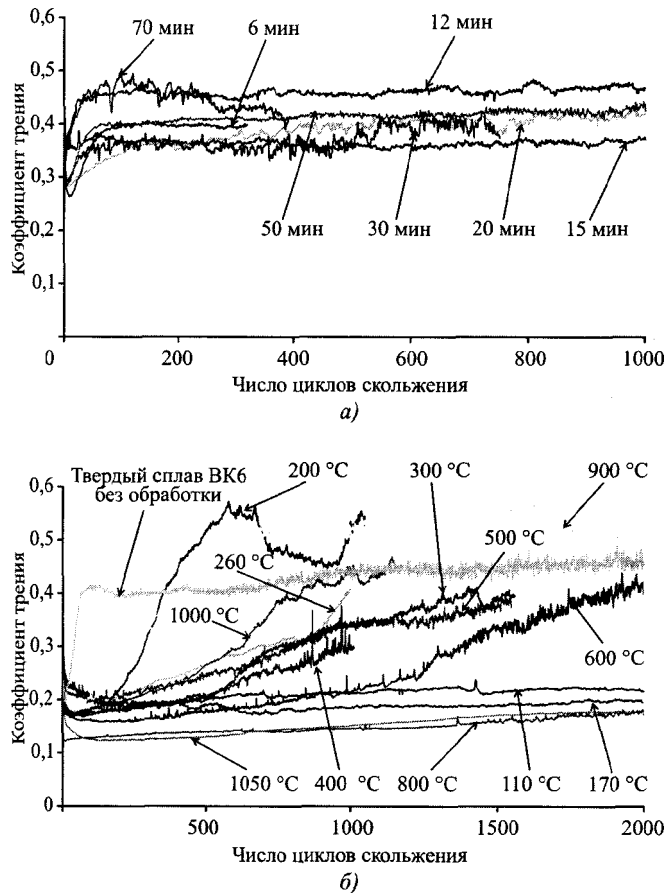


Рис. 2. Влияние параметров процесса ТГХО на коэффициент трения твердого сплава ВК6:

режим ТГХО: состав вододисперсной среды для ГХО на основе SiC + ПАВ: а) ГХО без отпуска при  $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ; б) отпуск после ГХО,  $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 15\text{ мин}$ ; при ТО  $\tau = 0,5\text{ ч}$ ; условия испытаний: сухое трение скольжения (без смазки); пара трения: твердый сплав ВК6 (плоскость) — сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм); нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм; скорость 4 мм/с

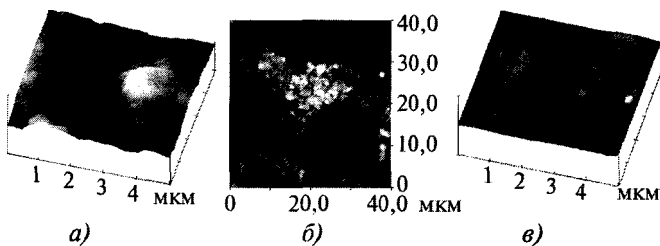


Рис. 3. Морфология поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого ТГХО, до (а, б) и после (в) испытаний на трение [6]

ставлены результаты триботехнических испытаний ТГХ-упрочненного твердого сплава ВК6, полученные при реализации 11 опытов плана экспериментов [18].

На основании этих данных рассчитаны линейные и нелинейные математические модели, описывающие влияние температурно-временных параметров и состава активной смеси на коэффициент трения ТГХ твердосмазочных SiC-покрытий. Однако адекватными признаны только нелинейные многокритериальные математические модели следующего вида:

$$Y_1 = -1,18 \cdot 10^{-2} + 1,58 \cdot 10^{-3} X_2 + 9,60 \cdot 10^{-6} X_1^2 + 1,18 \cdot 10^{-4} X_2^2 + 2,04 \cdot 10^{-3} X_3^2 + 1,04 \cdot 10^{-7} X_4^2 - 2,62 \cdot 10^{-4} X_1 X_3 + 2,50 \cdot 10^{-6} X_2 X_4,$$

Таблица 1

Результаты исследования коэффициента трения покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО в вододисперсном составе на основе SiC

