

# Прогрессивные технологии нанесения покрытий – наплавка, напыление, осаждение

П.А. Тополянский, А.П. Тополянский, НПФ «Плазмацентр», Санкт-Петербург

**В**ыход из строя подавляющего большинства деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки связан с износом и разрушением их поверхностных слоев, проявляющимся в постепенном изменении размеров и формы их рабочих поверхностей. Традиционно борьба с износом основывается на конструировании деталей из объемно-легированных материалов с последующей термической обработкой, на использовании методов химико-термической обработки или нанесения электрохимических покрытий. Такой подход осложняется дефицитностью и сокращением номенклатуры материалов выпускаемых металлоизделий, их чрезмерно высокой стоимостью, большими энергозатратами на термическую или химико-термическую обработку, экологическими проблемами, связанными с гальваническим производством. В настоящее время постоянно выдвигаются новые требования к надежности, долговечности, конкурентоспособности изделий, к специфическим условиям эксплуатации машин и механизмов, которые принципиально не могут быть решены при использовании какого-либо одного сложнолегированного сплава.

Важно отметить, что резервы свойств исходных материалов и общеизвестных технологий, используемых при изготовлении изнашиваемых деталей, с точки зрения повышения износостойкости, практически выбраны полностью.

Одним из перспективных направлений на пути создания высоконадежных, долговечных и конкурентоспособных изнашиваемых деталей является применение современных технологий нанесения функциональных покрытий. В мировой практике известны три основных наиболее часто применяемых метода нанесения покрытий – это технологии наплавки, напыления и осаждения. Трудности выбора оптимального метода нанесения покрытия, стоящие перед технологами машиностроительных производств, осложняются большим количеством видов вышеназванных технологий, многовариантностью режимов, а также многообразием применяемых присадочных и других вспомогательных материалов. Поэтому знание основных характеристик, достоинств и недостатков данных процессов позволят ориентироваться в

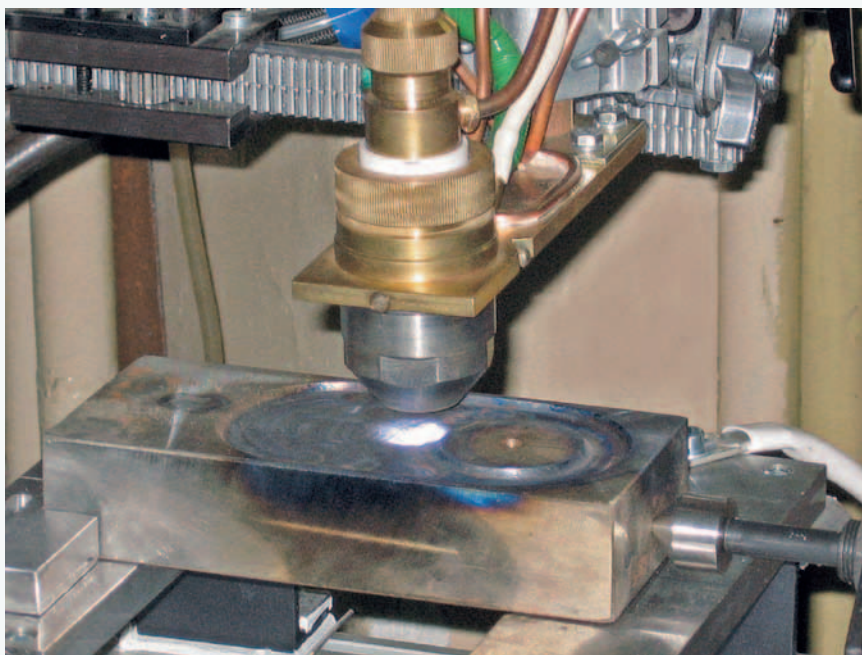
выборе технологий для решения конкретных производственных задач.

Основным отличительным признаком метода нанесения является толщина покрытия: для процессов наплавки – это более 1 мм, для напыления – менее 1 мм, для осаждения – менее 10 мкм. Ниже приведены сравнительные характеристики наиболее часто используемых газотермических методов наплавки, напыления и осаждения, проводимых при атмосферном давлении, дано определение этих методов, рассмотрена их классификация, преимущества и недостатки.

