ИНЖЕНЕРНАЯ ТРИБОЛОГИЯ ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Одним из направлений повышения эффективности металлорежущего инструмента является увеличения его ресурса за счёт применения тонкоплёночных износостойких покрытий. В качестве основных технологий нанесения таких покрытий используются процессы химического осаждения из газовой фазы (CVD – chemical vapor deposition) и физического осаждения из газовой фазы (PVD – physical vapor deposition). Основное отличие процессов PVD от CVD состоит в том, что в технологиях PVD исходные твёрдые материалы за счёт 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 проводятся при атмосферном давлении в специальных высокотемпературных камерах, в отдельных случаях – в вакууме [1].

Ограничение широкого использования вышеназванных технологий на отечественных предприятиях связано с применением сложного и дорогостоящего оборудования, требующего высокой квалификации обслуживания. Для российского менталитета промышленных предприятий наиболее рационально для нанесения тонкоплёночных износостойких покрытий использовать малогабаритное, безвакуумное, недорогое и простое в обслуживании оборудование, похожее на известные и широко применяемые сварочные установки.

В соответствии с этой концепцией разработана технология бескамерного химического осаждения тонкоплёночных покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой (PECVD by cold atmospheric plasma) [2]. В связи с тем, что нанесение тонкоплёночного износостойкого покрытия на изделия происходит на заключительной стадии их изготовления или непосредственно перед их использованием, данный процесс назван финишным плазменным упрочнением (ФПУ). С применением данной технологии возможно упрочнение покупного инструмента, а также самостоятельно изготавливаемого, перетачиваемого инструмента, различной технологической оснастки (штампов, литьевых форм, пресс-форм) и ряда изнашиваемых деталей.

Широкое промышленное использование процесса ФПУ сдерживается его недостаточной изученностью. Особенно актуально исследование свойств поверхностного слоя с покрытием, прогнозирующих повышение износостойкости упрочняемых изделий, разработка экспертной оценки повышения долговечности изделий на стадии отработки режимов ФПУ.

Для решения этой задачи перспективно применение международного стандарта ISO 13565-2:1996, где вводятся параметры шероховатости, характеризующие износостойкость поверхности. Определение этих характеристик для поверхностей с покрытием и без покрытия возможно с использованием современных импортных малогабаритных приборов. Для подтверждения экспертной оценки износостойких свойств поверхности по параметрам шероховатости целесообразно дополнительное проведение трибологических исследований. Окончательным решением об использовании ФПУ являются натурные производственные испытания.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛУ ПОКРЫТИЯ

Знания механизмов износа металлорежущего инструмента предопределяют требования к материалу тонкоплёночного износостойкого покрытия. При резании металлов могут иметь место следующие основные виды изнашивания: адгезионный (в результате схватывания), усталостный, окислительный и абразивный.

Износ инструмента происходит в большей степени за счёт непрерывного установления связей на атомном уровне элементов инструментального и обрабатываемого материалов и удаления с рабочих поверхностей субмикроскопических объёмов материала инструмента. Установление связей происходит 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.

Поэтому, прежде всего покрытие должно не разрушаться при напряжениях до 4000 МПа, во-вторых, сохранять эти свойства при температуре, возникающей в процессах резания, – 200 - 1100 ºС.

С целью борьбы против адгезионного износа 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, приводящих 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 «схлопыванию» («залечиванию») дефектов, возникших от предшествующих технологических операций.

В высокотемпературных процессах резания поверхность инструмента, контактируя с воздухом или другими средами, содержащими кислород, интенсивно окисляется и подвергается окислительному износу. Высокая интенсивность образования оксидных плёнок формируемых на поверхности, приводит к их хрупкому разрушению и изнашиванию инструмента, называемому окислительным. Защитой от окислительного износа материала инструмента являются покрытия с высокой

температурой плавления, стойкие к окислению, в том числе многие тугоплавкие соединения.

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

Во многих случаях в условиях резания действуют одновременно несколько механизмов износа.

