

УДК 621.001.4

# Трибологические возможности финишного плазменного упрочнения для повышения ресурса металлорежущего инструмента

А. О. Горленко, П. А. Тополянский, А. П. Тополянский

*Рассмотрена технология финишного плазменного упрочнения с нанесением многослойного нанопокрывтия системы Si—O—C—N применительно к упрочнению металлорежущего инструмента. Метод относится к процессам бескамерного химического осаждения покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой. Рассмотрены общие требования к износостойким покрытиям в соответствии с основными механизмами износа металлорежущего инструмента. Исследованы эффект «залечивания» дефектов от предшествующей абразивной обработки, трибологические характеристики наносимого покрытия. Приведены результаты промышленного испытания технологии финишного плазменного упрочнения металлорежущего инструмента.*

**Ключевые слова:** модификация, PVD-процесс, CVD-процесс, финишное плазменное упрочнение, износостойкое нанопокрывтие, трибологические испытания.

## Введение

Одним из направлений повышения эффективности металлорежущего инструмента является увеличение его ресурса за счет применения тонкопленочных износостойких покрытий. В качестве основных технологий нанесения таких покрытий используются химическое осаждение из газовой фазы (CVD — chemical vapor deposition) и физическое осаждение из газовой фазы (PVD — physical vapor deposition). Основное отличие PVD от CVD состоит в том, что в PVD исходные твердые материалы в результате испарения или распыления переводятся в газовую (паровую) фазу, которая имеет тот же состав, что и покрытие, а сам процесс осуществляется только в вакууме. При CVD-процессах в качестве исходных материалов используются газы, составы газовой фазы и покрытия существенно различаются, процессы в большинстве случаев происходят при атмосферном давлении в специальных высокотемпературных камерах, в отдельных случаях — в вакууме.

Ограничение широкого использования вышеуказанных технологий на отечественных

предприятиях связано с применением сложного и дорогостоящего оборудования, требующего высокой квалификации обслуживания.

Для российских промышленных предприятий наиболее рационально для нанесения тонкопленочных износостойких покрытий использовать малогабаритное, безвакуумное, недорогое и простое в обслуживании оборудование. В соответствии с этой концепцией разработана технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ) — бескамерного химического осаждения тонкопленочных покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой [1].

## Общие требования к материалу покрытия

Знание механизмов изнашивания металлорежущего инструмента предопределяет требования к материалу тонкопленочного износостойкого покрытия [2–9]. При резании метал-

лов могут иметь место: адгезионное (в результате схватывания), усталостное, окислительное и абразивное изнашивание.

Износ инструмента происходит в большей степени за счет непрерывного установления связей на атомном уровне элементов инструментального и обрабатываемого материалов и удаления с рабочих поверхностей субмикроскопических объемов материала инструмента. Связи устанавливаются в результате прямого схватывания и диффузионного растворения инструментального и обрабатываемого материалов. Причиной удаления субмикроскопических объемов, прежде всего, являются усталостные процессы. При механической обработке конструкционных сталей с обычными для производственных условий режимами резания максимальные контактные напряжения для острозаточенного инструмента могут колебаться в пределах 400–800 МПа, в экстремальных условиях эти напряжения могут достигать 3000–4000 МПа [10].

Поэтому, прежде всего, покрытие должно не разрушаться при напряжениях до 4000 МПа, а также сохранять эти свойства при температурах, возникающих в процессах резания, 200–1100 °С.

В целях борьбы с адгезионным изнашиванием целесообразно использовать покрытия, которые будут противодействовать установлению адгезионной связи на атомном уровне по контактной поверхности инструмента и протеканию взаимной диффузии инструментального и обрабатываемого материалов. Как правило, явление схватывания и вызываемые им повреждения уменьшаются при использовании неметаллических, диэлектрических, химически инертных материалов покрытия на режущем инструменте.

Для борьбы с усталостным изнашиванием, связанным с накоплением дефектов при циклической нагрузке, приводящим в процессе резания к образованию микротрещин, разрушению и выкрашиванию материалов инструмента, целесообразно использовать такие покрытия, технология нанесения которых предусматривает создание на поверхности сжимающих остаточных напряжений, способствующих «залечиванию» дефектов, возникших от предшествующих технологических операций [11].

