

ханических свойств отдельных слоев многослойного покрытия повышает эффективность многослойных покрытий и способствует росту периода стойкости режущего инструмента.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Табаков В.П.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана. Ульяновск: УлГТУ, 1998. 122 с.
2. **Табаков В.П.** Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
3. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
4. **Табаков В.П., Чихранов А.В.** Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 255 с.
5. **Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В.** Работоспособность торцовых фрез с многослойными износостойкими покрытиями. Ульяновск: УлГТУ, 2005. 151 с.
6. **Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А.** Рентгеноструктурный и электронно-оптический анализ металлов. М.: Металлургиздат, 1970. 366 с.
7. **Табаков В.П., Чихранов А.В.** Определение механических характеристик износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитрида титана // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 4. С. 292—297.
8. **Табаков В.П., Григорьев С.Н., Верещака А.С.** Принципы формирования и технологии нанесения износостойких покрытий режущего инструмента. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 196 с.
9. **Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П.** Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2. С. 18—39.
10. **Tabakov V.P.** The Influence of Machining Condition Forming Multilayer Coatings for Cutting Tools // Key Engineering Materials. 2012. Vol. 496. P. 80—85.
11. **Tabakov V.P., Vereschaka A.S.** Development of technological means for formation of multilayer composite coatings, providing increased wear resistance of carbide tools, for different machining condition // Key Engineering Materials. 2014. Vol. 581. P. 55—61.
12. **Табаков В.П., Верещака А.С., Верещака А.А., Батяко А.Д.** Методологические подходы к формированию многослойных покрытий на режущем инструменте // Вестник машиностроения. 2015. № 9. С. 82—88.
13. **Табаков В.П., Верещака А.С., Григорьев С.Н.** Функциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 172 с.

УДК 621.78.001, 621.793.18

**А.А. Шматов**

(Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь),

**А.Е. Соломянский**

(Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Беларусь)

E-mail: shmatovalexander@gmail.com

## Многомерное проектирование технологии упрочнения твердого сплава в вододисперсном речном песке

*Приведены результаты исследования триботехнических свойств твердосмазочных покрытий, полученных на сплаве ВК6 (94 % WC + 6 % Co) в результате термогидрохимической обработки (ТГХО) в вододисперсной среде на основе речного песка. Выполнена многомерная оптимизация состава среды и температурно-временных параметров процесса ТГХО по коэффициенту трения полученных твердосмазочных покрытий. Используя математические модели, построены диаграммы "параметры процесса—свойство". Обработка по оптимальному режиму ТГХО позволяет в условиях отсутствия смазки снизить коэффициент трения твердосплавной поверхности в 4,5 раза по сравнению с необработанной.*

**Ключевые слова:** термогидрохимическая обработка, твердый сплав, инструмент, упрочнение, твердосмазочное покрытие, речной песок.

*The results examination of the tribotechnical properties for solid lubricant coatings obtained on hard alloy VK6 (94 % WC + 6 % Co) by thermo-hydrochemical treatment (THCT) in water-dispersed medium based on river sand are presented. The multidimensional optimization of the medium composition and the temperature-time parameters of the THCT is performed for the friction coefficient of the obtained solid lubricant coatings. The diagrams "process parameters—property" are plotted using the obtained mathematical expressions. Treatment with optimal regime of THCT permits decreasing the friction coefficient of the hard alloy surface in 4,5 as compared with untreated.*

**Keywords:** thermo-hydrochemical treatment, hard alloy, tool, strengthening, solid lubricant coating, river sand.

## Введение

Режущие и другие формообразующие инструменты из твердых сплавов предназначены для высокопроизводительной механической обработки сложнoleгированных труднообрабатываемых сталей и сплавов со специальными свойствами. Однако, по-прежнему, твердосплавные инструменты имеют недостаточную эксплуатационную стойкость. Существуют различные способы ее повышения. Основной тенденцией развития зарубежных технологий является разработка и применение процессов получения покрытий из износостойких тугоплавких соединений методами PVD (физического осаждения из паровой фазы), CVD (химического осаждения из парогазовой фазы), напылением, ХТО (химико-термической обработкой) в вакууме, которые активированы нетрадиционными источниками нагрева (плазмой, лазером, электронным лучом и др.). Однако эти способы упрочнения имеют ряд недостатков, главными из которых являются:

- высокие температуры проведения процессов, приводящие к деформации изделий и разупрочнению исходной матрицы;
- малая производительность и высокая стоимость применяемого оборудования;
- большая трудоемкость и энергоемкость процессов;
- ухудшение экологии и вредное энергетическое воздействие на здоровье человека;
- высокая стоимость применяемого оборудования и компонентов и др. [1–4].

Поэтому наибольший научный и практический интерес представляет процесс термогидрохимической обработки (ТГХО), поскольку он отличается простотой, высокой эффективностью и производительностью, позволяет получать покрытия на базе любых керамических материалов, применим для готовых к эксплуатации изделий из различных сплавов, незначительно изменяет их первоначальные размеры, форму и структуру [5, 6].

ТГХО предназначена гидрохимически осаждают на поверхности различных материалов антифрикционные твердосмазочные покрытия, которые обладают резервными возможностями в жестких и катастрофических условиях эксплуатации инструментов и машин [5, 6]. Как известно [7–10], покрытия приобретают твердосмазочные свойства в случаях, когда:

- созданы из материалов со слоистой поликристаллической структурой (графит, сульфиды, др.);
- сформированы на основе наноструктурированных тугоплавких и сверхтвердых материалов;

— реализуется теория Берналла, согласно которой любое твердое тело приобретает свойства жидкости, если в кристаллической решетке содержится более 10 % вакансий;

— реализуется эффект Ребиндера, который ведет к пластифицированию поверхностного слоя и созданию положительного градиента механических свойств в зоне трения;

— 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 — наиболее простой и универсальный метод получения твердосмазочных покрытий. С помощью этого метода можно создавать наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, алмаза, углеродных и других антифрикционных материалов [5, 6]. При формировании таких покрытий реализуется эффект Ребиндера за счет введения в вододисперсную среду поверхностно-активных веществ (ПАВ) [9]. 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 указанных эффектов: высокой твердости его поверхности и низкой прочности адгезионной связи [7, 8, 10].

Поскольку в большинстве случаев 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. 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, 6, 11].

Особое внимание уделяется вопросам развития биосовместимых, так называемых "Green" технологий с использованием природных экологичных материалов, например, речного и кварцевого песка, кремнезема, глины, глинозема и др. [12]. Речной песок благодаря малой стоимости, экологической чистоте, фракционной однородности, абразивной и коррозионной стойкости, имеет множество при-

менений в строительстве и технике [13], поэтому его использование позволит получать покрытия и материалы многофункционального назначения.

На основании 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 применяют для изготовления различных видов режущих и штамповых инструментов. Однако вопросы, связанные с термогидрохимическим способом получения на твердых сплавах твердосмазочных покрытий на основе речного песка, пока не изучены.

Огромную помощь исследователю при 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 плана экспериментов) определяют свойства материала, затем создают математические модели, описывающие влияние факторов, и с помощью графической интерпретации выбирают оптимальные параметры процесса [14]. 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 в вододисперсной среде на основе речного песка) происходит в условиях постоянного случайного изменения значений параметров системы под влиянием различных внешних и внутренних дестабилизирующих факторов.