Номер опыта	Факторы				Параметры оптимизации
	Гидрохимическая обработка			Термообработка	
	Температура $T, \text{ }^\circ\text{C}$	Время $\tau, \text{ мин}$	Доля ПАВ в составе, %	Температура $T, \text{ }^\circ\text{C}$	
Условное обозначение	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1$
Основной уровень (0)	98	17	6	725	—
Интервал варьирования	2	3	2	25	
Верхний уровень (+1)	100	20	8	750	
Нижний уровень (-1)	96	14	4	700	
1	+	+	+	+	0,168
2	—	+	+	—	0,152
3	+	—	+	+	0,146
4	—	—	+	+	0,148
5	+	+	—	+	0,175
6	—	+	—	—	0,147
7	+	—	—	—	0,135
8	—	—	—	+	0,146
9	0	0	0	0	0,147
10	0	0	0	0	0,142
11	0	0	0	0	0,144

Таблица 2

**Оптимальные параметры процесса ТГХО  
твердого сплава ВК6 и поля их рассеяния**

Параметр процесса	Номинальное значение	Разрешенные поля рассеяния
Температура гидрохимической обработки, °С	98	2,8
Время гидрохимической обработки, мин	15	2,8
Доля ПАВ в составе, %	6	2,8
Температура отпуска, °С	718	35

Таблица 3

**Оптимальный показатель свойства покрытий,  
полученный на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО  
в вододисперсном составе на основе SiC, и поле его рассеяния**

Наименование оптимального показателя свойств	Номинальное значение	Поле рассеяния
Коэффициент трения $f$	0,133	0,028

Таблица 4

**Заданные границы свойства покрытий,  
полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО  
в вододисперсном составе на основе SiC**

Наименование желаемого показателя свойств	Минимальное значение	Максимальное значение
Коэффициент трения $f$	0,120	0,150

Таблица 5

**Определение запаса работоспособности  
технологической системы по входным параметрам**

Параметр процесса	Значение параметра	Значение производственного допуска	Поле производственного допуска	Коэффициент работоспособности
Температура гидрохимической обработки, °С	98	±1	2	1,4
Время гидрохимической обработки, мин	15	±1	2	1,4
Доля ПАВ в составе, %	6	±1	2	1,4
Температура отпуска, °С	718	±5	10	3,5

где  $Y_1$  — коэффициент трения;  $X_1$  — температура гидрохимической обработки;  $X_2$  — время гидрохимической обработки;  $X_3$  — доля ПАВ в составе;  $X_4$  — температура отпуска.

Из-за многокритериальности, стохастичности и нелинейности технологической системы "процесс ТГХО твердого сплава ВК6" прогнозирование ее 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. 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.

При традиционной методологии оптимизации 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 в гидрозоле карбида кремния 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 табл. 2, 3. При решении обратной многокритериальной задачи были заданы желаемые уровни показателей свойств твердосмазочных покрытий, полученных ТГХО твердого сплава ВК6 (табл. 4). Результаты виртуальных испытаний работоспособности системы в условиях влияния дестабилизирующих факторов производства приведены в табл. 5.

Для графической интерпретации результатов, полученных при решении задач исследования и проектирования технологии ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсном составе на основе SiC, построены дискретные портреты (рис. 4). Выделение областей устойчивости в многомерном пространстве состояний является важным этапом выбора технически оптимального