В высокотемпературных процессах резания поверхность инструмента, контактируя с воздухом или с другими средами, содержащими кислород, интенсивно окисляется и подвергается окислительному изнашиванию. Высокая интенсивность образования оксидных пленок, формируемых на поверхности, приводит к их хрупкому разрушению и изнашиванию инструмента. Защитой от окислительного изнашивания материала инструмента является покрытие с высокой температурой плавления, стойкие к окислению, в том числе многие тугоплавкие соединения.

При контактном взаимодействии стружки с поверхностью инструмента твердые микрокомпоненты обрабатываемого материала царапают и разрушают инструментальный материал, вызывая абразивный износ. Такими абразивными включениями могут быть также зерна цементита, карбиды, интерметаллиды, некоторые оксиды и бориды. Абразивное изнашивание при обработке инструментом, изготовленным из быстрорежущих сталей, наиболее вероятно по сравнению с твердосплавным инструментом. Эффективным путем борьбы с абразивным изнашиванием является повышение твердости поверхностного слоя инструмента.

Во многих случаях в условиях резания действует одновременно несколько видов изнашивания.

### Сущность и особенности ФПУ

Анализ известных методов нанесения тонкопленочных покрытий в зависимости от основных условий их проведения (температура и давление окружающей среды) показывает, что понизить температуру проведения CVD можно с использованием элементоорганических соединений (MO-CVD) и при помощи плазменной активации (PE-CVD) (рис. 1) [12, 13].

Уменьшение температуры нанесения покрытий способствует сокращению негативных явлений от термического воздействия. Применение элементоорганических соединений для нанесения покрытий предопределяет повышенный уровень безопасности благодаря их нетоксичности (в отличие от широко применяемых для этих целей силанов, боранов

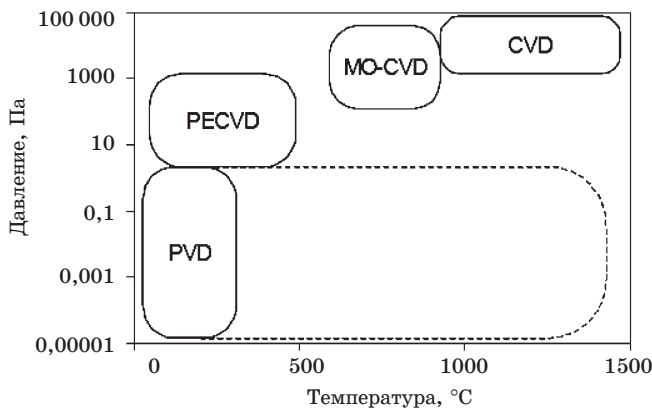


Рис. 1. Виды процессов осаждения покрытий в зависимости от параметров давления и температуры их проведения:

CVD — химическое осаждение покрытий; PVD — физическое осаждение покрытий; PECVD — химическое осаждение покрытий с плазменной активацией; MO-CVD — химическое осаждение покрытий с использованием элементоорганических соединений

или галогенидов при CVD-процессах), а также отсутствие взрывоопасности, поскольку они используются в жидком состоянии. Важно отметить, что элементоорганические соединения могут содержать все необходимые компоненты для получения покрытий в единой субстанции, что повышает эффективность контроля технологического процесса и воспроизводимость свойств наносимых покрытий.

Плазменная активация обеспечивает повышение качества подготовки поверхности подложки, более быстрое прохождение химических реакций, а также ускорение осаждения покрытия.

Технология ФПУ объединяет положительные эффекты процессов MO-CVD и PE-CVD. При этом дополнительно ее новизна заключается в отсутствии использования закрытых камер, более низких температурах нагрева изделий в процессе осаждения покрытий и применении гибко управляемой электродуговой плазмы.

