

УДК 621.78.001, 621.81

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТГХО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ  
ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ У8***канд. техн. наук А.А. ШМАТОВ**(Белорусский национальный технический университет, Минск);**канд. техн. наук О.В. ЖИЛИНСКИЙ, С.И. МАРОЧКИНА**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, 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 высокоуглеродистой стали У8 (0,8 % С) в результате термогидрохимической обработки (ТГХО). Выполнена оптимизация состава суспензии и температурно-временных параметров процесса ТГХО по коэффициенту трения твердосмазочных покрытий. Используя математические модели построены диаграммы «параметры процесса – свойство». Обработка по оптимальному режиму ТГХО позволяет в условиях отсутствия смазки снизить коэффициент трения поверхности инструментальной стали в 8,3 раза по сравнению с необработанной.*

**Введение.** Уровень развития современной техники характеризуется широким использованием сложнолегированных и других труднообрабатываемых сталей и сплавов для изготовления деталей машин. Это требует применения инструментов с повышенными эксплуатационными свойствами, которые можно создать путем объемного и поверхностного упрочнения, в том числе нанесением на поверхность инструментов антифрикционных твердосмазочных покрытий.

Согласно современным представлениям в области трения и изнашивания [1 – 5] 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 диффузионо-вакансионному механизму трения повышение износостойкости твердого тела можно достичь при сочетании двух вышеназванных эффектов: при высокой твердости поверхности материала и низкой прочности адгезионной связи.

Среди различных способов получения твердосмазочных покрытий следует выделить методы, которые позволяют сформировать наноструктуру на основе антифрикционных материалов [6 – 10]. 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 [5]. Наибольший интерес в этом аспекте представляют твердосмазочные покрытия с наноструктурой, полученные низкотемпературным методом термогидрохимической обработки (ТГХО) [7 – 10]. Данные покрытия можно наносить на готовые к эксплуатации инструменты, поскольку в результате этой обработки сохраняется исходная структура инструментального материала (не разупрочняется), при этом конечные размеры и форма инструментов не меняются. С другой стороны, в условиях интенсивной эксплуатации инструмента, когда в зоне трения отсутствует смазка или ее подача ограничена, наилучшим способом снижения коэффициента трения рабочей кромки инструмента является твердосмазочное покрытие, гарантирующее длительную работу инструменту. Термогидрохимическая обработка – наиболее простой и универсальный метод. 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 инструмента, имеющего 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 инструментальных сталей, 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 мате-

риала, затем создают математические модели, описывающие влияние факторов, и с помощью графической интерпретации выбирают оптимальные параметры процесса [11]. 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) 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 [12 – 15].

Целью данной работы исходя из вышеизложенного явились оптимизация и компьютерное проектирование технологии ТГХО штамповой стали У8 с применением 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) химической обработки (ХО) поверхности инструмента при температуре 95...100 °С в течение 40...120 мин в специально приготовленной водной суспензии на базе ультра- и наноразмерных порошков оксидов титана и молибдена; 2) последующей термической обработки (ТО) при нагреве в окислительной среде до температуры 150...200 °С, выдержке в течение 30...60 мин и охлаждении на воздухе. 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...10 % активатора процесса: водорастворимого поверхностно-активного вещества сульфанола. 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 обезжировали и декапировали в 5...10 % растворе серной кислоты в течение 1...2 минут. После каждой операции подготовки и химической обработки образцы промывали в воде. Изотермическую выдержку стали при температурах 150...200 °С проводили в воздушной среде.

