

2 (68) 2012

Учредитель и издатель:
ОАО «Издательство „Политехника“»
191023, Санкт-Петербург,
Инженерная улица, д. 6.
Тел./факс: (812) 312-57-68,
тел.: (812) 571-61-44
E-mail: gfm@polytechnics.spb.ru,
mo@polytechnics.ru
<http://www.polytechnics.spb.ru>

Редакционная коллегия

В. К. Глухих
(Председатель),
доктор технических наук,
председатель МКПП (Москва)
И. С. Алиев,
доктор технических наук, профессор
(ДГМА, Краматорск, Украина)
В. А. Брагинский,
кандидат технических наук (СПб)
Д. В. Васильков,
доктор технических наук, профессор
(БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, СПб)
В. Л. Гиршов,
доктор технических наук, профессор
(СПбГПУ)
О. И. Драчев,
доктор технических наук, профессор
(ТГУ, Тольятти)
В. Н. Иванов,
доктор технических наук, профессор
(ВНИИТЧ им. В. П. Вологодина, СПб)
К. М. Иванов,
доктор технических наук, профессор
(БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, СПб)
В. В. Максаров,
доктор технических наук, профессор
(СЗГТУ, СПб)
В. А. Малышевский,
доктор технических наук, профессор
(ЦНИИ КМ «Прометей», СПб)
К. К. Мертенс,
доктор технических наук, профессор
(СПбГПУ)
О. Н. Миляев
(зам. председателя редколлегии),
кандидат технических наук, профессор
(СПбГИТМО)
А. А. Полозин,
доктор технических наук, профессор
(Фед. ун-т штата Рио Грандэ ду Сулл,
Бразилия)
Б. П. Саушкин,
доктор технических наук, профессор
(РГГУ им. К. Э. Циолковского, Москва)
В. П. Смоленцев,
доктор технических наук, профессор
(ВГТУ, Воронеж)
Л. А. Ушомирская
(зам. председателя редколлегии),
доктор технических наук, профессор
(СПбГПУ)

Редакция

Главный редактор
Г. Ф. Мощенко
(директор издательства)
Ответственный секретарь
А. В. Кольцова
Редактор О. С. Капполь
Корректор Т. Н. Гринчук
Верстальщик А. А. Имамгалиев
Дизайнер М. Л. Черненко

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и СМИ.
Свидетельство о регистрации
ПИ № 77-3106 от 10 апреля 2000 г.

Перепечатка статей
возможна только
с разрешения редакции.

© Издательство «Политехника», 2012

МЕТАЛЛООБРАБОТКА

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

1 Обработка материалов резанием

Никифоров И. П., Мальцев П. Н. Исследование условий для образования стружки на основе номограмм резания при шлифовании	2
Максаров В. В., Ольт Ю., Леонидов П. В. Теория и практика моделирования и управления в области прогнозирования динамических свойств технологических систем.....	5

2 Электрофизические и электрохимические методы обработки

Архипов В. Е., Лондарский А. Ф., Москвитин Г. В., Мельшанов А. Ф., Пугачёв М. С. Нанесение медных покрытий на сталь газодинамическим напылением.....	13
Донцов М. Г., Невский О. И., Балмасов А. В., Кузьмичева Е. В. Электрохимическое и химическое полирование титановых сплавов	18
Коротких М. Т., Ушомирская Л. А. Особенности применения плазменного нагрева при обработке труднообрабатываемых материалов резанием.....	23

3 Новые материалы и технологии производства

Леонтьев Л. Б., Леонтьев А. Л. Исследование влияния технологических параметров формирования металлокерамических покрытий на поверхностях трения на триботехнические свойства сопряжения	28
Горленко А. О., Шупиков И. Л., Тополянский П. А., Тополянский А. П. Модификация рабочих поверхностей деталей из конструкционных и инструментальных материалов нанесением упрочняющего нанопокрытия	31
Хмелевская В. Б., Мосейко Е. С., Черненко В. И. Исследованиеnanoструктурного покрытия для повышения эффективности работы деталей по линии судового валопровода.....	36

4 Обработка материалов давлением

Ефимов М. В. , Станков Ю. Н. , Марков О. Е. Внедрение технологического процесса ковки опорных валков из слитков массой 355 тонн без операции осадки слитка.....	39
---	----