Процесс образования покрытия при ФПУ протекает в несколько стадий:

- создание устойчивого потока плазмы дугового разряда;
- испарение технологических препаратов в жидкостном дозаторе и перенос их паров совместно с дополнительным потоком газов в плазму дугового разряда;
- получение в плазмохимическом реакторе пароплазменного потока, содержащего атомы,

положительно и отрицательно заряженные ионы и электроны;

- прохождение плазмохимических реакций в плазме дугового разряда с образованием новых соединений и их перенос плазменной струей к подложке;

- конденсация паров и продуктов реакций на подложке при касании факела плазменной струи поверхности изделия;

- взаимодействие между адсорбированными осажденными веществами и граничным слоем поверхности подложки, приводящее к зарождению и росту покрытия.

Вышеперечисленные стадии присутствуют, как известно, и в PVD-процессах. Но в отличие от них при ФПУ покрытие образуется при атмосферном давлении окружающей среды без применения вакуумных камер. Кроме этого, износостойкие покрытия, наносимые в вакууме методами PVD на подложку с температурой поверхности менее 250 °C, обычно имеют пониженную адгезию.

В качестве источника тепловой энергии для нанесения износостойкого покрытия при ФПУ используется плазменная струя, истекающая при атмосферном давлении из малогабаритного дугового плазмотрона, дополненного плазмохимическим реактором.

К основным достоинствам ФПУ относятся: осуществление процесса без вакуума и камер; минимальный нагрев изделий, не превышающий 150 °C; возможность нанесения покрытия локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритных размеров; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

Применительно к повышению долговечности металлорежущего инструмента в соответствии с рассмотренными механизмами их изнашивания, а также со свойствами бинарных однофазных твердых соединений, которые хорошо изучены, при ФПУ используются кремнийсодержащие покрытия.

Исследованиями покрытий Si—C, Si—N, Si—C—N, наносимых CVD-процессами, выявлено, что их физико-химические свойства (механическая прочность, химическая стойкость, твердость, теплопроводность, коэффициент термического расширения, электрическое сопротивление, коэффициент трения), обусловленные наличием химических связей между

всеми атомами, имеют уникальные характеристики. Варьируя их фазовый и химический составы, можно в широком диапазоне изменять их физико-механические и химические свойства, что открывает широкие возможности для создания материалов с заданными характеристиками. При этом разработанная технология ФПУ позволяет получать покрытия на основе соединений кремния с различным содержанием элементного состава [14].

Основным принципом нанесения тонкопленочного износостойкого покрытия на основе системы Si—O—C—N, взятым за основу технологии ФПУ, является разложение паров жидких элементоорганических препаратов, пары которых вводятся в плазмохимический реактор дугового плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием покрытия на изделии. Нанесение покрытия осуществляется локально на упрочняемую поверхность изделия при циклическом сканировании плазменной струи, которая касается обрабатываемой зоны. Важной особенностью ФПУ является также то, что нанесение покрытия осуществляется многослойно при толщине каждого слоя порядка 2–10 нм полосами шириной 8–10 мм (с учетом линейного перемещения плазменной струи). Для минимального термического воздействия на материал основы при ФПУ плазменная струя перемещается со скоростью 3–150 мм/с.

### «Залечивание» дефектов от предшествующей обработки

Микрорельеф переходной зоны «участок с покрытием — участок без покрытия» исследовался с использованием прибора MarSurf WS1 (фирма Mahr GmbH, Германия). Анализ полученной трехмерной профилограммы (рис. 2) показал, что на зоне без покрытия (слева) имеются глубокие впадины, имеющие размер в соответствии с масштабной линейкой порядка 1,0–1,2 мкм, оставшиеся от абразивной обработки исходной поверхности. На зоне с покрытием (справа) впадины имеют глубину порядка 0,1 мкм. Таким образом, анализ трехмерной профилограммы показывает, что после ФПУ обеспечивается «залечивание» микродефектов и всех впадин исходной шероховатости.

Это может быть обосновано тем, что покрытие по своей физической сущности осаждается в большей степени во впадинах микрорельефа поверхности, а также образованием в подпленочной зоне сжимающих остаточных напряжений, обеспечивающих «залечивание» дефектных зон.