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

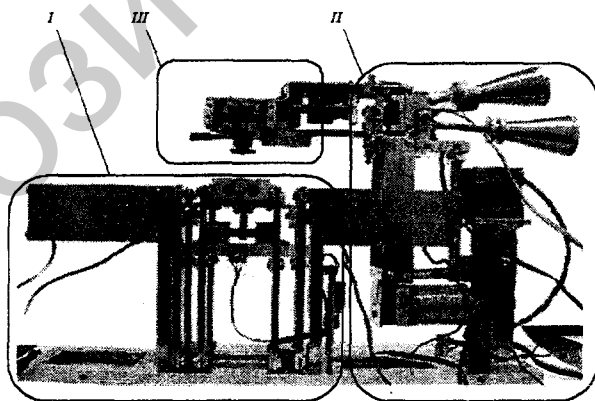


Рис. 1. Микротрибометр возвратно-поступательного типа с максимальной прилагаемой нагрузкой 1,8 Н (производства ИММС, г. Гомель, Беларусь)

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 [12]. 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 и метод построения графического изображения состояний технологической системы.

Метод многомерного проектного синтеза технологической системы в отличие от известных методов [11] 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 оптимизации ТГХО стали У8.** При оптимизации процесса сталь У8 подвергали гидрохимической обработке в кипящей водной суспензии на основе  $TiO_2 - MoO_3$  с добавлением 5 % ПАВ (сульфанола) в течение 1 часа, а отпуск осуществляли при температуре не выше 200 °С, поскольку в таких условиях при ТГХО формируются твердосмазочные покрытия с наилучшими антифрикционными свойствами (рис. 2). При этом варьировали только температуру и время гидрохимической обработки, долевое содержание основного компонента химически активной среды и температуру отпуска.