СУЩНОСТЬ И ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФПУ

Анализ известных методов нанесения тонкоплёночных покрытий в зависимости от основных условий их проведения: температуры и давления окружающей среды, показывает, что понизить температуру проведения процесса CVD можно с использованием элементоорганических соединений и при помощи плазменной активации (*рис. 1*) [1]. При этом уменьшение температуры процесса будет способствовать исключению негативных явлений от термического воздействия. Применение элементоорганических соединений для нанесения покрытий предопределяет повышенный уровень безопасности, с учётом их нетоксичности (в отличие от широко применяемых для этих целей силанов, боранов или галогенидов при CVD процессах), а также отсутствие взрывоопасности, с учётом их использования 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 повышенное качество подготовки поверхности подложки, ведёт к более быстрому прохождению химических реакций, а также к более высоким скоростям осаждения покрытия [1].

В соответствии с данной идеологией разработана новая технология ФПУ, объединяющая положительные эффекты процессов MO-CVD и PE-CVD (*см. рис. 1*). При этом дополнительно её новизна заключается в отсутствии использования закрытых камер, более низких температур 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 питателе 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 струёй к подложке;

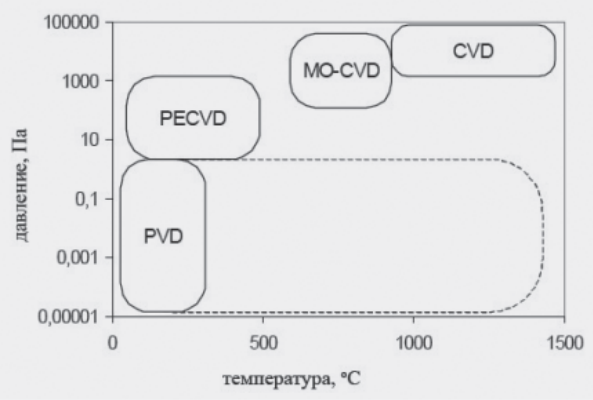


Рис. 1. *Виды процессов осаждения покрытий в зависимости от параметров давления и температуры их проведения, где CVD – химическое осаждение покрытий, PVD – физическое осаждение покрытий, PECVD – химическое осаждение покрытий с плазменной активаций, MO-CVD – химическое осаждение покрытий с использованием элементоорганических соединений.*

- конденсация паров и продуктов реакций на подложке при касании факела плазменной струи поверхности изделия;
- взаимодействие между адсорбированными осаждёнными 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 250ºС, 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 (*рис. 2*).

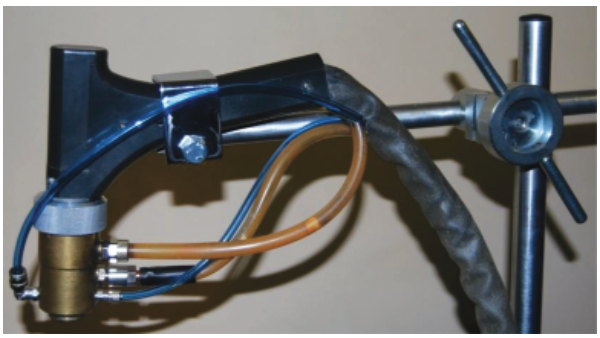


Рис. 2. *Общий вид плазмотрона с плазмохимическим реактором.*

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

Применительно к повышению долговечности металлорежущего инструмента, в соответствии с рассмотренными механизмами их износа, а также анализа свойств бинарных однофазных твёрдых соединений (*табл. 1*), которые

Таблица 1 *Свойства твердых соединений*

Материал	Плотность, г/см³	Температура плавления, °С	Твёрдость, HV	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент термического расширения, 10^{-6} K^{-1}
C (алмаз)	3,52	3800	8000	910	1,0
B4C	2,52	2400	3000	441	4,5
BN	3,48	2730	5000	660	2,5 - 4,7
SiC	3,22	2760	2600	480	5,3
Si_3N_4	3,13	1900	1720	210	2,5 - 7,0
TiN	5,40	2950	2500	590	9,4
SiO2	2,20	1713	1200	50 -100	0,5

хорошо изучены, при ФПУ используются кремнийсодержащие покрытия [3].

Исследованиями покрытий Si-C, Si-N, Si-C-N, наносимых CVD-процессами [4], выявлено, что их физико-химические свойства (механическая прочность, химическая стойкость, твёрдость, теплопроводность, коэффициент термического расширения, электрическое сопротивление, коэффициент трения), обусловленные наличием химических связей между всеми атомами, имеют уникальные характеристики. Варьируя их фазовый и химический состав, 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.