Субмикрорельеф поверхностей образцов (рис. 3), исследованный на просвечивающем электронном микроскопе ЭММА-2 методом углеродно-серебряных реплик, показал высокооднородную характерную топографию, присущую поверхности после ФПУ с нанесением покрытия системы Si—O—CN (в то время как субмикрорельеф поверхности до нанесения покрытия имеет явно выраженные следы — риски и дефекты от предшествующей абразивной обработки). Изменение топографии поверхности после ФПУ является также подтверждением «залечивания» дефектных зон, образованных на предшествующей технологической операции шлифования.

### Трибологические характеристики

Трибологические характеристики покрытия системы Si—O—C—N исследовали на автоматизированной установке, созданной на базе машины трения МИ-1М и предназначенной для определения трибологических свойств цилиндрических образцов из металлических материалов и сплавов нормализованным методом в соответствии с ГОСТ 30480–97 при трении скольжения и граничной смазке [15, 16].

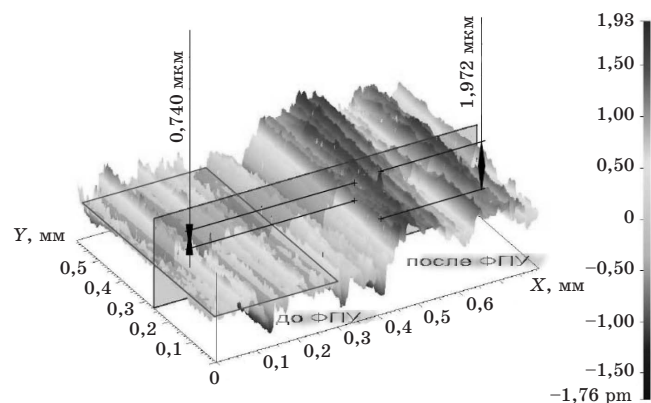


Рис. 2. Трехмерная профилограмма переходной зоны: слева — участок без покрытия, справа — участок с покрытием

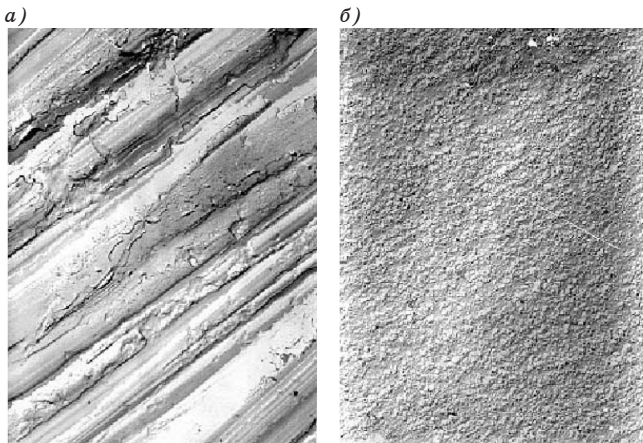


Рис. 3. Микрорельеф поверхности до (а) и после (б) ФПУ с нанесением покрытия системы Si—O—C—N ( $\times 5000$ )

Таблица 1

Результаты трибологических испытаний на модернизированной установке МИ-1М

Трибологическое свойство	Показатель	Значение показателя для образца	
		с покрытием Si—O—C—N	Сталь P18
Прирабатываемость	$t_0$ , ч	0,33	5,33
	$h_0$ , мкм	0,90	9,00
	$f_0/f$	4,75	1,36
Антифрикционность	$f$	0,04	0,28
Износостойкость	$h$ , мкм	6,90	12,10
	$I_h \cdot 10^{-10}$	2,16	3,17
	$I_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}$	2,38	4,18