Технологические системы, как объекты проектирования, обладают рядом специфических особенностей: многокритериальностью, многопараметричностью, стохастичностью (рассеиванием 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-

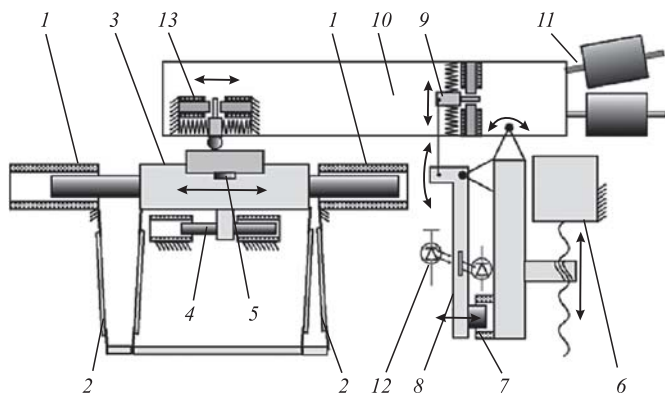
временные параметры процесса. Данный методологический подход, получивший название многомерного проектного синтеза технологической системы, успешно используют при разработке новых технологий и материалов [5, 15, 16].

**Цель работы** — многомерная оптимизация и компьютерное проектирование технологии ТГХО в вододисперсной среде из речного песка для получения на твердом сплаве ВК6 твердосмазочного покрытия за счет применения метода многомерного проектного синтеза технических объектов, материалов и технологий.

### Материалы и методика исследований

Термогидрохимической обработке подвергали твердый сплав ВК6 (94 % WC + 6 % Co), который широко применяют для точения, фрезерования, рассверливания, зенкерования чугунов, жаропрочных и цветных сплавов, неметаллических материалов. Процесс ТГХО осуществляли путем проведения двух операций: 1) гидрохимическая обработка (ГХО) поверхности твердого сплава при температуре 96...100 °С в течение 10...40 мин в специально приготовленной водной суспензии на основе диспергированного речного песка; 2) последующая термическая обработка (ТО) при нагреве в защитной (безокислительной) среде до температуры 150...1050 °С, выдержка в течение 10...15 мин и охлаждение. Водную суспензию предварительно готовили по специальной технологии при смешивании ультра- и наноразмерных (0,1...1,0 мкм) песчинок речного песка с 4...8 % сульфанола (ПАВ). Весь речной песок предварительно тщательно промывали от загрязнений. Готовым считался рабочий состав с pH = 7...9, который устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH<sub>4</sub>OH. 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%-ном растворе серной кислоты в течение 1...2 мин. После каждой операции ГХО образцы промывали в воде. Изотермическую выдержку твердого сплава при температурах до 200 °С проводили в воздушной среде, а выше 200 °С — в защитной среде.

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



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

1 — электромагниты привода; 2 — направляющие 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 — балансировочные грузы; 12 — оптопара; 13 — датчик силы трения

ШХ15 (сфера диаметром 4 мм) [5]. Показатель относительной стойкости упрочненного твердосплавного 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.

При проектировании технологического процесса ТГХО твердого сплава ВК6 применяли метод многомерного проектного синтеза технологических объектов, материалов и технологий в виде базовой компьютерной программы СИНТЕЗ МК [15, 16]. Алгоритм многомерного компьютерного проектирования данного процесса складывается из решения двух главных задач: прямой задачи оптимизации и обратной задачи 100%-ной воспроизводимости оптимальных параметров процесса в заданных полях производственных допусков применяемого технологического оборудования. 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 методы: решения обратных многокритериальных задач, компьютерного выбора технически оптимального варианта, выделения областей устойчивости исследуемой технологической системы в многомерном пространстве технологических параметров и построения графического изображения состояний технологической системы.

Метод многомерного проектного синтеза технологической системы имеет преимущества перед известным методом [14] и 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 и их обсуждение

Для проектирования нового процесса ТГХО твердый сплав ВК6 подвергали гидрохимической обработке в вододисперсной среде, содержащей речной песок и ПАВ при нагреве до температуры, близкой к температуре кипения, в течение 10...20 мин, а последующий нагрев осуществляли при температуре 450...500 °С. В таких условиях на твердом сплаве ВК6 формируются твердосмазочные покрытия на основе речного песка с наилучшими антифрикционными свойствами без изменения исходной структуры матрицы (рис. 2, см. обложку).