Основным принципом нанесения тонкоплёночного износостойкого покрытия на основе системы Si-O-C-N, взятой за основу технологии ФПУ, является разложение паро́в жидких элементоорганических препаратов, пары́ 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 отличительной особенностью процесса ФПУ является также то, что нанесение покрытия осуществляется многослойно при толщине каждого слоя порядка 2 - 10 нм полосами шириной 8 - 10 мм (с учётом линейного перемещения плазменной струи). С целью минимального термического воздействия на материал основы при ФПУ плазменную струю перемещают со скоростью 3 - 150 мм/с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОКРЫТИЕМ

Одним из перспективных методов оценки свойств поверхностного слоя с покрытием, прогнозирующих их износостойкость, является оценка параметров шероховатости. В международном стандарте ISO 13565-2:1996 рассматриваются параметры шероховатости R_{pk}, R_k и R_{vk}., получаемые из построения опорной линии поверхности (кривой Аббота-Файрстона). Данная кривая характеризует процентное содержание материала по высоте шероховатого слоя в пределах максимальной высоты микронеровностей R_{max} (*рис. 3*) и строится на основании математической обработки профилограммы поверхности. При этом по оси абсцисс откладывается отношение суммы опорной длины профиля к выбранной базовой длине измеряемого участка (в наших экспериментах равной 2,5 мм). По оси ординат откладывается расстояние, соответствующее выбранному уровню (где суммировалась опорная длина профиля), отнесённое к Rmax. Кривая характеризуется тремя зонами: участок выступов, участок середины шероховатости и участок впадин. Середина шероховатости в подавляющем большинстве случаев имеет вид наклонной прямой линии, в то время как участки выступов и впадин имеют характерные ответвления. Если на кривой Аббота-Файрстона отсутствует верхний участок вершин, то это означает, что у данной поверхности все её максимумы расположены на одном уровне. Точно также отсутствие на кривой резко выраженного участка впадин указывает на положение всех местных углублений и царапин на одной прямой линии. На *рис. 3* показана профилограмма и кривая Аббота-Файрстона, на которой проведена прямая линия, определяющая ординаты точек и, соответственно, параметры R_{pk}, R_k и R_{vk}. Критерием выбора прямолинейного участка является наименьшее значение разности ординат в пределах данной кривой.

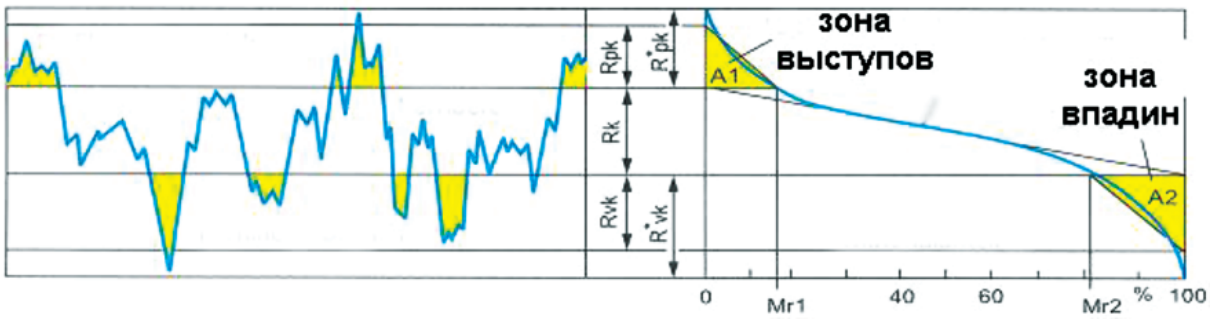


Рис. 3. *Профилограмма и кривая опорной поверхности (кривая Аббота-Файрстона).*

По кривой Аббота-Файрстона, в соответствии с международным стандартом EN ISO 13565-2:1996, определяются параметры, прогнозирующие процесс изнашивания [5]:

- высота выступов, быстро изнашивающихся в процессе приработки, – R_{pk};
- основа профиля, которая длительное время находится в работе и является несущей поверхностью по мере срабатывания наружных слоёв, определяет срок службы или допустимый износ изделия в целом – R_k;
- глубина впадин профиля, определяющая способность поверхности к удержанию смазки и продуктов износа, – R_{vk};
- сумма параметров, характеризующая изнашиваемость рабочих поверхностей, – $R_{pk} + R_k$.