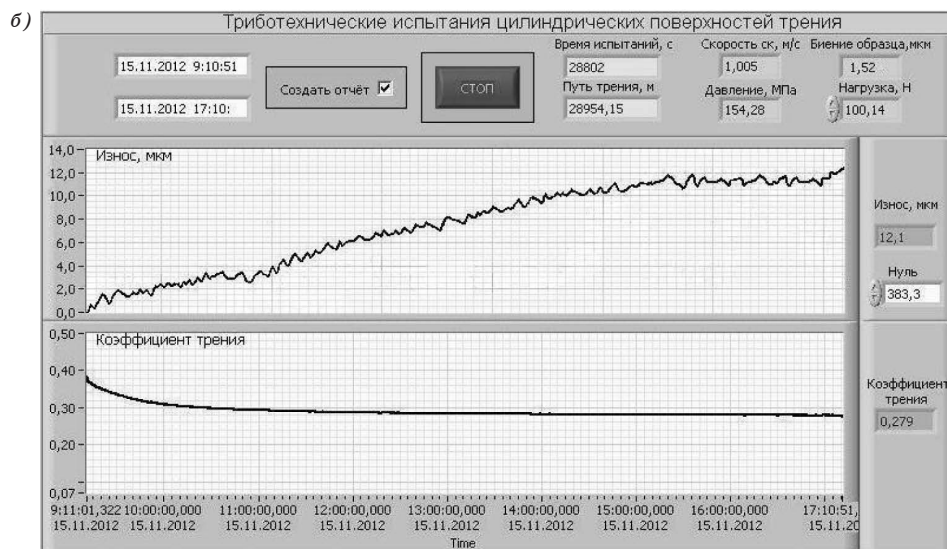
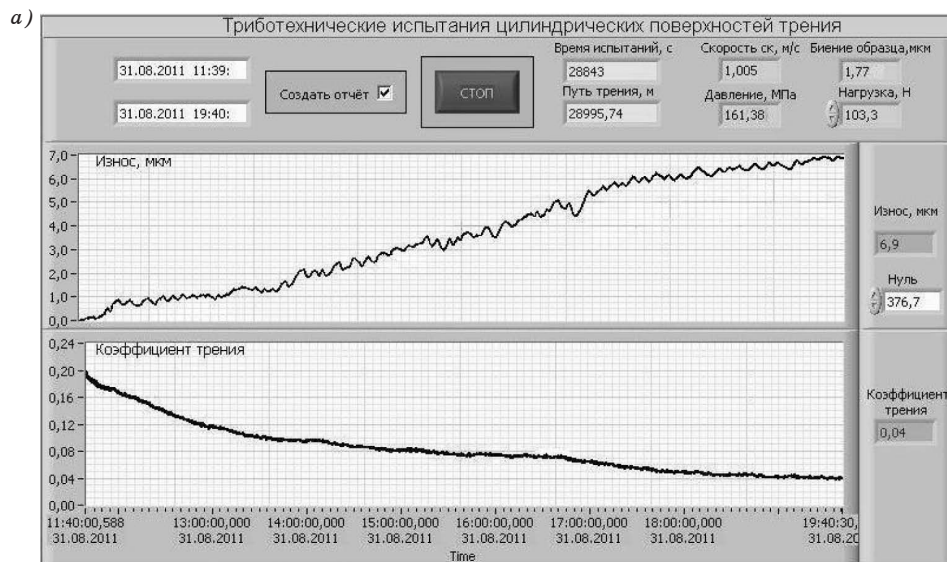


Рис. 4. Протоколы испытаний: а — покрытия Si—O—C—N; б — материала основы (стали P18) без покрытия

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие трибологические свойства:

- время приработки  $t_0$ , ч, — время от начала испытания до выхода кривой изнашивания на участок нормального изнашивания;
- приработочный износ  $h_0$ , мкм, — сближение, в момент окончания приработки  $t_0$ ;
- значение коэффициента трения в конце испытаний  $f$ ;
- $f_0/f$  — отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки  $f_0$  к его значению в конце испытаний  $f$ ;
- среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания

$$I_h = \frac{h - h_0}{L - L_0},$$

где  $h$  — суммарный износ образца за время испытаний, мкм;  $L$  — путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний, мкм;  $L_0 = 3,6 \cdot 10^9 t_0 v$  — путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки, мкм;

- значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний  $I_{h\Sigma} = h/L$ .

Испытания образцов с покрытием и без покрытия проводились при следующих условиях: скорость скольжения  $v = 1$  м/с; нормальное усилие нагружения  $N = 100 \pm 0,5$  %, Н (соответствует давлению, рассчитанному по Герцу, порядка 150 МПа); вид первоначального контакта — пластический насыщенный; вид смазки — граничная; вид смазывания — окунами; ведущий вид изнашивания — усталостное; смазочный материал — масло индустриальное И-20А ГОСТ 20799–88; материал индентора — твердый сплав ВК8; общее время испытаний каждого образца — 8 ч [17].

