

УДК 621.78.001; 621.81

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТГХО
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НА СТАЛИ У8 ТВЕРДОСМАЗОЧНОГО SiC ПОКРЫТИЯ***канд. техн. наук, доц. А.А. ШМАТОВ**(Белорусский национальный технический университет, Минск);**канд. техн. наук О.В. ЖИЛИНСКИЙ, С.И. МАРОЧКИНА**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);**А.Е. СОЛОМЯНСКИЙ**(Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск)*

Приведены результаты исследования триботехнических свойств твердосмазочных покрытий, полученных на высокоуглеродистой стали У8 (0,8 % С) в результате термогидрохимической обработки. Выполнена оптимизация состава вододисперсной среды на основе SiC и температурно-временных параметров процесса ТГХО по коэффициенту трения твердосмазочных покрытий. Используя математические модели, построены диаграммы «параметры процесса – свойство». Обработка по оптимальному режиму термогидрохимической обработки стали У8 в среде гидрозоля SiC позволяет в условиях отсутствия смазки снизить коэффициент трения стальной поверхности в 5,3 раза по сравнению с необработанной.

Введение. Проблема повышения долговечности стальных инструментов, техоснастки и деталей машин по-прежнему остается актуальной. Существуют различные способы ее решения. Основной тенденцией развития зарубежных технологий является разработка и применение процессов получения покрытий из износостойких тугоплавких соединений следующими 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, др.). Однако эти способы упрочнения имеют ряд недостатков, главными из которых являются: 1) высокие температуры проведения процессов, вызывающие деформацию изделий и разупрочнение исходной матрицы; 2) малая производительность и высокая стоимость применяемого оборудования; 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 ТГХО (термогидрохимической обработки), поскольку он отличается эффективностью и высокой производительностью, применим для готовых к эксплуатации изделий из различных сталей и сплавов, незначительно меняет их первоначальные размеры, форму и структуру [5–10].

Термогидрохимическая обработка предназначена химически осаждать на поверхности различных материалов антифрикционные твердосмазочные покрытия, которые обладают резервными возможностями в жестких и катастрофических условиях эксплуатации инструментов и машин [5–10]. Покрытия приобретают твердосмазочные свойства в случае, когда а) созданы из материалов со слоистой поликристаллической структурой (графит, сульфиды, 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, в результате чего происходит пластифицирование поверхностного слоя и создание 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 и формированию квазижидкой пленки, снижающей коэффициент трения и фрикционный разогрев [11–14].

Термогидрохимическая обработка 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 [5–10]. При формировании таких покрытий реализуется эффект Ребиндера за счет введения в вододисперсную среду поверхностно-активных веществ (ПАВ) [13]. 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 2...3 раза [2–4]. Согласно вакансионно-диффузионному и адгезионно-деформационному механизмам трения повышение износостойкости твердого тела можно достичь при сочетании вышеназванных эффектов: высокой твердости его поверхности и низкой прочности адгезионной связи [11; 12; 14].

Поскольку в результате ТГХО исходная структура материала сохраняется (не разупрочняется), а конечные размеры и форма изделий практически не меняются, данные покрытия можно наносить на го-

товые 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 [5–10; 15].

Карбид кремния (SiC) – это универсальный материал будущего; он имеет множество применения 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 значения [2; 4].

Из приведенного анализа следует, что у процесса ТГХО есть большие перспективы для своего развития, прежде всего для инструментов, имеющих малый ресурс работы. Особое внимание в этом плане следует уделить нелегированным сталям (У8, У10, У12 и др.), которые благодаря их невысокой стоимости широко используются для изготовления различных видов штампового инструмента. Однако вопросы, связанные с термогидрохимической обработкой практически всех сталей и сплавов, мало изучены.

Огромную помощь исследователю при трудоемком выборе оптимального варианта проведения процесса ТГХО сталей и сплавов 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 стали У8 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 [17–20].