При оптимизации процесса варьировали температуру и время гидрохимической обработки, долевое содержание основного компонента химически активной среды и температуру отпуска. В настоящей работе не учитывали объемную долю и морфологию исходных частиц речного песка, поскольку они мало влияют на триботехнические свойства получаемых покрытий, что связано с изменением всех структурных параметров частиц в процессе их гидрохимического нанодиспергирования до образования гидрозоля. В табл. 1 представлены результаты триботехнических испытаний термогидрохимически упрочненного твердого сплава ВК6, полученные при реализации 11 опытов плана экспериментов [14].

На основании этих данных рассчитаны линейные и нелинейные математические модели, описывающие влияние температурно-временных параметров и состава активной смеси на коэффициент трения термогидрохимических твердосмазочных покрытий на основе речного песка.

Таблица 1

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

Номер опыта	Факторы				Параметры оптимизации
	Гидрохимическая обработка			Отпуск	
	Температура T, °C	Время τ, мин	Доля ПАВ в составе, %	Температура T, °C	Коэффициент трения f за 1000 циклов
Условное обозначение	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y <sub>1</sub>
Основной уровень (0)	98	15	6	475	—
Интервал варьирования	2	5	2	25	
Верхний уровень (+1)	100	20	8	500	
Нижний уровень (-1)	96	10	4	450	
1	+	+	+	+	
2	—	+	+	—	0,133
3	+	—	+	+	0,104
4	—	—	+	+	0,105
5	+	+	—	+	0,115
6	—	+	—	—	0,136
7	+	—	—	—	0,127
8	—	—	—	+	0,106
9	0	0	0	0	0,130
10	0	0	0	0	0,129
11	0	0	0	0	0,127

Таблица 2

**Оптимальные параметры процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсной среде на основе речного песка и поля их рассеяния**

Параметр	Номинальное значение	Разрешенные поля рассеяния
Температура гидрохимической обработки, °C	97	2,2
Время гидрохимической обработки, мин	11	1,2
Доля ПАВ в составе, %	7	1,1
Температура отпуска, °C	492	9,0

Однако адекватными признаны только нелинейные многокритериальные математические модели следующего вида:

$$Y_1 = -2,15 + 0,05 X_1 - 1,62 \cdot 10^{-2} X_2 + 3,38 \cdot 10^{-2} X_3 - 6,27 \cdot 10^{-4} X_4 - 2,48 \cdot 10^{-4} X_1^2 + 3,25 \cdot 10^{-4} X_2^2 - 3,53 \cdot 10^{-3} X_3^2 - 2,47 \cdot 10^{-7} X_4^2 + 9,99 \cdot 10^{-5} X_1 X_2 + 1,50 \cdot 10^{-5} X_3 X_4.$$

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 рассеяния. 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 многомерном 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 системы — стохастическими. Выбор технически оптимального варианта ТГХО твердого сплава ВК6 в гидрозоле речного песка 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 многомерное 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, сформированных при ТГХО твердого

Таблица 3

**Оптимальные показатели свойства покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО в вододисперсном составе на основе речного песка и поля их рассеяния**

Показатель	Номинальное значение	Поле рассеяния
Коэффициент трения $f$	0,101	0,018