5 Новое в металлургии

Калицев В. А., Щербаков А. И., Евгенов А. Г., Мосолов А. Н., Исходжанова И. В. Технологические особенности производства элинварных сплавов 36НКВХБТЮ-ВИ и 37НКВТЮ-ВИ	43
--	----

Юбилеи	48
Рефераты	54
Контакты с авторами.....	57

Журнал входит в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобразования РФ для публикации основных результатов докторских диссертаций
Подписка: по каталогу «Роспечать» — № 142250,
по Объединенному каталогу «Пресса России»
(через агентство «Книга-сервис») — № 11828.
Журнал выходит каждые 2 месяца.

IP № 010292 от 18.08.98

Налоговая льгота — общероссийский классификатор продукции 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Сдано в набор 21.04.2012. Подписано в печать 15.05.2012. Формат 60x90^{1/8}.

Бумага офсетная. Гарнитура Schoolbook. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 7,2. Тираж 1500 экз. Заказ 232.

Оригинал-макет изготовлен в ОАО «Издательство „Политехника“»,
191023, Санкт-Петербург, Инженерная ул., д. 6.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО «Политехника-сервис»,
191023, Санкт-Петербург, Инженерная ул., д. 6.

УДК 621.001.4

Модификация рабочих поверхностей деталей нанесением упрочняющего нанопокрытия

А. О. Горленко, И. Л. Шупиков, П. А. Тополянский, А. П. Тополянский

Введение

Одним из новых методов модификации поверхности, обеспечивающих нанесение износостойких аморфных нанопокрытий системы Si-O-C-N, является процесс финишного плазменного упрочнения (ФПУ), основанный на применении плазменной струи, истекающей при атмосферном давлении (рис. 1).

В соответствии с безвакуумной технологией ФПУ при типичных скоростях перемещения плазменной струи (10–100 мм/с) покрытие наносится слоями толщиной 30–3 нм. В отличие от конденсированных покрытий в вакууме, осуществляемых при физическом и химическом осаждении покрытий из паровой фазы, покрытие формируется в локальной зоне

касания плазменной струи подложки и только в условиях многослойного нанесения покрытия, что является важной особенностью технологии ФПУ. Циклическое взаимное перемещение плазменной струи и упрочняемой поверхности при ФПУ определяет получение слоистой структуры покрытия и позволяет до минимума уменьшить термическое воздействие плазмы на подложку, полностью исключая разупрочняющий отпуск для всех сталей. Как правило, интегральная температура упрочняемых деталей при нанесении покрытия не превышает 150 °C.

Критерии выбора упрочняющего покрытия по параметрам наноиндентирования

Физико-механические свойства поверхностного слоя с металлическими и неметаллическими покрытиями определяются методом наноиндентирования по ISO 14577-4:2007. Для повышения стойкости к упругой деформации разрушения и уменьшения пластической деформации материал поверхностного слоя должен обладать высокой твердостью и низким модулем упругости. Для количественной оценки стойкости материала покрытия к упругой деформации разрушения используется отношение нанотвердости к эффективному модулю упругости H_{plast}/E^* , называемое также индексом пластичности покрытия, а для оценки сопротивления пластической деформации применяется параметр $H_{\text{plast}}^3/E^{*2}$ [1]. В качестве параметра, характеризующего прочность поверхностного слоя и связанного с упругим восстановлением свойств при наноиндентировании, используется параметр W_e . Эффективный модуль упругости $E^* = E/(1 - v^2)$, где E — модуль Юнга; v — коэффициент Пуассона, а величина упругого восстановления $W_e = h_m - h_r/h_m$, где h_m — наибольшая глубина погружения индентора; h_r — глубина про никновения индентора после снятия нагрузки.