Вышесказанное определило цель данной работы – оптимизация и компьютерное проектирование технологии ТГХО для получения на стали У8 твердосмазочного SiC покрытия за счет применения метода многомерного проектного синтеза технических объектов, материалов и технологий.

Объекты и методика исследований. Термогидрохимической обработке подвергали сталь У8, которая широко используется на практике. Сам процесс ТГХО осуществляли путем проведения двух операций: 1) гидрохимической обработки (ГХО) поверхности стали при температуре 98...100 °С в течение 15...300 минут в специально приготовленной водной суспензии на базе ультра- и наноразмерных порошков карбида кремния; 2) последующей термической обработки (ТО) при нагреве в окислительной среде до температуры 120...1050 °С, выдержке в течение 30...60 минут и охлаждении на воздухе. 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 pH 6...8, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH₄OH. При проведении ГХО образцы помещали и выдерживали в ванне с готовым рабочим составом, нагретым до температуры процесса. Поверхность образцов предварительно обезжировали и декапировали в 5...10 %-ном растворе серной кислоты в течение 1...2 минут. После каждой операции ГХО образцы промывали в воде. Изотермическую выдержку стали при температурах до 200 °С проводили в воздушной среде, выше 200 °С – в защитной среде.

Для определения триботехнических характеристик твердосмазочных термогидрохимических покрытий на микротрибометре (рис. 1) применяли образцы размером 10×10 мм.

При проектировании технологического процесса ТГХО инструментальной стали У8 применяли синтез-технологии метода многомерного проектного синтеза технологических объектов, материалов и технологий в виде базовой компьютерной программы СИНТЕЗ МК [17; 18]. Предлагаемый метод позволяет оперировать не только математическими, но и техническими критериями оптимальности. Для реализации процедур многомерного проектного синтеза технологической системы при проведении ТГХО стали У8 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.

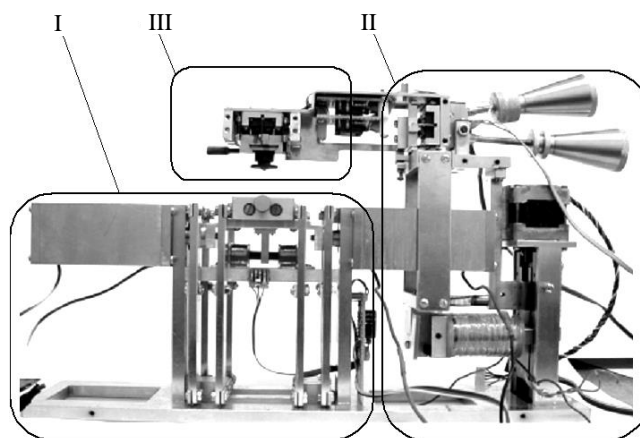


Рис. 1. Микротрибометр возвратно-поступательного типа с максимальной прилагаемой нагрузкой 1 Н (производство ИММС, Гомель, Беларусь)

Метод многомерного проектного синтеза технологической системы, в отличие от метода [16], 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 проектирования технологии ТГХО стали У8. Для достижения поставленных целей сталь У8 подвергали гидрохимической обработке в вододисперсной среде, содержащей SiC и ПАВ, при нагреве до температуры, близкой к температуре кипения, в течение 40...70 минут; отпуск осуществляли при температуре 120...180 °С. В таких условиях при ТГХО формируются твердосмазочные SiC покрытия с наилучшими антифрикционными свойствами без изменения исходной структуры стали У8 (рис. 2, а, б).