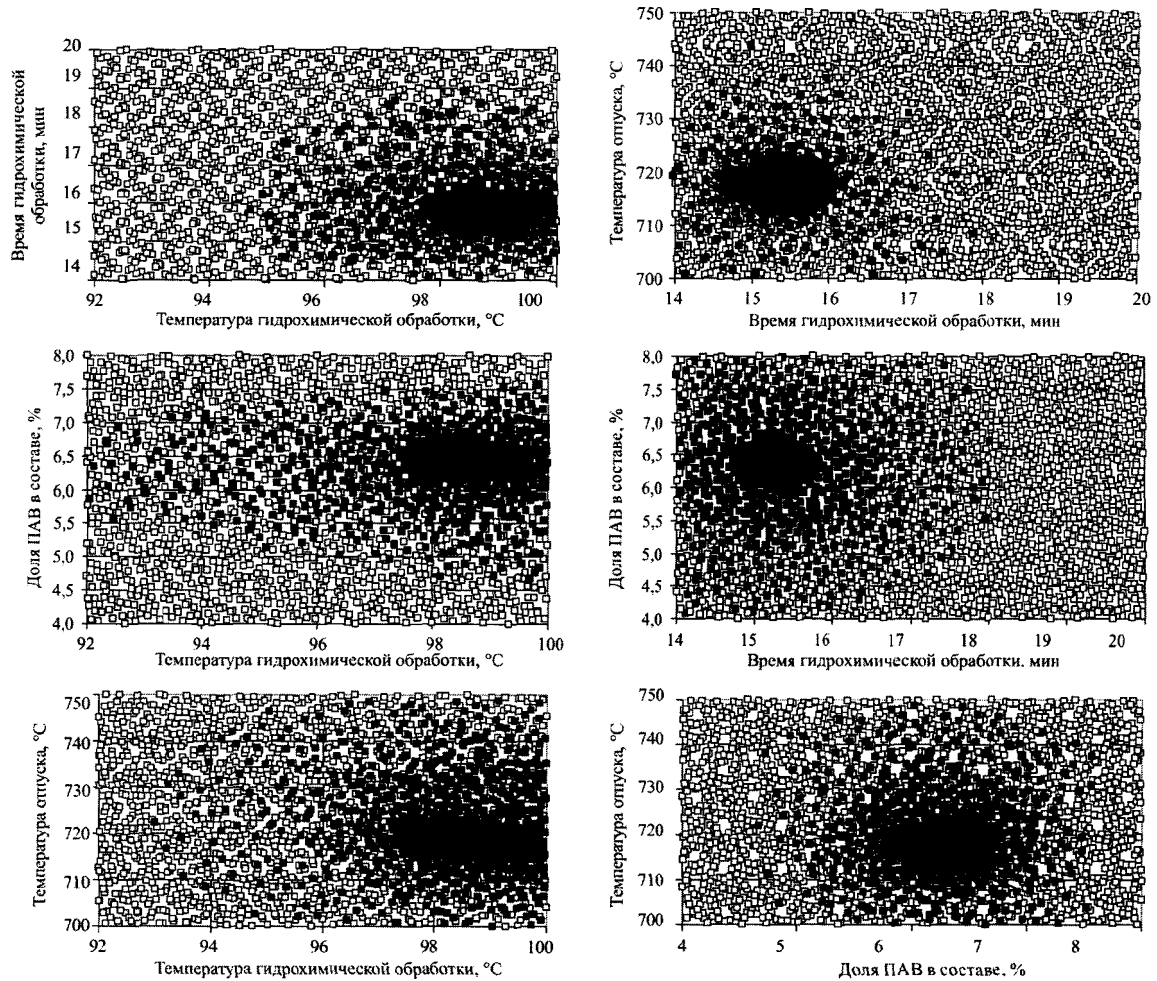


Рис. 4. Дискретные портреты виртуального пространства технологической системы процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсной SiC-среде:

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

варианта системы. В качестве критерия оптимизации выступает коэффициент трения с желаемым уровнем: 0,120...0,150 (см. табл. 4). На рис. 4 видно, что технология ТГХО твердого сплава ВК6 реализуется с высокими свойствами только тогда, когда система попадает в области устойчивости, отмеченные темными точками. Выход одного или нескольких параметров процесса за пределы областей устойчивости — в области, отмечен-

ные светлыми точками, свидетельствует о том, что материал с заданными свойствами в этом случае не будет получен.

В результате решения задачи проектирования технологии ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсном составе на основе SiC установлены фактические показатели основного ее триботехнического свойства (табл. 6), 100 %-я воспроизводимость которого достигается при точном соблюдении параметров процесса в пределах производственных допусков (см. табл. 5). Это подтвердили и результаты испытаний (рис. 5).

Для любого инструмента, у которого место контакта с обрабатываемой деталью изменяется со временем [21], важно на протяжении всего периода эксплуатации иметь не только минимальные, но и неизменные значения коэффициента трения. Таким требованиям отвечают термогидрохимические покрытия, и в этом их преимущество перед другими известными твердосмазочными покрытиями [17].

Таблица 6

**Фактический показатель свойства твердого сплава ВК6 после ТГХО и границы его рассеивания по результатам виртуальных испытаний технологической системы**

Наименование показателя свойств	Номинальное значение	Границы рассеивания показателей свойств	
		Нижняя	Верхняя
Коэффициент трения $f$	0,133	0,125	0,141

Результаты испытаний твердосплавных инструментов, подвергнутых ТГХО

Вид инструмента	Материал инструмента	Обрабатываемый материал	Повышение стойкости, $K_{\mu}$
<b>ПО "БелАЗ"</b>			
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь 40Х (217 НВ)	> 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>			
Сборные торцевые фрезы	Твердый сплав Т15К6	Конструкционные и инструментальные стали	2,1
Галтельные резцы			2
<b>РУПП "Автогидроусилитель" (АГУ)</b>			
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь 30ХГТ (229 НВ)	2
<b>РУП "Белорусский металлургический завод" (БМЗ)</b>			
Сборные торцевые фрезы	Твердый сплав МК8	Медный сплав М1Р0	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 Ст3	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