Таким образом, выбор оптимального упрочняющего покрытия по параметрам наноиндентирования может быть произведен на основании определения названных критериев и их сравнении. При этом более износостойким

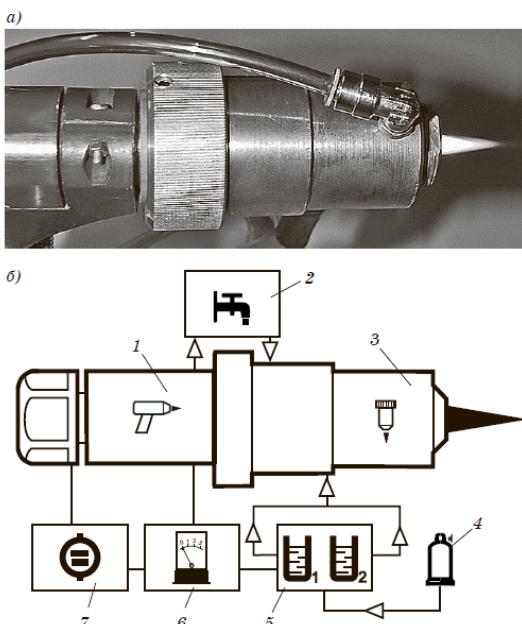


Рис. 1. Вид плазмотрона с реактором (а) и общая схема оборудования ФПУ (б):

1 — плазмотрон; 2 — модуль водяного охлаждения; 3 — реактор; 4 — аргон; 5 — дозатор; 6 — система мониторинга; 7 — источник тока

является покрытие с большими значениями параметров H_{plast}/E^* , H_{plast}^3/E^{*2} и W_e . Кроме того, для минимизации упругих напряжений на границе раздела «покрытие — подложка» и внутренних остаточных напряжений в системе необходимо стремиться получить близкие значения модулей упругости основы и покрытия. Эти принципы можно использовать и при оптимизации технологического процесса и выборе режимов нанесения упрочняющих покрытий.

Физико-механические свойства нанопокрытия системы Si-O-C-N

Проведенный рентгенофазовый анализ подтвердил, что после ФПУ покрытие формируется в аморфном состоянии [2], когда отсутствует дислокационная активность и покрытие должно обладать высокими значениями сопротивления пластической деформации и упругого восстановления. При изучении микроструктуры покрытия системы Si-O-C-N, проведенном при помощи полевого эмиссионного растрового электронного микроскопа JSM-6700F с приставкой для энерго-дисперсионной спектрометрии JED-2300F (JEOL, Япония) было показано, что размер структурных элементов формируемого покрытия изменяется от 5 до 100 нм в зависимости от режимов его нанесения.

Оптимальный режим формирования покрытия можно выбрать на основе определения физико-механических свойств покрытия по ISO 14577-4:2007. Для этих целей использовался микротвердомер Dinamic Ultra Micro Hardness Tester DUN-211S (Shimadzu, Япония).

Обработка результатов измерений проводилась по методу Оливера и Фарра.

Исследованию подвергались образцы из стали X12M, прошедшие термическую обработку — закалку и отпуск до твердости HRC 58–60, абразивную обработку и ФПУ. Толщина покрытия на образце № 1 составляла 0,5 мкм, на образце № 2 – 1,5 мкм. Толщина покрытия оценивалась на эталонных образцах с использованием профилограмм поверхности. Данный метод основан на замере расстояния между средними линиями профилограммы переходной зоны «участок с покрытием — участок без покрытия». При этом покрытие наносилось на образец с использованием маски.

На основании анализа параметров физико-механических свойств была произведена оптимизация режимов нанесения покрытия системы Si-O-C-N. На рис. 2 представлены протоколы и кривые непрерывного индентирования, а также результаты обработки для образцов с разной толщиной покрытия при оптимальном режиме его нанесения. Значения характеристик наноиндентирования по ISO 14577-4:2007 приведены в табл. 1. Как видно, при меньшей толщине покрытия (образец № 1) значение твердости выше, что может быть объяснено более высокой плотностью нанесенного покрытия. Значения универсальной микротвердости HU (при нагрузке 10 Г) и нанотвердости, полученной методом наноиндентирования H_{plast} , отличается почти в 5 раз, что свидетельствует о некорректности измерений микротвердости наноструктурированных покрытий при больших нагрузках. Важно отметить, что покрытие системы Si-O-C-N обладает низким модулем упругости (порядка