Итогом экспертной оценки получаемых параметров, прогнозирующих повышение износостойкости, является вид средней части кривой и численные значения параметров R_{pk} и R_k. При этом бóльшую долговечность имеют поверхности с более пологой опорной кривой и меньшими значениями параметров R_{pk} и R_k. Действительно, кривая опорной поверхности после приработки в период установившегося изнашивания становится более пологой, что соответствует и более высокой её износостойкости.

Оценка влияния технологии ФПУ на изменение параметров шероховатости проводилась с использованием образцов, изготовленных из стали Р18 диаметром 15 мм и толщиной 5 мм. После проведения термической обработки до твёрдости HRC 60-62 торцовые поверхности образцов шлифовались до разных параметров Ra. Одна из половин торцовой поверхности закрывалась маской, а на другую наносилось износостойкое покрытие толщиной порядка 1 мкм методом ФПУ на выбранном режиме. Толщина покрытия оценивалась прибором контроля нанесения покрытия [2].

Измерения проводились с использованием профилометра Perthometer S2 (фирма Mahr GmbH, Германия) на исходной поверхности под маской, на зоне с покрытием и на зоне перехода. По профилограмме зоны перехода дополнительно контролировалась толщина нанесённого покрытия при ФПУ, которая составляла 0,9 мкм.

В *табл. 2* представлены значения параметров шероховатости до и после нанесения покрытия методом ФПУ при различном исходном параметре Ra. На основании анализа параметров шероховатости видно, что процесс ФПУ ведёт к повышению несущей площади поверхности и её износостойкости по критерию $R_{pk}+R_k$, который уменьшается в среднем в 2 раза.

Таким образом, на основании анализа параметров шероховатости по международному стандарту ISO 13565-2:1996 можно проводить предварительную аттестацию и оценивать поверхности с точки зрения эффективности их работы в условиях трения и износа.

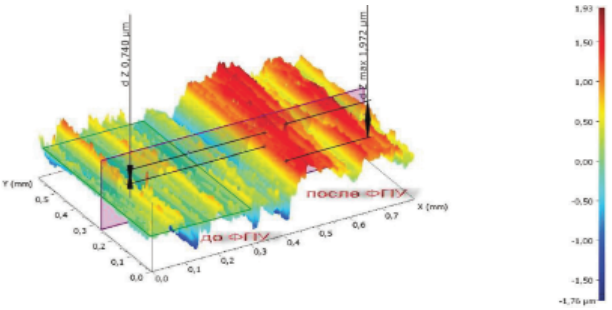


Рис. 4. *Трёхмерная профилограмма переходной зоны: слева - участок без покрытия, справа - участок с покрытием.*

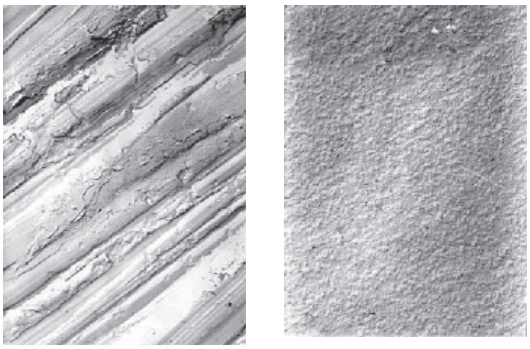
ЗАЛЕЧИВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ОТ ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Микрорельеф переходной зоны – участок с покрытием - участок без покрытия исследовался с использованием прибора MarSurf WS1 (фирма Mahr GmbH, Германия). Анализ полученной трёхмерной профилограммы (*рис. 4*) показал, что на зоне без покрытия (слева) имеются достаточно 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 имеет глубину порядка 0,1 мкм. Таким образом, на основании анализа трёхмерной профилограммы видно, что после ФПУ обеспечивается «залечивание» микродефектов и практически всех впадин исходной шероховатости. Это может быть обосновано тем, что покрытие по своей физической сущности осаждается в большей степени во впадинах микрорельефа поверхности, так как микрополости являются более вероятным местом зародышеобразования, чем плоская поверхность, а также за счёт наведения в подплёночной зоне сжимающих остаточных напряжений, обеспечивающих «залечивание» или «схлопывание» дефектных зон.