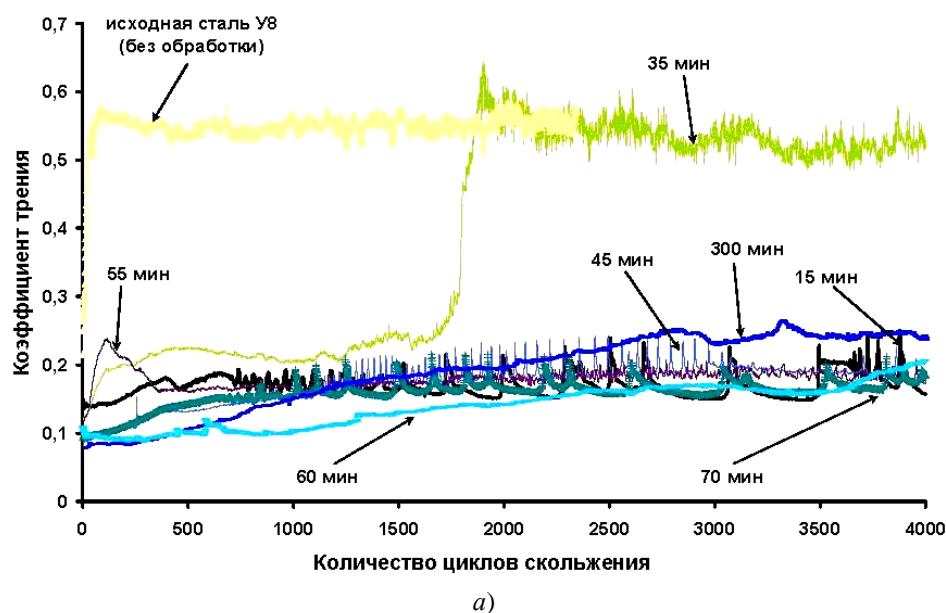
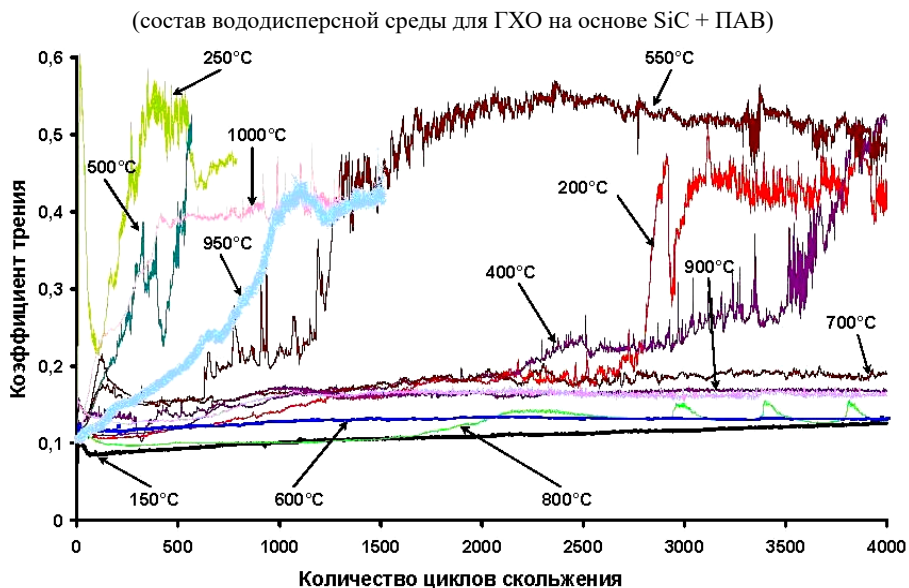


Рис. 2. Влияние параметров процесса ТГХО на коэффициент трения стали У8, режим ТГХО (см. также с. 56):
а – гидрохимическая обработка без отпуска: при $T = 100$ °С



б)

Рис. 2. Окончание:

б – отпуск после гидрохимической обработки: при ГХО $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2\text{ ч}$; при ТО $\tau = 0,5\text{ ч}$
 (условия испытаний: сухое трение скольжения (без смазки);
 пара трения: упрочненная сталь У8 (плоскость) – сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм)
 нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм, скорость 4-мм/с

При оптимизации процесса варьировали только температуру и время гидрохимической обработки, долевое содержание основного компонента химически активной среды и температуру отпуска.

В таблице 1 представлены результаты триботехнических испытаний термогидрохимически упрочненной стали У8, полученные при реализации 11 опытов плана экспериментов [16].