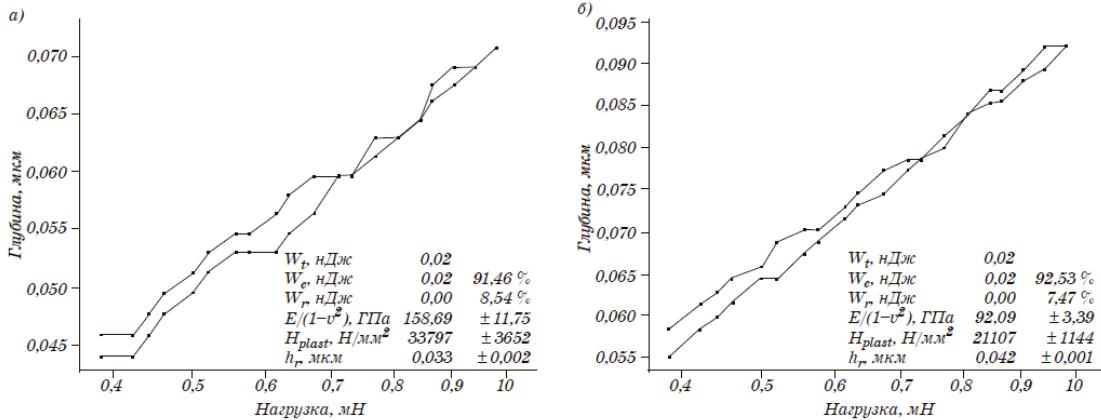


Рис. 2. Протоколы измерения микротвердости и наноиндентирования покрытия на основе системы Si-O-C-N после ФПУ: а — образец № 1 с толщиной покрытия 0,5 мкм; б — образец № 2 с толщиной покрытия 1,5 мкм

Таблица 1

Результаты измерения микротвердости и наноиндентирования покрытия на основе системы Si-O-C-N после ФПУ

Характеристика	№ образца		Характеристика	№ образца	
	1	2		1	2
Универстальная микротвердость HU, ГПа	7,5	4,4	Упругое восстановление W_e , %	91,46	92,53
Нанотвердость H_{plast} , ГПа	34	21	Индекс пластичности H_{plast}/E^*	0,21	0,23
Эффективный модуль упругости E^* , ГПа	159	92	Сопротивление пластической деформации H_{plast}^3/E^{*2}	1,53	1,09

160 ГПа), которое близко к модулю упругости подложки — стали X12M (182 ГПа).

На основании данных исследований определен оптимальный режим нанесения нанопокрытия:

- ток — 100 А;
- напряжение — 31,4 В;
- расстояние до образца — 10 мм;
- расход плазмообразующего газа — 2,9 л/мин;
- расход транспортирующего газа — 1,1 л/мин;
- расход защитного газа — 2,0 л/мин.

В процессе нанесения покрытия температура образцов не превышала 120 °С.

Триботехнические испытания нанопокрытия системы Si-O-C-N

Комплексные испытания проводились в условиях трения скольжения при граничной смазке нормализованным методом на установке (рис. 3), созданной на базе машины трения МИ-1М [3, 4]. Исследовались цилиндрические образцы из стали 45, X12, У8 с нанопокрытием системы Si-O-C-N и аналогичные образцы без покрытия. Нормализованный метод используется для проведения комплексных триботехнических испытаний с целью установить закономерности влияния технологий модификации и режимов обработки на показатели триботехнических свойств цилиндрических поверхностей трения.

При испытаниях с установленными нагрузкой и скоростью скольжения к врачающейся

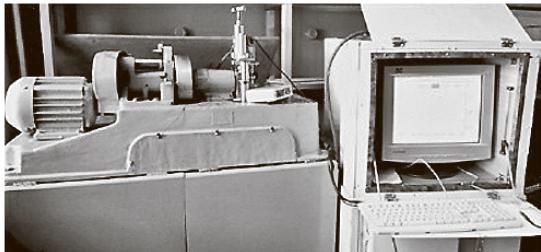


Рис. 3. Установка для триботехнических испытаний

цилиндрической поверхности образца, частично погруженного в смазочный материал, прижимался неподвижный индентор (рис. 4).