Субмикрорельеф поверхностей образцов (*рис. 5*), исследовавшийся на просвечивающем электронном микроскопе ЭММА-2 методом углеродно-серебряных реплик, показал высокооднородную характерную топографию, присущую поверхности после ФПУ с нанесением покрытия системы Si-O-C-N (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 при предшествующей шлифовальной операции.

Таблица 2. *Параметры шероховатости исследуемых поверхностей по международному стандарту ISO 13565-2:1996 до и после ФПУ.*

Исследуемая поверхность		Ra	Rmax	Rpk	Rk	Rvk	Rpk+Rk
1	до нанесения покрытия	0,08	0,69	0,35	0,22	0,12	0,57
	после нанесения покрытия	**0,07**	**0,44**	**0,10**	**0,20**	**0,14**	**0,30**
2	до нанесения покрытия	0,43	4,17	2,09	1,25	0,83	3,34
	после нанесения покрытия	**0,38**	**2,85**	**0,71**	**1,00**	**1,14**	**1,71**
3	до нанесения покрытия	0,72	5,07	0,89	2,66	1,52	3,55
	после нанесения покрытия	**0,31**	**3,47**	**0,69**	**0,69**	**1,27**	**1,39**



а) б)

Рис. 5. *Микрорельеф поверхности до (а) и после (б) ФПУ с нанесением покрытия системы Si-O-C-N (x5000).*

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Исследования трибологических характеристик покрытия системы Si-O-C-N проводились на автоматизированной установке, созданной на базе машины трения МИ-1М. Данное оборудование предназначено для определения трибологических свойств цилиндрических образцов из металлических материалов нормализованным методом в соответствии с ГОСТ 30480-97 при трении скольжения и граничной смазке [6].

При испытаниях с установленными нагрузкой и скоростью скольжения к вращающейся цилиндрической поверхности образца, частично погруженного в смазочный материал, прижимался неподвижный цилиндрический индентор. Для реализации линейного контакта и позиционирования образцов использовалась схема со сменными держателями, обеспечивающая самоустановку индентора на промежуточной сферической опоре. В процессе испытаний с помощью системы датчиков регистрировались время испытания, нагрузка, коэффициент трения и линейный износ. Для определения момента трения и нагрузки использовались тензодатчики, для измерения износа – разработанная схема с применением индуктивного датчика, позволяющая исключить влияние радиального биения и тепловых деформаций испытываемого образца.

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели трибологических характеристик:

- время приработки – t_0, ч, определяемое как время от начала испытания до момента времени выхода кривой изнашивания на участок нормального изнашивания;
- приработочный износ – h_0, мкм, как величина сближения, определяемая в момент времени окончания приработки t_0;
- значение коэффициента трения в конце испытаний – f;
- f_0 / f – отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки f0 к его значению в конце испытаний f;
- среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания

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

где h, мкм, – суммарная величина износа образца за время испытаний; L, мкм, – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний; $L_0 = 3{,}6 \cdot 10^9 \cdot t_0 \cdot \upsilon$, мкм, – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки;

– значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний

$$I_{h\Sigma} = h/L$$

Сравнительный анализ свойств поверхностного слоя до и после нанесения покрытия по параметрам трибологических испытаний может быть произведён на основании определения вышеназванных критериев и их сравнения. При этом более износостойкой является поверхность с меньшими значениями интенсивности изнашивания, длительности приработки, коэффициента трения, а также при падающей характеристике кривой изменения коэффициента трения во времени.