Таблица 1

Результаты исследования коэффициента трения твердосмазочных покрытий на стали У8, полученных ТГХО в вододисперсном составе на основе SiC

Номер опыта	Факторы				Параметры оптимизации
	гидрохимическая обработка			отпуск	
	температура T , $^{\circ}\text{C}$	время τ , мин	доля ПАВ в составе, %	температура T , $^{\circ}\text{C}$	
Условное обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1
Основной уровень (0)	95	55	6	145	
Интервал варьирования	5	15	2	25	
Верхний уровень (+1)	100	70	8	180	
Нижний уровень (-1)	90	40	4	120	
1	+	+	+	+	0,115
2	-	+	+	-	0,129
3	+	-	+	+	0,192
4	-	-	+	+	0,203
5	+	+	-	+	0,112
6	-	+	-	-	0,128
7	+	-	-	-	0,185
8	-	-	-	+	0,210
9	0	0	0	0	0,121
10	0	0	0	0	0,120
11	0	0	0	0	0,123

На основании полученных 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:

$$Y_1 = 0,86 - 4,83 \cdot 10^{-3} X_1 - 2,20 \cdot 10^{-3} X_2 - 5,24 \cdot 10^{-2} X_3 - 4,70 \cdot 10^{-4} X_4 + 3,99 \cdot 10^{-10} X_1^4 + 1,590 \cdot 10^{-9} X_2^4 + 3,34 \cdot 10^{-5} X_3^4 + 3,62 \cdot 10^{-11} X_4^4 + 2,00 \cdot 10^{-4} X_1 X_3,$$

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 стали У8» 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 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.

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 стали У8 в гидрозолье 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 стали У8 с помощью программы СИНТЕЗ МК осуществляли в несколько этапов. Результаты выбора оптимального варианта изучаемой технологической системы представлены в таблицах 2, 3.

Таблица 2

Оптимальные параметры процесса ТГХО стали У8
в вододисперсном составе на основе SiC и поля их рассеивания

Наименование параметра процесса	Номинальное значение	Разрешенные поля рассеивания
Температура гидрохимической обработки, °С	98	4
Время гидрохимической обработки, мин	64	12
Доля ПАВ в составе, %	6	2
Температура отпуска, °С	147	32

Таблица 3

Оптимальные показатели свойства твердосмазочных покрытий,
полученных ТГХО стали У8 в вододисперсном составе на основе SiC и поля их рассеивания

Наименование оптимального показателя свойств	Номинальное значение	Поле рассеивания
Коэффициент трения, f	0,106	0,014

При решении обратной многокритериальной задачи были заданы желаемые уровни показателей свойств твердосмазочных покрытий, полученных ТГХО стали У8 (табл. 4).

Таблица 4

Заданные границы свойства твердосмазочных покрытий,
полученных ТГХО стали У8 в вододисперсном составе на основе SiC

Наименование желаемого показателя свойств	Минимальное значение	Максимальное значение
Коэффициент трения, f	0,090	0,120

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, °C	98	±1	2	2,5
Время гидрохимической обработки, мин	64	±1	2	6,1
Доля ПАВ в составе, %	6	±1	2	0,8
Температура отпуска, °C	147	±5	10	3,3

Для графической интерпретации результатов, полученных при решении задач исследования и проектирования технологии ТГХО стали У8 в вододисперсном составе на основе SiC, построены дискретные портреты (рис. 3).