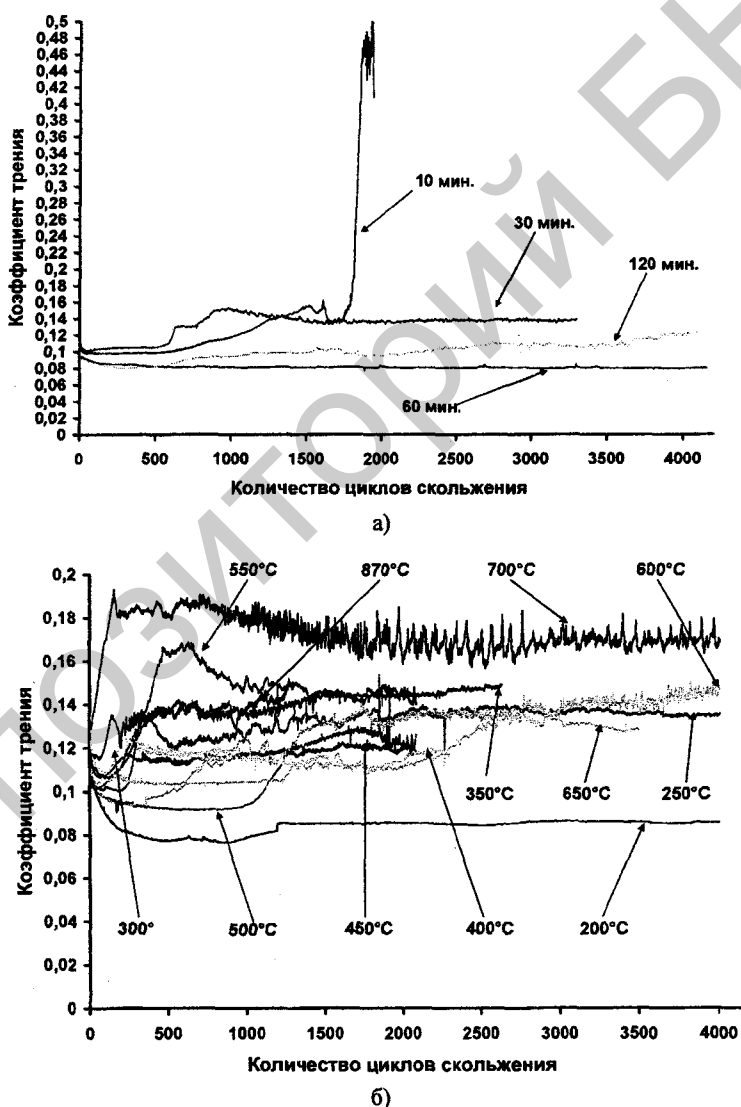


Рис. 2. Влияние параметров процесса ТГХО на коэффициент трения стали У8 (режим ТГХО; состав водной среды для ХО на основе  $TiO_2 + MoO_3$ ):  
 а – химическая обработка без отпуска (ХО,  $T = 100$  °С);  
 б – отпуск после химической обработки (ХО,  $T = 100$  °С,  $\tau = 2$  ч; при ТО  $\tau = 0,5$  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  $4 \cdot 10^{-3}$  мм/с

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

Таблица 1

Результаты исследования коэффициента трения твердосмазочных покрытий на стали У8, полученных ТГХО в суспензии на основе  $TiO_2-MoO_3$

Номер опыта	Факторы				Параметры оптимизации
	Гидрохимическая обработка			Отпуск	Коэффициент трения, $K_{тр}$
	температура, $T, ^\circ C$	время, $\tau$ , мин	доля $MoO_3$ в смеси оксидов, %	Температура, $T, ^\circ C$	
Условное обозначение	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1$
Основной уровень (0)	95	45	50	175	
Интервал варьирования	5	15	25	25	
Верхний уровень (+1)	100	60	75	200	
Нижний уровень (-1)	90	30	25	150	
1	+	+	+	+	0,072
2	-	+	+	-	0,080
3	+	-	+	+	0,077
4	-	-	+	+	0,081
5	+	+	-	+	0,099
6	-	+	-	-	0,126
7	+	-	-	-	0,104
8	-	-	-	+	0,113
9	0	0	0	0	0,089
10	0	0	0	0	0,094
11	0	0	0	0	0,091

На основании данных (см. табл. 1) рассчитаны линейные и нелинейные математические модели, описывающие влияние температурно-временных параметров и состава активной смеси на коэффициент трения ТГХ твердосмазочных покрытий. Однако адекватными признаны только нелинейные многокритериальные математические модели следующего вида:

$$Y_1 = 1,39 - 18,95 \cdot 10^{-3} X_1 + 6,37 \cdot 10^{-4} X_2 - 44,99 \cdot 10^{-4} X_3 - 16,36 \cdot 10^{-4} X_4 + 8,1 \cdot 10^{-5} X_1^2 - 4,78 \cdot 10^{-7} X_2^2 - 1,31 \cdot 10^{-7} X_3^2 + 4,09 \cdot 10^{-6} X_4^2 + 4,07 \cdot 10^{-5} X_1 X_3,$$

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 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 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 стали У8 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 ударно-штамповой стали У8 с помощью программы СИНТЕЗ МК осуществляли в несколько этапов. Результаты выбора оптимального варианта изучаемой технологической системы сведены в таблицах 2, 3. При решении обратной многокритериальной задачи были заданы желаемые уровни показателей свойств твердосмазочных покрытий, полученных ТГХО

стали У8 (табл. 4). Результаты виртуальных испытаний работоспособности системы в условиях влияния дестабилизирующих факторов производства приведены в таблице 5.

Таблица 2

Оптимальные параметры процесса ТГХО стали У8 и поля их рассеивания

Наименование параметра процесса	Номинальное значение	Разрешенные поля рассеивания
Температура гидрохимической обработки, °С	100	4
Время гидрохимической обработки, мин	67	9
Доля $MoO_3$ в смеси оксидов, %	57	8
Температура отпуска, °С	189	22

Таблица 3

Оптимальные показатели свойства твердосмазочных покрытий, полученных ТГХО стали У8 в суспензии на основе  $TiO_2 - MoO_3$  и поля их рассеивания

Наименование оптимального показателя свойств	Номинальное значение	Поле рассеивания
Коэффициент трения, $K_{тр}$	0,066	0,013