Результаты испытаний покрытия системы Si—O—C—N и материала основы (стали P18) без покрытия представлены в табл. 1.

На рис. 4 приведены протоколы испытаний покрытия Si—O—C—N и материала основы (стали P18) без покрытия с графиками изменения износа и коэффициента трения во времени.

При оценке кривой износа покрытия Si—O—C—N видно, что длительность приработки составляет 0,33 ч, далее 1,67 ч ста-

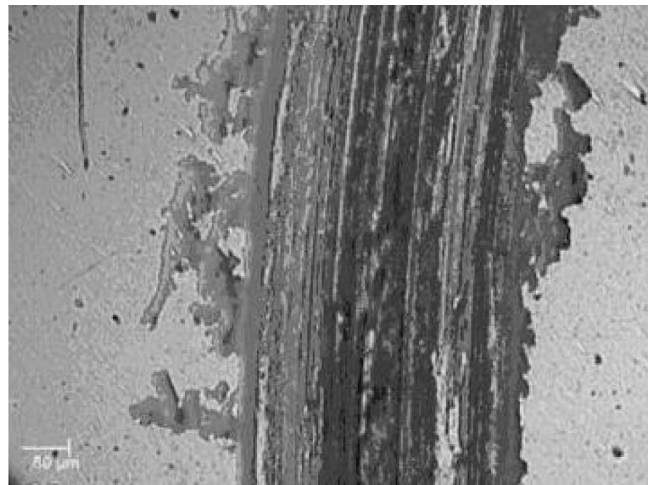


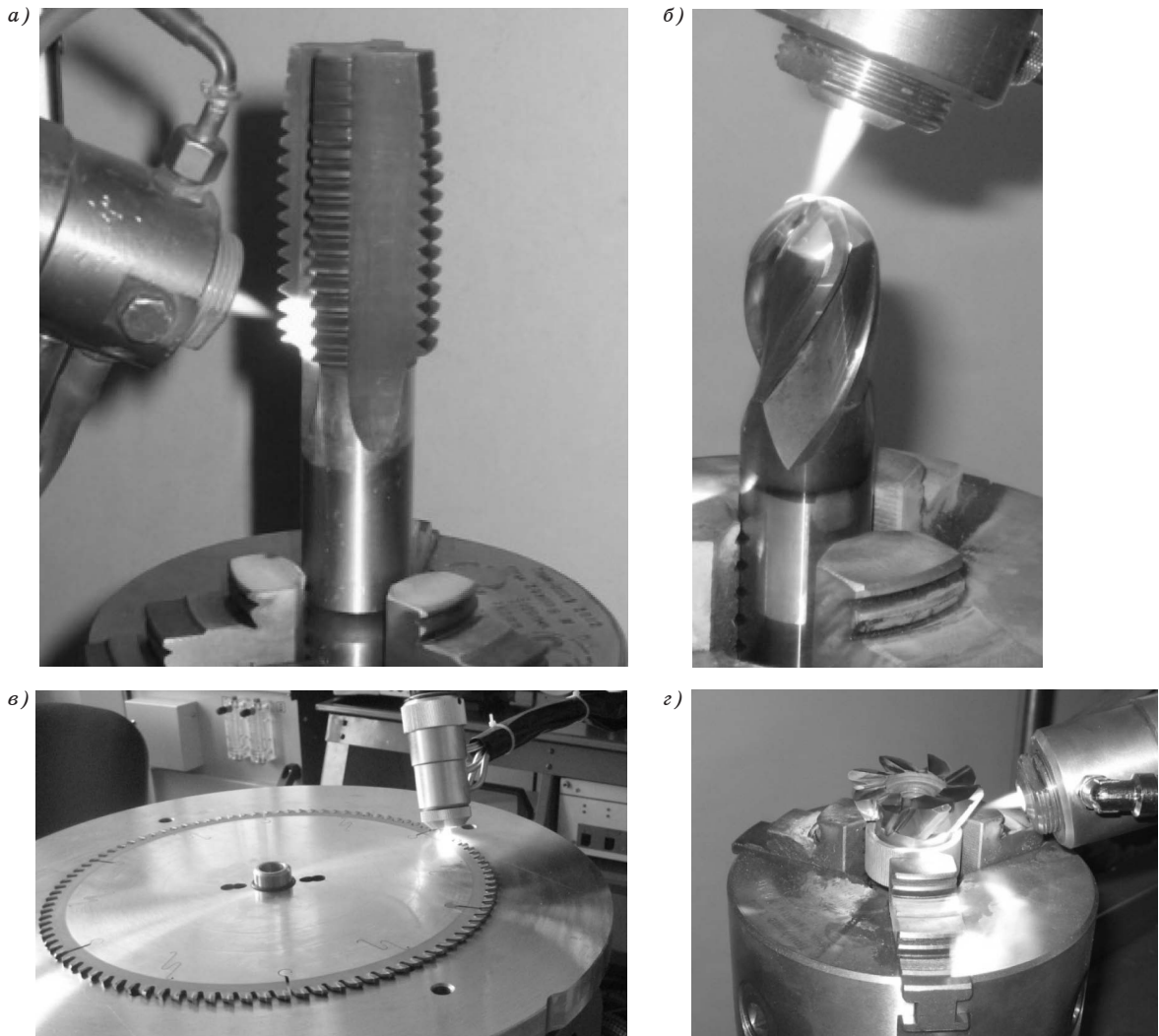
Рис. 5. Микрофотография дорожки износа, полученная на оптическом микроскопе AXIOVERT CA25 (Karl Zeiss, Германия),  $\times 100$