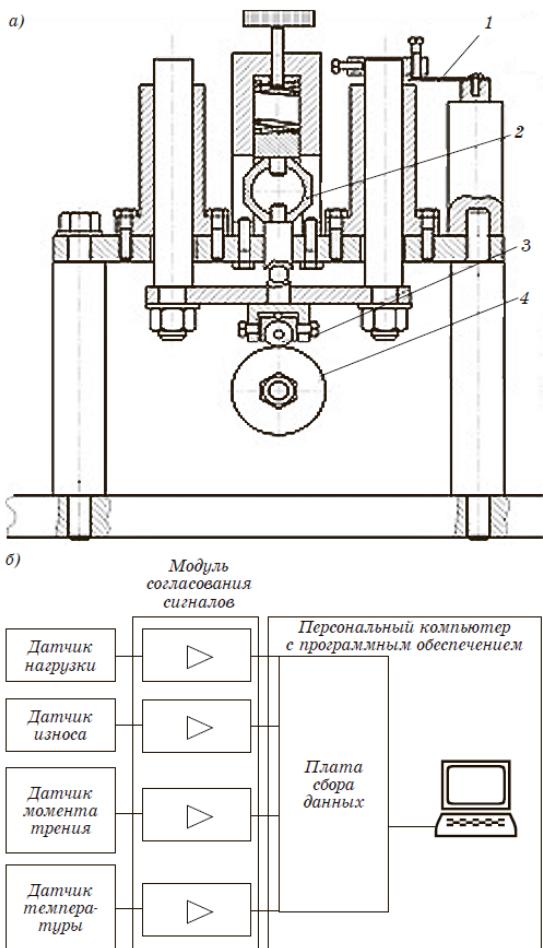


Рис. 4. Модернизированная машина трения МИ-1М: а — нагружающее устройство; 1 — датчик износа; 2 — датчик нагрузки; 3 — индентор; 4 — образец; б — схема системы сбора данных

Для установки образцов и индентора использовалась схема со сменными держателями, обеспечивающая самоустановку индентора относительно испытываемой поверхности образца на промежуточной сферической опоре.

С помощью системы датчиков непрерывно и синхронно регистрировалось время испытания, нагрузка, температура, коэффициент трения и линейный износ. Их численные значения выводились на монитор компьютера. Для измерения момента трения и нагрузки использовались тензодатчики, для измерения температуры — термопары. Для непрерывного измерения износа при испытаниях была разработана специальная схема с применением индуктивного датчика, позволяющая исключить влияние на результаты измерений радиального биения и тепловых деформаций образца.

Для обработки сигналов, получаемых с датчиков, в режиме постоянного времени использовалась автоматизированная система научных исследований (АСНИ), которая состоит из испытательного блока, блоков привода и нагружения, датчиков, мобильного измерительного комплекса, компьютера и специально разработанного программного обеспечения. Питание датчиков и регистрация поступающих с них сигналов производились системой сбора данных — мобильным измерительным комплексом, включающим в себя систему согласования SC-2345 и плату сбора данных М-серии PCI 6220 (рис. 4). Программное обеспечение АСНИ разработано в среде программирования NI LabVIEW 7.

Последовательность испытаний:

- установка частоты вращения — $400 \pm 4\% \text{ мин}^{-1}$.
- плавное сближение испытуемой поверхности образца и индентора, введение их в со-прикосновение, обеспечение нагружения требуемым усилием N , включение непрерывного отсчета времени испытания t , синхронная регистрация линейного сближения в результате износа h и коэффициента трения f . Длительность испытания составляла 8 ч;
- отключение системы нагружения образца, вывод индентора из контакта с поверхностью образца, отключение привода установки по окончании испытания.
- ослабление крепления индентора и поворот его вокруг продольной оси на угол 2–3°, для обеспечения смещения поверхности с пятном износа, после чего новая фиксация индентора;
- проведение каждого испытания на новых рабочих поверхностях одного образца при смещении перед каждым новым испытанием

индентора на величину, большую его ширины.

- последовательное протирание поверхностей образца и индентора бензином и ацетоном перед каждым испытанием, при этом на поверхностях исключались остатки обтирочного материала, в качестве которого применялся батист. Емкость для смазочного материала промывали бензином и высушивали на воздухе при нормальной температуре, затем устанавливали и заполняли новым маслом. Повторное использование масла не допускалось.

- проведение двух испытаний для одной исследуемой поверхности, по результатам которых составлялся протокол испытаний.