Таблица 4

Заданные границы свойства твердосмазочных покрытий, полученных ТГХО стали У8 в суспензии на основе  $TiO_2 - MoO_3$

Наименование желаемого показателя свойств	Минимальное значение	Максимальное значение
Коэффициент трения, $K_{тр}$	0,060	0,075

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	2,0
Время гидрохимической обработки, мин	67	±1	2	4,5
Доля $MoO_3$ в смеси оксидов, %	57	±1	2	4,0
Температура отпуска, °С	189	±5	10	2,2

Для графической интерпретации результатов, полученных при решении задач исследования и проектирования технологии ТГХО стали У8, 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: 0,060...0,075 (см. табл. 4). Технология ТГХО стали У8 реализуется с высокими свойствами только тогда, когда система попадает в области устойчивости, отмеченные темными точками на рисунке 3. 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 установлены фактические показатели основного ее 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. 4).

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, $K_{тр}$	0,066	0,064	0,068

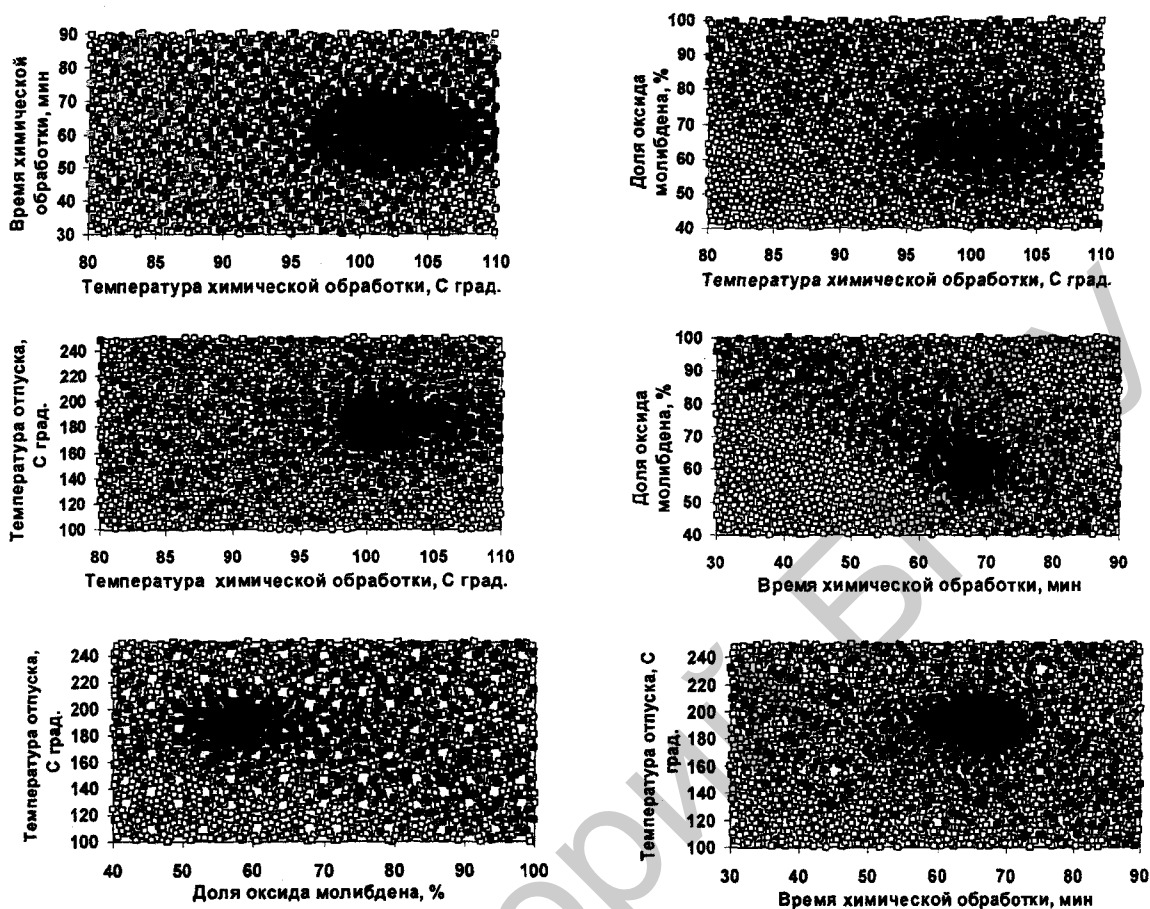


Рис. 3. Дискретные портреты виртуального пространства технологической системы процесса ТГХО стали У8 в суспензии на основе  $TiO_2 - MoO_3$ :

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

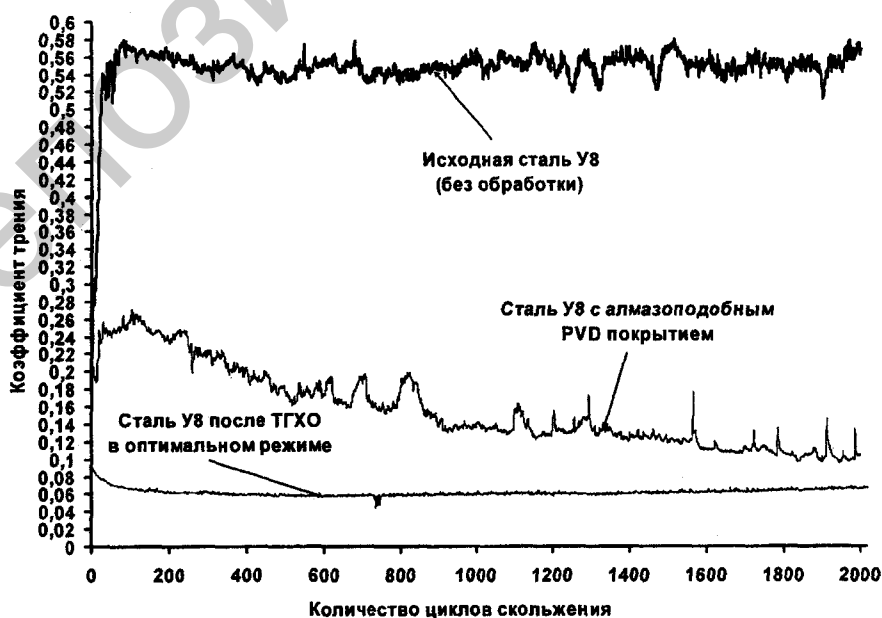


Рис. 4. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения стали У8 до и после упрочнения условия испытаний:

сухое трение, нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм, скорость  $4 \cdot 10^{-3}$  мм/с

оптимальный режим ТГХО: ХО в составе  $TiO_2 - MoO_3$  при  $T = 100$  °С,  $\tau = 1$  ч; ТО при  $T = 200$  °С,  $\tau = 0,5$  ч

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 [4]. 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 самосмазывающий эффект.

**Применение результатов исследований.** Результаты производственных испытаний свидетельствуют о том, что ТГХО с использованием оптимальных составов водных оксидных суспензий позволяет увеличить стойкость различных видов стального инструмента в 1,3...4,1 раза по сравнению с необработанным (табл. 7).