Таблица 4

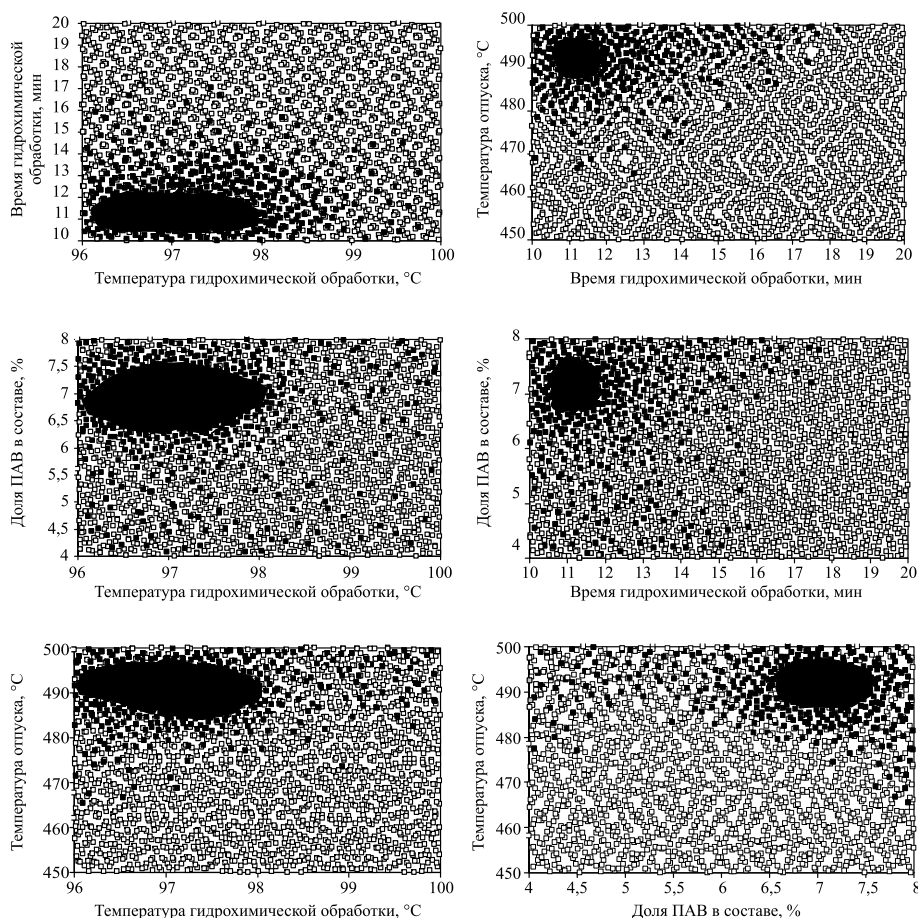
**Заданные границы свойства покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО в вододисперсном составе на основе речного песка**

Показатель	Минимальное значение	Максимальное значение
Коэффициент трения $f$	0,091	0,110

Таблица 5

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

Параметр	Значение параметра	Значение производственного допуска	Поле производственного допуска	Коэффициент работоспособности
Температура гидрохимической обработки, °С	97	±1,0	2,0	1,1
Время гидрохимической обработки, мин	11	±0,1	0,2	6,0
Доля ПАВ в составе, %	7	±0,1	0,2	5,5
Температура отпуска, °С	492	±2,5	5,0	1,8



**Рис. 3. Дискретные портреты виртуального пространства технологической системы процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсной среде на основе речного песка:**

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

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 речного песка, построены дискретные портреты (рис. 3). Выделение областей устойчивости в многомерном пространстве состояний является важным этапом выбора технически оптимального варианта системы. В качестве критерия оптимизации выступает коэффициент трения с желаемым уровнем: 0,091...0,110 (см. табл. 4). Из рис. 3 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, отмеченные светлыми точками,

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

В результате решения задачи проектирования технологии ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсном составе на основе речного песка установлены фактические показатели ее основного триботехнического свойства (табл. 6), 100%-ная воспроизводимость которого достигается при точном соблюдении параметров процесса в пределах производственных допусков (см. табл. 5). Это подтвердили и результаты испытаний (рис. 4, см. обложку).

Для любого инструмента, у которого место контакта с обрабатываемой деталью изменяется со временем [17], важно на протяжении всего периода эксплуатации иметь не только минимальные, но неизменные значения коэффициента трения.