По завершении испытаний обработку результатов проводили в следующей последовательности:

- по результатам анализа графиков изменения регистрируемых параметров (рис. 5) определяли следующие показатели триботехнических свойств:

- время приработки t_0 , ч, определяемое как время от начала испытания до момента времени выхода кривой изнашивания (кривой накопления износа) на линейный участок;
- приработочный износ h_0 , мкм, как величина сближения, определяемая в момент времени окончания приработки t_0 ;
- среднее значение коэффициента трения в период нормального изнашивания f ;
- отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки f_0 к его среднему значению в период нормального изнашивания f ;

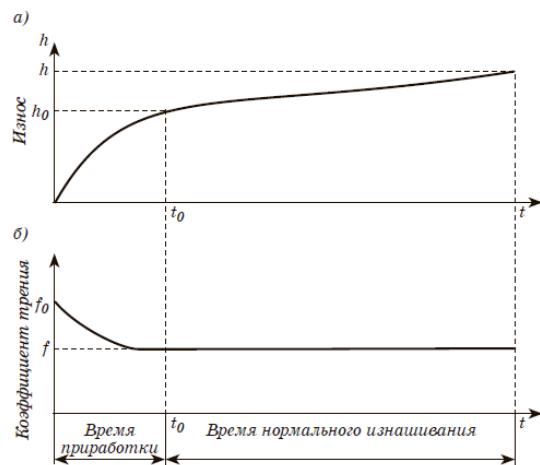


Рис. 5. Изменение линейного сближения (кривая изнашивания) (а) и коэффициента трения (б) в зависимости от времени испытаний

Таблица 2

Результаты испытаний закаленных и шлифованных образцов из различных марок сталей без нанопокрытия (числитель) и с нанопокрытием (знаменатель)

Триботехн. свойство	Показатель	Показатель для материала образца		
		X12	45	У8
Прирабатываемость	Время приработки t_0 , ч	1,10/3,50	0,83/2,25	2,42/2,17
	Приработочный износ h_0 , мкм	1,80/2,0	4,50/2,00	2,50/2,00
	Отношение макс. коэффициента трения в период приработки к его средн. значению в период нормального изнашивания f_0/f	2,00/2,75	1,83/4,5	3,90/3,00
Антифрикционность	Средний коэффициент трения f	0,05/0,03	0,03/0,02	0,02/0,025
Износостойкость	Средняя интенсивность изнашивания $Ih \cdot 10^{-10}$	1,35/0,68	2,57/1,73	1,95/1,75

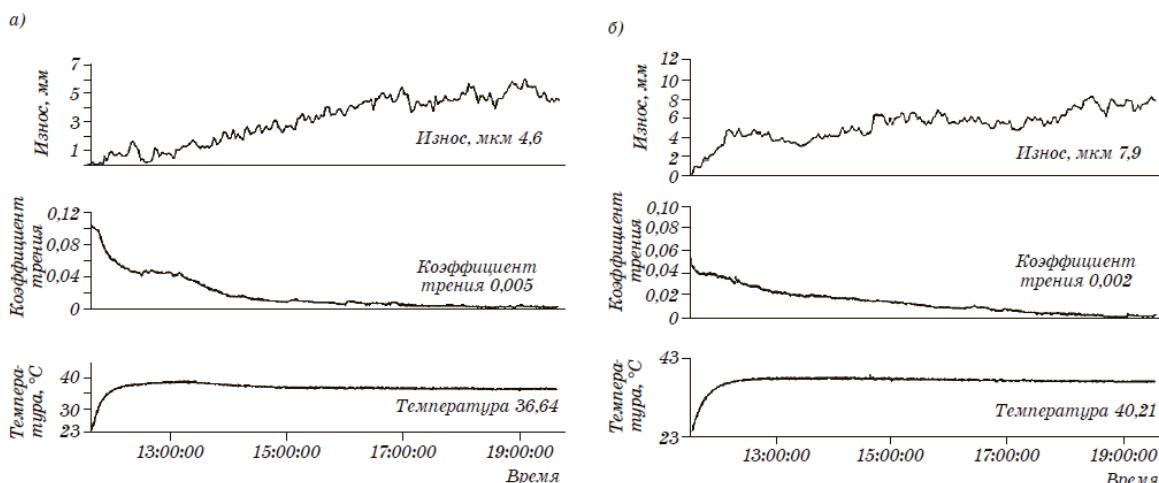


Рис. 6. Протокол испытаний образца из стали 45 с покрытием системы Si-O-C-N (а) и без него (б)

- среднее значение интенсивности изнашивания за время испытаний $I_h = (h - h_i)/L$, где h — суммарная величина сближения индентора с образцом за время испытаний, мкм; h_i — износ индентора за время испытаний, мкм; L — путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний, мкм.
- определенные выше показатели усредняли по результатам испытаний одной исследуемой поверхности и заносили в протокол.