бильного износа, а затем плавный (не скачкообразный) выход на износ основного материала. В пределах толщины покрытия Si—O—C—N (1 мкм) кривая износа постоянна во времени. Кривая изменения коэффициента трения во времени имеет падающую характеристику. Плавное снижение в течение 3 ч, а затем некоторая стабилизация с незначительным уменьшением свидетельствуют о возможном «залечивании» дорожки трения микроскопическими продуктами износа.

Микрофотографии дорожки износа при испытаниях на трибометре Tribometer (CSM, Швейцария) в условиях сухого трения покрытия системы Si—O—C—N подтвердили образование продуктов, которые не выносятся, а остаются на дне дорожки, обеспечивая «залечивание» участков износа (рис. 5).

### Примеры промышленной реализации ФПУ

В табл. 2 показаны результаты промышленных испытаний стойкости режущего инструмента после ФПУ с нанесением покрытия системы Si—O—C—N, проведенных в различных организациях. Многократное повышение стойкости инструмента подтвердило результаты исследований физико-механических и трибологических свойств данного покрытия. Примеры ФПУ металлоинструмента показаны на рис. 6.



**Рис. 6.** ФПУ металлорежущего инструмента: *а* — метчика; *б* — торцевой фрезы; *в* — дисковой пилы; *г* — фасонной фрезы

*Таблица 2*

**Результаты промышленного испытания режущего инструмента**

Инструмент	Материал обрабатываемой заготовки	Относительное повышение стойкости	Организация, проводившая испытания
Метчик М3	ВТ1-0	2,4	НПЦ «ПО «Старт», г. Заречный
Метчик М8	40Х	3,0	ОАО «Морской завод», г. Кронштадт
Метчик М10	12Х18Н10Т	2,25	«Электрокомплекс», г. Минусинск
Метчик М16	35Л	10,0	Вагоностроительный завод, г. Усть-Катав
Метчик М24	40Х	3,0	Калужский турбинный завод, г. Калуга
Сверло Ø2,1	30ХГСА	3,0	Электромашиностроительный завод «Лепсе», г. Киров
Сверло Ø4,4; Ø6,3	Титан—углерод	2,0	ПАО «НПО „Искра”», г. Пермь
Сверло Ø5	АК7	13,6	ООО «Топливные системы», Санкт-Петербург
Сверло Ø23	Ст45	2,5	Инструментальный завод ПО «Уралвагонзавод», г. Нижний Тагил
Развертка Ø8	Силумин	6,5	ОАО «Прогресс», Санкт-Петербург