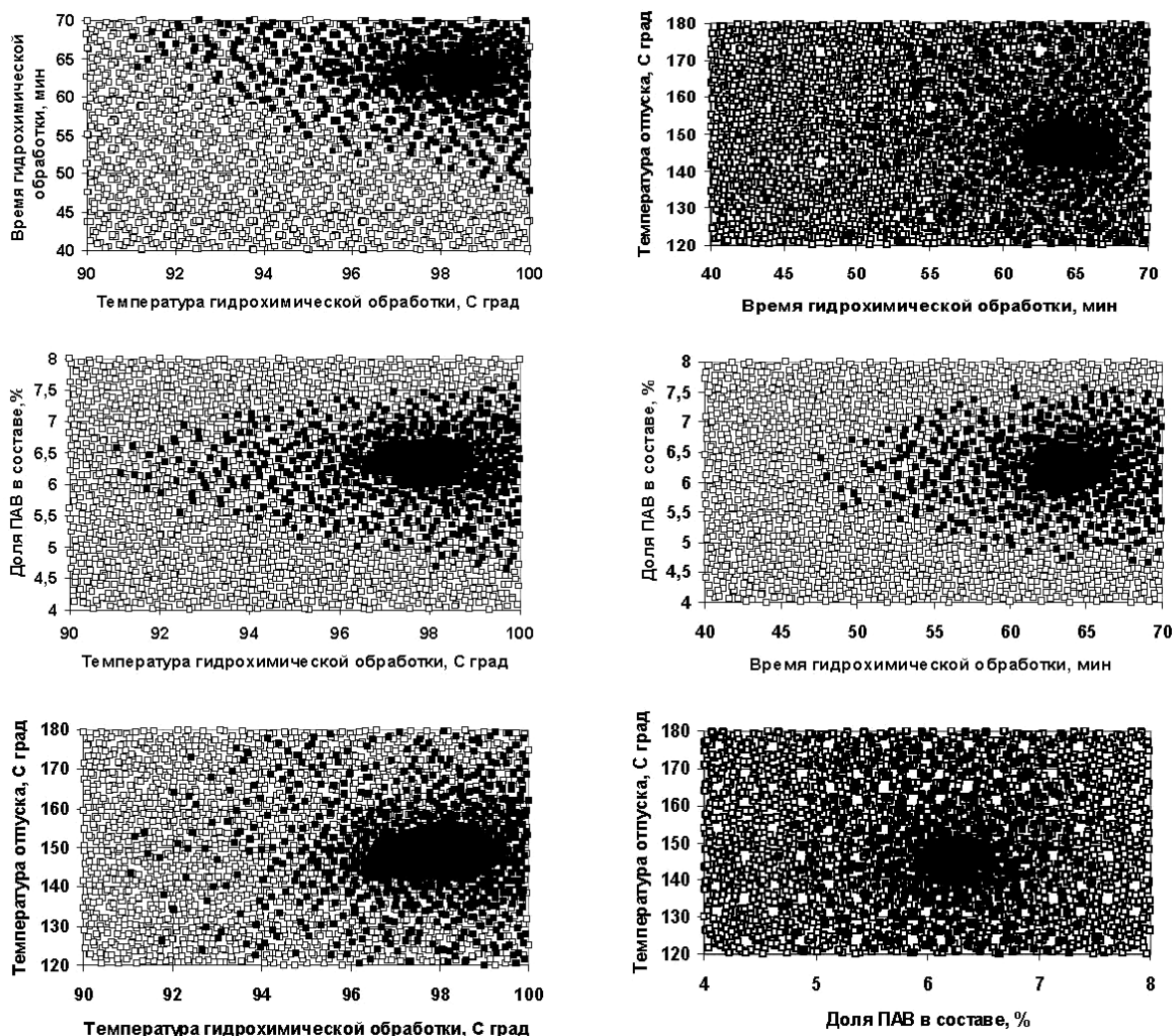


Рис. 3. Дискретные портреты виртуального пространства технологической системы процесса ТГХО стали У8 в вододисперсной SiC среде:

- ◆ – вариант системы, обеспечивающий заданные свойства стали У8;
- ◇ – вариант системы, не обеспечивающий заданные свойства стали У8

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: 0,090...0,120 (см. табл. 4).

Из рисунка 3 видно, что технология ТГХО стали У8 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 с заданными свойствами в этом случае не будет получен.