Таблица 6

**Фактические показатели свойства твердого сплава ВК6 после ТГХО и границы их рассеяния по результатам виртуальных испытаний технологической системы**

Показатель	Номинальное значение	Границы рассеяния показателей свойств	
		Нижняя	Верхняя
Коэффициент трения $f$	0,101	0,092	0,110

Таким требованиям отвечают термогидрохимические покрытия, и в этом они имеют преимущества перед другими известными твердосмазочными покрытиями [11].

Таблица 7

**Результаты испытаний твердосплавных инструментов, подвергнутых ТГХО**

Вид инструмента	Материал инструмента	Обрабатываемый материал	Повышение стойкости $K_w$
<b>ПО "БелАЗ"</b>			
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь 40Х (217 НВ)	2,0...2,1
<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			2,0
<b>РУПП "Автогидроусилитель" (АГУ)</b>			
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь 30ХГТ (229 НВ)	2,0
<b>РУП "Белорусский металлургический завод" (БМЗ)</b>			
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	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	3,0...4,0
<b>АО "НОВОМЕТ-ПЕРМЬ"</b>			
Режущие пластины для черновой токарной обработки	Твердый сплав CNMG 120401 MS KCU10	ЖГр1Д1	1,6...2,0
	Твердые сплавы CNMG 120401 MS KCU10, CNMG 120404 NMS WSM20	X11Н8Д20	2,1...3,6

Результаты производственных испытаний свидетельствуют о том, что ТГХО с использованием оксидосодержащих вододисперсных составов позволяет увеличить эксплуатационную стойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3...4,0 раза по сравнению с необработанными (табл. 7). Анализируя результаты испытаний в табл. 7, следует отметить, что максимальные показатели износостойкости твердосплавного режущего инструмента достигнуты при черновой токарной и фрезерной обработке, особенно высоколегированных конструкционных и нержавеющей сталей и сплавов. Технология термогидрохимической обработки твердых сплавов с использованием нанодисперсных сред внедрена в Беларуси на машиностроительных предприятиях "БелАЗ" и "Мотовело".

### Выводы

1. Выполнены математическое моделирование и компьютерное проектирование процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в среде гидрозоля речного песка с помощью компьютерных 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 твердого сплава ВК6 по оптимальному режиму ТГХО позволяет существенно (в 4,5 раза) снизить коэффициент трения твердосплавной поверхности в условиях сухого трения скольжения.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: пер. с англ. 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: пер. с англ. / под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. М.: Техносфера, 2011. 752 с.

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

5. **Shmatov A.A., Soos L., Krajny Z.** Thermo-Hydrochemical Treatment for Tool Materials (a monograph). Bratislava: Slovak Technical University, 2014. 115 p.

6. **Шматов А.А.** Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке твердого сплава // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2. С. 33—40.

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

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

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

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

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

12. **Shmatov A.A.** Low-temperature technology dispersing raw materials (sand, clay, chalk) to create high performance materials and coatings // Proceedings of the Green Materials workshop, Hannover, 9 April 2013 / East-West-Science Centre. Hannover, 2013. P. 7.

13. **Телегин А.И., Ничипорук А.О.** Обеспечение стандартного качества и эффективности транспортирования и поставки нерудных стройматериалов, добываемых из речных водоемов. Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО "ВГУВТ", 2015. 216 с.

14. **Новик Ф.С.** Математические методы планирования экспериментов в материаловедении. Раздел IV. М.: МиСИС, 1971. 148 с.

15. **Витязь П.А., Жилинский О.В., Лактюшина Т.В.** Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования // Физическая мезомеханика. Томск, 2004. Т. 7. С. 3—11.

16. **Компьютерные** синтез-технологии исследования и проектирования технических и технологических систем / П.А. Витязь и др. // Информационные технологии в промышленности (IT\*2008): материалы 5-й Междунар. конф., Минск, 22—24 октября 2008 г. Минск, ОИПИ НАН РБ, 2008. С. 11—12.

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