Испытания образцов с покрытием системы Si-O-C-N и без него проводились в условиях:

- скорость скольжения $v = 1$ м/с;
- нормальная нагрузка $N = 100 \pm 2\%$ Н;
- вид первоначального контакта — пластический насыщенный; величина первоначального относительного сближения $\varepsilon = 0,35$;
- вид смазки — граничная;
- вид смазывания — окунание;
- ведущий вид изнашивания — усталостное.

Результаты испытаний представлены в табл. 2. Результаты испытаний в графическом виде (интерфейс пользователя АСНИ) для триботехнических испытаний образцов, изготовленных стали из 45, представлены на рис. 6, который вместе с табл. 2 составляет основу протокола триботехнических испытаний.

Применение нанопокрытия системы Si-O-C-N в машиностроении

На основании проведенных исследований технология ФПУ с нанесением упрочняющего нанопокрытия системы Si-O-C-N может быть рекомендована для повышения долговечности различных изделий из конструкционных и инструментальных материалов, работающих в условиях трения и износа. Промышленные испытания и последующее внедрение на нескольких российских и зарубежных предприятиях подтвердили эффективность применения

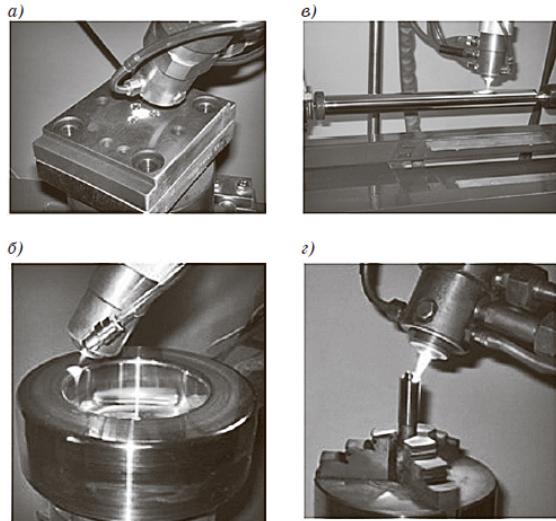


Рис. 7. Нанесение покрытия методом ФПУ:
а — на матрицу вырубного штампа из стали Х12;
б — на вытяжную матрицу из стали Х12; *в* —
на вал из стали 45; *г* — на холодновысадочный
инструмент из стали У10

этого процесса [5]. На рис. 7 показаны примеры использования данной технологии (долговечность упрочненных изделий увеличилась от 2 до 4 раз).

Выводы

Оптимизация технологии модификации поверхности с использованием нанесения нано-

покрытия методом ФПУ может быть произведена на основе исследования параметров наноиндентирования и триботехнических испытаний.

Покрытие системы Si-O-C-N, нанесенное с использованием технологии ФПУ, характеризуется высокой твердостью при низком значении модуля упругости и близостью значений модуля упругости покрытия и основы, что объективно должно приводить к увеличению износостойкости поверхностного слоя.

Триботехнические испытания образцов с покрытием подтверждают повышение ресурса изделий с покрытием системы Si-O-C-N.

Литература

1. Наноструктурные покрытия / Под ред. А. Кавалейро. М.: Техносфера, 2011. 752 с.
2. Тополянский П. А., Соснин Н. А., Ермаков С. А. и др. Исследования свойств нанопокрытия, наносимого методом финишного плазменного упрочнения // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 2. С. 28–34.
3. Горленко А. О., Прудников М. И. Нормализация триботехнических испытаний для создания базы данных по одноступенчатому технологическому обеспечению износостойкости // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 9. С. 7–13.
4. Горленко А. О., Прудников М. И. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом: Справочник // Инженерный журнал. 2009. Прилож. № 10. С. 22–24.
5. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии: Руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 406 с.