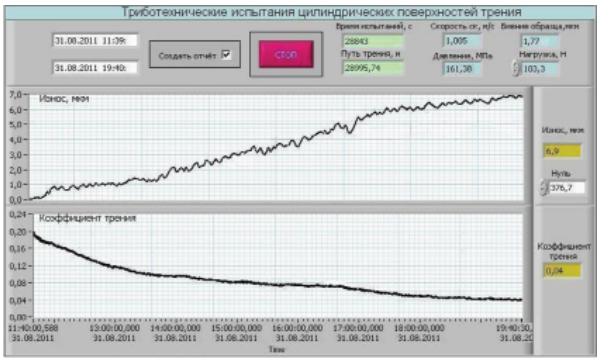


Рис. 6. *Протокол испытаний покрытия Si-O-C-N при усилии нагружения 100 Н.*

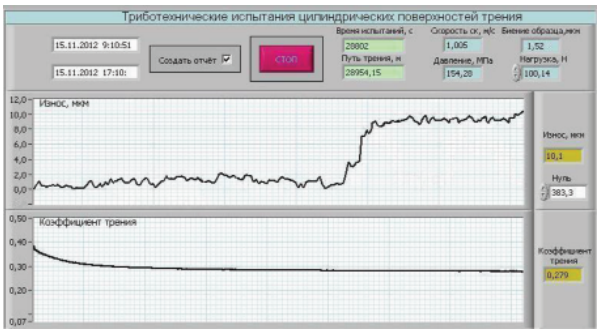


Рис. 7. *Протокол испытаний стали Р18 без покрытия при усилии нагружения 100 Н.*

Испытания образцов с покрытием и без покрытия проводились при следующих условиях: скорость скольжения υ = 1 м/с; нормальное усилие нагружения N = 100 ± 0,5%, Н (соответствует давлениям, рассчитанным по Герцу, порядка 150 МПа); вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И - 20А ГОСТ 20799 - 88; материал индентора – твёрдый сплав ВК8; общее время испытаний каждого образца – 8 ч.

Результаты испытаний покрытия системы Si-O-C-N и материала основы (стали Р18) без покрытия представлены в *табл. 3.*

На *рис. 6* и *7* приведены протоколы испытаний покрытия Si-O-C-N и материала основы – стали Р18 без покрытия с графиками изменения износа и коэффициента трения во времени.

Сравнение результатов трибологических испытаний покрытия Si-O-C-N и материала основы нормализованным методом показало, что покрытие обладает практически в 7 раз меньшим значением коэффициента трения. При этом в 17 раз сократилось время приработки (снижение длительности приработки после ФПУ подтверждается и меньшим значением параметра шероховатости Rpk) и уменьшилась интенсивность изнашивания. Кривая износа покрытия Si-O-C-N более стабильна, и имеется тенденция к уменьшению скорости роста износа после окончания приработки. При оценке кривой износа покрытия Si-O-C-N видно, что длительность приработки составляет 0,33

Таблица 3. *Результаты трибологических испытаний на модернизированной установке МИ-1М.*

Трибологическое свойство	Показатель	Образец	
		С покрытием Si-O-C-N	Сталь Р18 без покрытия
Прирабатываемость	t0 , ч	0,33	5,33
	h0 , мкм	0,9	7,0
	f0 / f	4,75	1,36
Антифрикционность	f	0,04	0,279
Износостойкость	h, мкм	6,9	10,1
	Ih •10 – 10	2,16	3,17
	Ih Σ •10 – 10	2,38	3,49

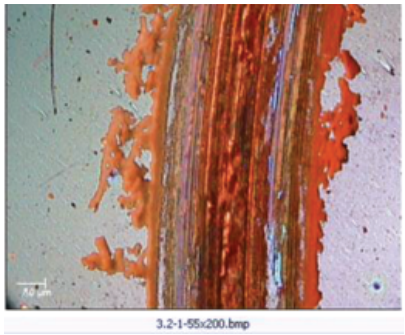


Рис. 8. *Микрофотография дорожки износа, полученная на оптическом микроскопе AXIOVERT CA25 (Karl Zeiss, Германия), × 100.*

часа, далее 1,67 часа стабильного износа, а затем плавный (не скачкообразный) выход на износ основного материала. При этом кривая изменения коэффициента трения во времени имеет падающую характеристику. Плавное снижение в течение 3 часов, а затем некоторая стабилизация с незначительным уменьшением, свидетельствует о возможном «залечивании» дорожки трения микроскопическими продуктами износа.