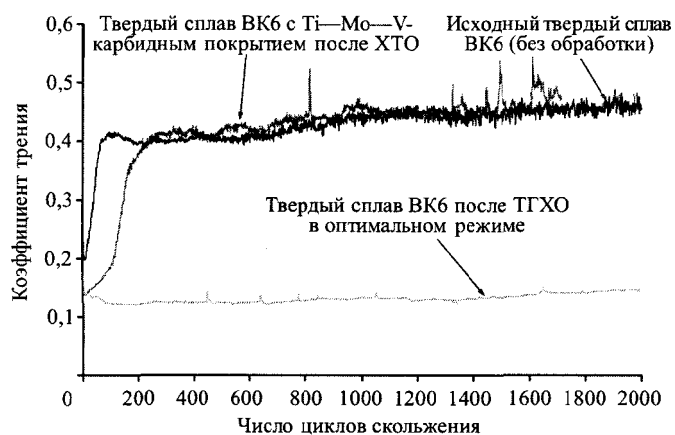


Рис. 5. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения в зависимости от длительности изнашивания (без смазки) поверхности твердого сплава ВК6 до и после ТГХО в оптимальном режиме:

условия испытаний: сухое трение скольжения; пара трения: твердый сплав ВК6 (плоскость) — сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм); нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм; скорость 4 мм/с

**Применение результатов исследований.** Результаты производственных испытаний свидетельствуют о том, что ТГХО с использованием разработанных вододисперсных составов позволяет увеличить эксплуатационную стойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3...4,0 раза по сравнению с необработанными (табл. 7).

Анализируя табл. 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.

### Выводы

1. Выполнены математическое моделирование и компьютерное проектирование процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в среде гидрозоля SiC с помощью компьютерных технологий метода многомерного про-

ектного 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 твердого сплава ВК6 по оптимальному режиму ТГХО позволяет существенно (в 3,2 раза) снизить коэффициент трения твердосплавной поверхности в условиях сухого трения скольжения.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия. М.: Мир, 2000. 518 с.
2. **Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.**
3. **Наноструктурные покрытия / под ред. А. Кавалейро, Д. Хоссона. М.: Техносфера, 2011. 752 с.**
4. **Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под ред. В.С. Чердниченко. М.: Омега-Л, 2008. 752 с.**
5. **Компьютерное проектирование процесса ТГХО для формирования твердосмазочных покрытий на инструментальной стали У8 / А.А. Шматов и др. // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. 2010. № 2. С. 139—146.**
6. **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.**
7. **Шматов А.А. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке твердого сплава // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2. С. 33—40.**
8. **Шматов А.А., Жавнерко Г.К., Лисовская Ю.О. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке стали // Материаловедение. 2013. № 1. С. 43—50.**
9. **Витязь П.А., Шматов А.А., Девойно О.Г. Упрочнение твердого сплава методом термогидрохимической обработки // Докл. НАН Беларуси. Т. 57. № 1. 2013. С. 113—117.**
10. **Шматов А.А. Сопrotивляемость изнашиванию стали, упрочненной термогидрохимической обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 7. С. 28—34.**
11. **Компьютерное проектирование процесса ТГХО для получения на стали У8 твердосмазочного SiC покрытия / А.А. Шматов и др. // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. 2014. № 3. С. 53—61.**
12. **Шматов А.А. Реализация механизмов упрочнения при ТГХО инструментальных материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 12. С. 37—48.**
13. **Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.**
14. **Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.**
15. **Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. Т. 2. 135 с.**
16. **Гаркунов Д.Н., Корник П.И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. М.: Изд-во МСХА, 2003. 344 с.**
17. **Витязь П.А. Твердосмазочные покрытия в машиностроении. Минск: Бел. наука, 2007. 170 с.**
18. **Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Разд. IV. М., МиСИС, 1971. 148 с.**
19. **Витязь П.А., Жилинский О.В., Лактюшина Т.В. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования // Физическая мезомеханика. Т. 7. Томск, 2004. С. 3—11.**
20. **Компьютерные синтез-технологии исследования и проектирования технических и технологических систем / П.А. Витязь и др. Пятая международная научно-техническая конференция "Информационные технологии в промышленности (ИТГ\*2008)", 22—24 октября 2008 г. Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2008. С. 11—12.**
21. **Бельский С.Е., Тофпенек Р.Л. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента. Минск: Наука и техника, 1984. 128 с.**