Продолжение табл. 2

Инструмент	Материал обрабатываемой заготовки	Относительное повышение стойкости	Организация, проводившая испытания
Развертка Ø14	У8А	2,25	ОАО «Царскосельский завод», г. Пушкин
Твердосплавные пластины	34ХН1М	2,0	ОАО «Уралмаш», Екатеринбург
	Ст25Л	10,0	ОАО «Знамя Труда», Санкт-Петербург
Фреза концевая Ø10	Х12	4,1	НПО им. Коминтерна, Санкт-Петербург
Фреза шпоночная Ø12	Ст45	2,4	ОАО «Царскосельский завод», г. Пушкин
Фреза фасонная	Ст АС-14	3,0	ОАО «Автоагрегатный завод», Димитровград
Зенкер	Ст45	2,0	ОАО «Морской завод», Кронштадт
Резец фасонный круглый	СЧ20	2,7	ОАО «Моторный завод», г. Ульяновск

## Выводы

1. Рассмотрена технология ФПУ с нанесением износостойкого покрытия системы Si—O—C—N, отвечающего общим требованиям сопротивления основным видам изнашивания металлорежущего инструмента. Такое покрытие имеет многократно повышенный ресурс.

2. Проведенные исследования трехмерной топографии переходной зоны «покрытие после ФПУ — основа без покрытия» показали «залечивание» дефектов от предшествующей технологической операции — шлифования поверхности.

3. Сравнение результатов трибологических испытаний покрытия Si—O—C—N и материала основы нормализованным методом показало, что покрытие обладает в 7 раз меньшим значением коэффициента трения. При этом в 16 раз сократилось время приработки и в 1,5–1,75 раза уменьшилась интенсивность изнашивания.

4. Результаты промышленного испытания металлорежущего инструмента показали повышение его стойкости в 2–10 раз.

## Литература

1. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии: руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2008. 406 с.  
2. Тополянский П. А., Ермаков С. А., Тополянский А. П. Выбор покрытия при финишном плазменном упрочнении на основе механизмов изнашивания деталей и инстру-

мента. Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика / Материалы 18-й Международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2016, 358 с. С. 215–225.

3. Astakhov V. Tribology of Metal Cutting. Elsevier Science. 2006. 392 p.

4. Григорьев С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2011. 368 с.

5. Мокрицкий Б. Я. Повышение работоспособности металлорежущего инструмента путем управления свойствами инструментального материала. Владивосток: Дальнаука, 2010. 232 с.

6. Рыжкин А. А. Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибологический аспект). Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 2004. 323 с.

7. Кабалдин Ю. Г. Самоорганизация и нелинейная динамика в процессах трения и изнашивания инструмента при резании. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КнАГТУ, 2003. 137 с.

8. Костюк Г. И. Эффективные покрытия и модифицированные слои на режущих инструментах. Киев: Изд-во Международной академии наук и инновационных технологий, 2012. 728 с.

9. Табаков В. П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.

10. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.

11. Васильков Д. В., Вейц В. Л., Шевченко В. С. Динамика технологической системы механической обработки. СПб.: ТОО «Инвентекс», 1997. 230 с.

12. Abdel Salam Hamdy Makhlouf and Ion Tiginyanu. Nanocoatings and ultra-thin films. Technologies and applications. Woodhead Publishing Limited. 2011. 428 p.

13. Choy K. L. Chemical vapour deposition of coatings/ Progress in Materials Science. 2003. Vol. 48. P. 57–170.



14. Горленко А. О., Шупиков И. Л., Тополянский П. А., Тополянский А. П. Модификация рабочих поверхностей деталей нанесением упрочняющего покрытия // Металлообработка. 2012. № 2 (68). С. 31–36.

15. 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.

16. Горленко А. О., Прудников М. И. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом: справ. // Инж. журн. Прил. № 10. 2009. С. 22–24.

17. Бишутин С. Г., Горленко А. О., Матлахов В. П. Износостойкость деталей машин и механизмов: учеб. пособие / Под ред. С. Г. Бишутина. Брянск: БГТУ, 2010. 112 с.

---