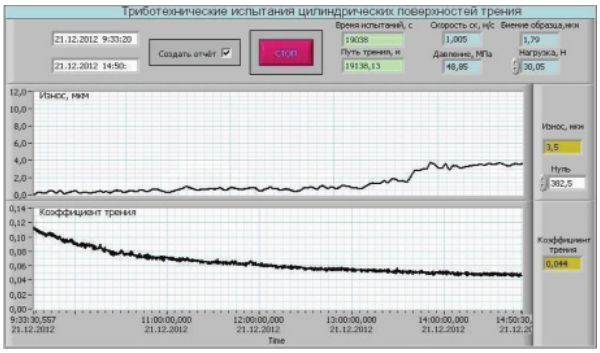


Рис. 9. *Протокол испытания покрытия Si-O-C-N при усилии нагружения 30 Н.*

Микрофотография дорожки износа при испытаниях на трибометре Tribometer (CSM, Швейцария) в условиях сухого трения покрытия системы Si-O-C-N подтвердила образование продуктов, которые не выносятся, а остаются на дне дорожки, обеспечивая залечивание зон износа (*рис. 8*).

Низкие значения коэффициента трения и износа основного материала (стали Р18) связаны с наличием хрупкой оксидной плёнки на поверхности стали, имеющей толщину (100…200) нм, нанотвёрдость которой составляет 20 ГПа, а модуль упругости – 250 ГПа. После износа оксидной плёнки интенсивность изнашивания основного материала резко возрастает.

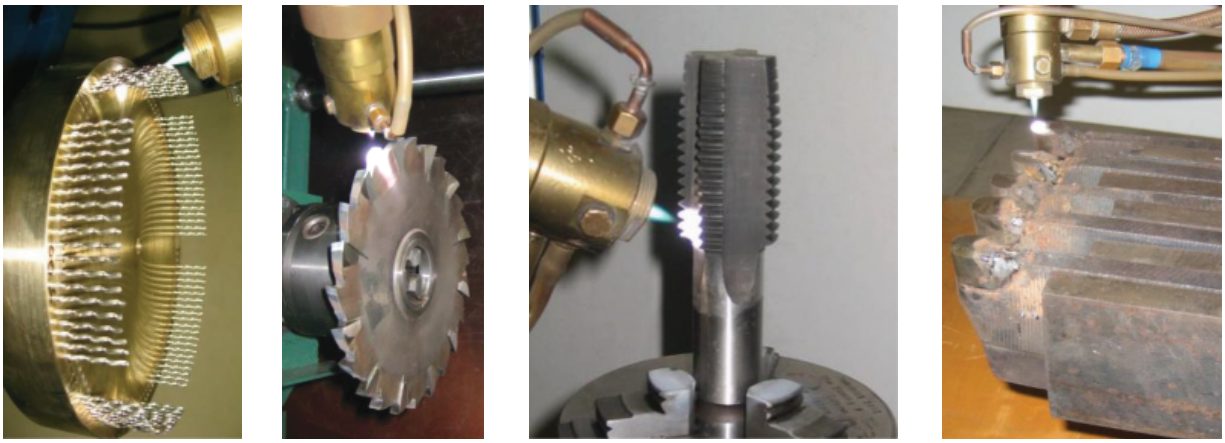
На *рис. 6* видно, что в пределах толщины покрытия Si-O-C-N (1 мкм) при усилии нагружения 100 Н кривая износа практически постоянна. Эта тенденция особенно заметна при проведении сокращённых испытаний (5 часов) с уменьшенным усилием нагружения, равным 30 Н (*рис. 9*).

На основании проведённых трибологических испытаний более эффективным по параметрам трения и изнашивания является поверхность с покрытием системы Si-O-C-N.

В *табл. 4* приведены результаты промышленного испытания ресурса металлорежущего инструмента (материал основы Р6М5) после ФПУ с нанесением покрытия системы Si-O-C-N. Повышение стойкости инструмента с покрытием