Таблица 7

Результаты испытаний стального инструмента, подвергнутого ТГХО

Вид инструмента	Материал инструмента	Место испытаний	Повышение стойкости инструмента, $K_{\mu}$
Метчики	б. р. стали*	«VUHZ» (Чехия), «Daewoo» (Корея) «САЛЮТ» (РФ), «УМПО» (РФ), «ПМЗ» (РФ), «БелАЗ», «МТЗ»	2...4,1
Ленточные пилы	б. р. стали	«VUHZ» (Чехия)	2,5...3
Сверла	б. р. стали	«PS» (Словакия), «VUHZ» (Чехия), «Дукс» (РФ), «Мотовело», «БелАЗ»	1,8...2,9
Зенкера	б. р. стали	«САЛЮТ» (РФ), «Искра» (РФ), ВТЗ (РФ)	1,8...3
Развертки	б. р. стали	«Мотовело», «БАТЭ», «АГУ»	1,5...2,7
Протяжка	б. р. стали	«Мотовело»	2...2,5
Резцы	б. р. стали	«Мотовело», «БелАЗ»	1,3...1,9
Долбяки	б. р. стали	«Мотовело»	1,6...2,1
Фрезы	б. р. стали	«Мотовело», «БелАЗ», «МТЗ»	
Ножи для обработки стекловолокна	б. р. стали	«Skloplast» (Словакия)	1,9...2,5
Штампы для холодного деформирования	штамп. стали**	«ZVL-LSA» (Словакия), «БелАЗ»	1,8...2,5

б. р. стали\* – быстрорежущие стали; штамп. стали\*\* – штамповые стали.

Анализируя таблицу 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 др.

#### Выводы:

1) выполнено математическое моделирование и компьютерное проектирование процесса ТГХО инструментальной стали У8 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 стальных инструментов, подвергнутых ТГХО;

2) обработка инструментальной стали по оптимальному режиму ТГХО позволяет существенно (в 8,3 раза) снизить коэффициент трения стали У8 в условиях сухого трения скольжения;

3) разработан простой и экономичный способ термогидрохимической обработки инструментальных сталей, использование которого позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов стального инструмента в 1,3...4,1 раза выше, по сравнению со стандартным.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Гаркунов, Д.Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник. – М.: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с.
- Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.

3. Польшер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польшер, 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. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под ред. В.С. Чередниченко. – М.: Омега-Л, 2008. – 752 с.
6. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. наука, 2007. – 170 с.
7. Способ упрочнения инструмента из быстрорежущей стали: пат. 2023027 (Рос. Федерация) / А.А. Шматов, Л.Г. Ворошнин; опубл. 15.11.94 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 1994. – № 21.
8. Способ упрочнения алмазного инструмента на металлической связке: пат. 10783 Респ. Беларусь / А.А. Шматов, О.О. Смиловенко, В.И. Жорник и др.; опубл. 24.03.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008.
9. Шматов, А.А. Комбинированное объемно-поверхностное упрочнение стального режущего инструмента / А.А. Шматов // Вестник БрГТУ. Машиностроение. – 2008. – № 5(47). – С. 16 – 21.
10. Шматов, А.А. Низкотемпературное поверхностное упрочнение алмазного инструмента / А.А. Шматов, О.О. Смиловенко // Вестн. БНТУ. – 2009. – № 1. – С. 27 – 32.
11. Новик, Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Раздел IV / Ф.С. Новик. – М.: МиСИС, 1971. – 148 с.
12. 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.
13. Компьютерные синтез-технологии исследования и проектирования технических и технологических систем / П.А. Витязь [и др.] // Пятая международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности (ITI\*2008)», 22 – 24 октября 2008 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси. – 2008. – С. 11 – 12.
14. Выбор технически оптимального варианта методами компьютерных синтез-технологий исследования и проектирования технических и технологических систем / П.А. Витязь [и др.] // Пятая международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности (ITI\*2008)», 22 – 24 октября 2008 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – С. 29 – 30.
15. Проектирование процесса термоциклической обработки стали Р6М5 с помощью компьютерных синтез – технологий / А.А. Шматов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2009. – № 8. – С. 19 – 25.

Поступила 21.10.2009

#### COMPUTER DESIGN OF THCT PROCESS FOR OBTAINING SOLID-FILM LUBRICANT ON TOOL STEEL Y8

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

*The results examination of the frictional properties of solid-film lubricant, obtained by thermo-hydrochemical treatment of high carbon steel Y8 (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 8,3 as compared with untreated.*