В результате решения задачи проектирования технологии ТГХО стали У8 в вододисперсном составе на основе SiC установлены фактические показатели основного ее триботехнического свойства (табл. 6), 100 %-ная воспроизводимость которого достигается при точном соблюдении параметров процесса в пределах производственных допусков (см. табл. 5).

Таблица 6

Фактические показатели свойства стали У8 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	0,106	0,099	0,113

Сказанное выше подтвердили результаты испытаний, представленные на рисунке 4.

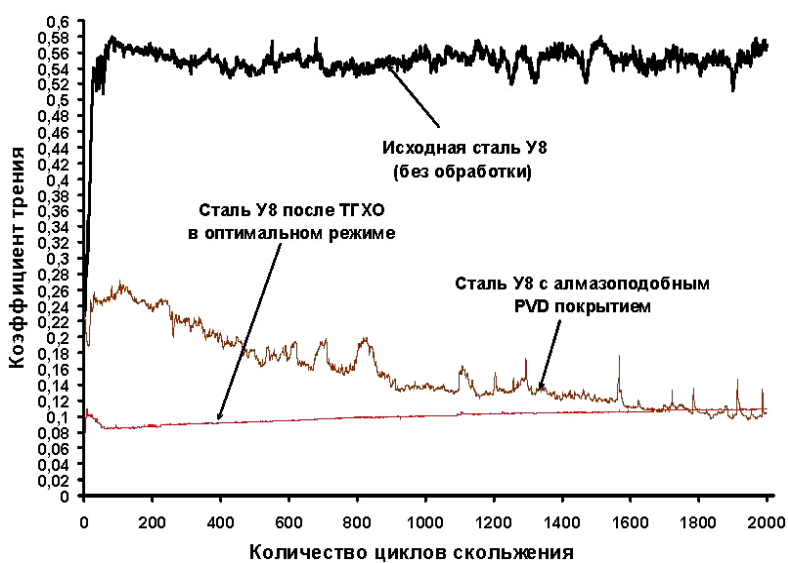


Рис. 4. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения стали У8 до и после упрочнения условия испытаний:

сухое трение, нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм, скорость 4 мм/с оптимальный режим ТГХО: ГХО в среде SiC при $T = 98...100$ °C, $\tau = 1$ ч; ТО при $T = 147$ °C, $\tau = 0,5$ ч

Для любого инструмента, у которого место контакта с обрабатываемой деталью меняется со временем [21], важно на протяжении всего периода эксплуатации иметь не только минимальные, но неизменные значения коэффициента трения. Таким требованиям отвечают термогидрохимические покрытия, и в этом они имеют преимущества перед PVD алмазным покрытием (см. рис. 4) и другими известными твердосмазочными покрытиями [15].

Применение результатов исследований. Результаты производственных испытаний показали, что ТГХО с использованием вододисперсных оксидных и карбидных составов позволяет увеличить стойкость различных видов стального инструмента в 1,3...8 раз по сравнению с необработанным, что проиллюстрировано данными таблицы 7.

Таблица 7

Результаты испытаний стального инструмента, подвергнутого ТГХО

Вид инструмента	Материал инструмента	Место испытаний	Повышение стойкости инструмента, K_w
Метчики	б. р. стали	«VUNZ»(Чехия); «Daewoo» (Корея); «САЛЮТ», «УМПО», «ПМЗ» (Россия); «БелАЗ», «МТЗ» (Беларусь)	1,7...4,5
Ленточные пилы	б. р. стали	«VUNZ» (Чехия)	2,5...3
Сверла	б. р. стали	«PS» (Словакия); «VUNZ» (Чехия); «Дукс» (Россия); «Мотовело», «БелАЗ» (Беларусь)	1,8...2,9
Зенкера	б. р. стали	«САЛЮТ», «Искра», ВТЗ (Россия)	1,8...3
Развертки	б. р. стали	«Мотовело», «БАТЭ», «АГУ» (Беларусь)	1,5... 2,7
Протяжка	б. р. стали	«Мотовело» (Беларусь)	2...2,5
Резцы	б. р. стали	«Мотовело», «БелАЗ» (Беларусь)	1,3...1,9
Долбяки	б. р. стали	«Мотовело» (Беларусь)	1,6...2,1
Фрезы	б. р. стали	«Мотовело», «БелАЗ», «МТЗ» (Беларусь)	2...8
Ножи для обработки стекловолокна	б. р. стали	«Skloplast» (Словакия)	1,9...2,2
Штампы для холодного деформирования	Штамповые стали	«ZVL-LSA» (Словакия); «БелАЗ» (Беларусь)	1,8...2,5
б. р. – быстрорежущие стали.			