Таблица 4. *Результаты промышленного испытания металлорежущего инструмента.*

Тип инструмента	Материал обрабатываемой заготовки	Стойкость до упрочнения	Стойкость после упрочнения	Относительное повышение стойкости, раз	Организация, проводившая испытания
Сверло Ø2,0	Д16	-	-	2,5	«НПО Автоматики», Екатеринбург
Сверло Ø2,1	30ХГСА	1600 отв.	5000 отв.	3	«Электромаш. завод
Метчик М3	ВТ1-0	5 отв.	12 отв.	2,4	НПЦ «ПО «Старт», Заречный
Метчик М8	40Х	2 ч	6 ч	3	«Морской завод», Кронштадт
Метчик М10	12Х18Н10Т	1 ч	2,25 ч	2,25	«Электрокомплекс», Минусинск
Метчик М24	40Х	80 шт.	240 шт.	3	«Калужский турбинный завод», Калуга
Развертка Ø8	Силумин	2,5 ч	15,3 ч	6,5	«Прогресс», ОАО, Санкт-Петербург
Развертка Ø14	У8А	4 ч	9 ч	2,25	«Царскосельский завод», Пушкин
Фреза шпоночная Ø12	45	16 ч	39 ч	2,4	«Царскосельский завод», Пушкин
Фреза фасонная	АС-14	550 дет.	1650 дет.	3,0	Автоагрегатный завод, Димитровград
Зенкер	45	3 ч	6 ч	2,0	«Морской завод», Кронштадт
Резец фасонный круглый	СЧ20	1,5 ч	4 ч	2,7	«Моторный завод», ОАО, Ульяновск
Резец канавочный	45	6 ч	17 ч	2,5	«Промтрактор», Чебоксары



а) б) в) г)

Рис. 10. *Процесс финишного плазменного упрочнения металлорежущего инструмента: а – свёрл, б – фрезы, в – метчика, г – резцов.*

подтвердили результаты экспертной оценки свойств поверхности по параметрам шероховатости на основе международного стандарта ISO 13565-2:1996 и трибологических испытаний. Процессы ФПУ отдельных видов металлорежущего инструмента показаны на *рис. 10.*

ВЫВОДЫ

1. Новая технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ) с нанесением износостойкого покрытия системы Si-O-C-N, отвечает общим требованиям сопротивления основным видам изнашивания металлорежущего инструмента и обеспечивает многократное повышение его долговечности.

2. Предложена методология оценки свойств поверхностного слоя с покрытием, прогнозирующих повышение его износостойкости на стадии отработки режимов ФПУ на основе применения международного стандарта ISO 13565-2:1996.

3. Проведённые исследования трёхмерной топографии переходной зоны «покрытие после ФПУ – основа без покрытия» показали «залечивание» дефектов от предшествующей технологических операций – шлифования поверхности.

4. Для подтверждения экспертной оценки антифрикционных свойств поверхности по параметрам шероховатости проведены трибологические испытания, которые показали уменьшение коэффициента трения почти в 7 раз, длительности приработки в 17 раз по сравнению с испытаниями образцов из стали Р18 без покрытия, а также доказана общая тенденция изменения параметров шероховатости, например, по параметру, характеризующему длительность приработки, – Rpk.

5. Определено, что продукты износа покрытия системы Si-O-C-N влияют на трибологические характеристики пары трения и могут способствовать предотвращению непосредственного переноса материала покрытия на контртело, а также заполнять микровпадины и закрепляться на микровыступах шероховатости контактирующих поверхностей, что обеспечивает снижение удельных давлений и повышение износостойкости пары трения. Противоизносные и антифрикционные действия продуктов износа покрытия Si-OC-N сохраняются длительно на весь период испытаний (кривая изменения коэффициента трения – падающая) пáры трения и не связан с процессом приработки.

А.О. Горленко, П.А. Тополянский,
А.П. Тополянский, Н.А. Соснин, С.А. Ермаков.
Брянский государственный технический университет,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, НПФ «Плазмацентр.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Handbook of Hard Coatings. Deposition Technolgies, Properties and Applications. Edited by Rointan F.Bunshah. University of California, Los Angeles, USA. - 2001. - 538 p.
2. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб: Изд-во Политехнического университета. 2008. 406 с.
3. Weimer A.W. Carbide, Nitride and Boride Materials: Synthesis and Processing, 1. Aufl, Chapman and Hall, London, 1997, p. 671
4. Chena C.W., Huanga C.C., Lina Y.Y., Chenb L.C., Chenc K.H.. The affinity of Si–N and Si–C bonding in amorphous silicon carbon nitride (a-SiCN) thin film. Diamond & Related Materials 14 (2005) 1126 - 1130
5. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Изд. Интеллект, 2009, с. 472.
6. 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.