Анализируя данные таблицы 7, следует отметить, что наивысшие показатели износостойкости режущего и штампового инструмента достигнуты при обработке труднообрабатываемых и цветных сплавов.

Технология термогидрохимической обработки внедрена в Беларуси на предприятиях «БелАЗ», «Мотовело», «МТЗ» и других.

Заключение. В результате проведенного исследования выполнено математическое моделирование и компьютерное проектирование процесса ТГХО стали У8 в среде гидрозоля SiC 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 стальных изделий, подвергнутых ТГХО. Обработка инструментальной стали У8 по оптимальному режиму ТГХО позволяет существенно (в 5,3 раза) снизить коэффициент трения стальной поверхности в условиях скольжения без смазки.

Разработан простой и экономичный способ термогидрохимической обработки инструментальных сталей, использование которого позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов стального инструмента в 1,3...8 раз по сравнению со стандартным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки; 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. Чердниченко. – М.: Омега, 2008. – 752 с.
5. Шматов, А.А. Модифицирование стали в вододисперсной среде / А.А. Шматов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. – 2012. – № 3. – С. 82–89.
6. Шматов, А.А. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке твердого сплава / А.А. Шматов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 2. – С. 33–40.
7. Шматов, А.А. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке стали / А.А. Шматов, Г.К. Жавнерко, Ю.О. Лисовская // Материаловедение. – 2013. – № 1. – С. 43–50.
8. Витязь, П.А. Упрочнение твердого сплава методом термогидрохимической обработки / П.А. Витязь, А.А. Шматов, О.Г. Девойно // Докл. НАН Беларуси. – 2013. – Т. 57, № 1. – С. 113–17.

9. Шматов, А.А. Влияние термогидрохимической обработки на морфологию и шероховатость стальной поверхности / А.А. Шматов, Ю.В. Синькевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. – 2013. – № 3. – С. 66–72.
10. Шматов, А.А. Сопротивляемость изнашиванию стали, упрочненной термогидрохимической обработкой / А.А. Шматов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 7. – С. 28–34.
11. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф. Майснер; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
12. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
13. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – 135 с.
14. Гаркунов, Д.Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник. – М.: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с.
15. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 170 с.
16. Новик, Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении. 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. Компьютерные синтез-технологии исследования и проектирования технических и технологических систем // Информационные технологии в промышленности (ИТИ-2008): пятая междунар. науч.-техн. конф., 22–24 окт. 2008 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – С. 11–12.
19. 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. – 2010. – № 2. – С. 139–146.
20. Исследование и компьютерное проектирование процесса ТГХО твердого сплава ВК6 / А.А. Шматов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. – 2010. – № 8. – С. 125–133.
21. Бельский, С.Е. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента / С.Е. Бельский, Р.Л. Гофпенец. – Минск: Наука и техника, 1984. – 128 с.

Поступила 23.12.2013

COMPUTER DESIGN OF THCT PROCESS FOR OBTAINING SIC SOLID-FILM LUBRICANT ON STEEL У8

A. SHMATOV, O. ZHILINSKY, S. MAROCHKINA, A. SOLOMJANSKY

The results examination of the frictional properties of solid-film lubricant, obtained by thermohydrochemical treatment of high carbon steel У8 (0,8 wt. % C), are presented. Optimization of the 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 tool steel surface in 5,3 as compared with untreated.