## 1. Технологии наплавки

Наплавка – нанесение покрытий слоями толщиной в несколько миллиметров из расплавленного присадочного материала на оплавленную металлическую поверхность изделия. В зависимости от вида источника нагрева рассматриваемых газотермических процессов наплавка может производиться при помощи теплоты газового пламени (газопламенная наплавка), электрической дуги (электродуговая наплавка в среде защитного газа) или сжатой дуги (плазменная наплавка).

Назначение наплавки – изготовление деталей с износо- и коррозионностойкими свойствами поверхности, а также восстановление размеров изношенных и бракованных деталей за счет нанесения покрытий, обладающих высокой плотностью и прочностью сцепления с из-



Наплавка заготовки шиберного затвора

делием, работающим в условиях высоких динамических, знакопеременных нагрузок или подверженных интенсивному абразивному изнашиванию.

**Преимущества процессов наплавки:**

- отсутствие ограничений по размерам наплавляемых зон;
- возможность нанесения покрытий различных толщин;
- возможность получения требуемых размеров восстанавливаемых деталей путем нанесения материала того же состава, что и основной металл;
- использование не только для восстановления размеров изношенных деталей, но и ремонта изделий за счет ликвидации локальных трещин, пор и других дефектов;
- возможность (применительно к плазменной наплавке) ведения процесса на постоянном токе обратной полярности, повышающим качество и стабильность свойств биметаллических соединений за счет эффекта катодной очистки, проявляющемся в удалении окисных и адсорбированных пленок и улучшении смачивания жидким металлом обрабатываемой поверхности; более низкого тепловложения по сравнению с наплавкой на токе прямой полярности и, как следствие, отсутствие или минимальное расплавление подложки;
- возможность многократного проведения процесса и, следовательно, высокая ремонтоспособность наплавляемых деталей;
- высокая производительность и легкость автоматизации процесса;
- относительная простота и мобильность оборудования.

**Недостатки технологий наплавки:**

- возможность изменения свойств наплавленного покрытия из-за перехода в него элементов основного металла;
- изменение химического состава основного и наплавленного металла вследствие окисления легирующих элементов и основы металла;
- возможность структурных превращений в основном металле, в частности, образование крупнозернистой структуры, новых хрупких фаз;
- возникновение деформаций в наплавленных изделиях за счет значительного термического воздействия;

- образование больших растягивающих напряжений в поверхностном слое детали, достигающих 500 МПа;
- снижение характеристик сопротивления усталости наплавленных изделий;
- возможность возникновения трещин в наплавленном металле и зоне термического влияния, и как следствие, более ограниченный, чем, например, при напылении, выбор сочетаний основного и наплавленного металлов;
- обязательное использование в отдельных случаях предварительного нагрева и медленного остывания наплавляемого изделия, что увеличивает длительность процесса;
- наличие больших припусков на механическую обработку и, как следствие, существенные потери металла наплавки;
- трудоемкость механической обработки наплавленного слоя большой толщины;
- требования преимущественного расположения наплавляемой поверхности в горизонтальном положении (необходимость применения наплавки в нижнем положении при использовании порошковых металлов);
- трудность наплавки мелких изделий сложной формы.

Технико-экономические показатели рассматриваемых способов наплавки представлены в *табл. 1*, где показатели даны для покрытий толщиной 1 мм. Коэффициент производительности –  $K_n$  рассчитан, как отношение основного времени, затраченного на восстановление условной детали ручным дуговым способом  $t_{р.н.}$  к основному времени восстановления условной детали сравнимым способом  $t_i$ :  $K_n = t_{р.н.}/t_i$ . За основное время восстановления условной детали приняты затраты времени, включающие предварительную и последующую механические обработки и нанесение покрытия. Коэффициент технико-экономической эффективности –  $K_3$  определялся с учетом производительности и экономичности способа восстановления условной детали:  $K_3 = K_n \cdot \mathcal{E}_a / 100$ , где  $\mathcal{E}_a$  – экономия при восстановлении условной детали, %.

Использование конкретного способа наплавки из рассмотренных обусловлено, в основном, условиями производства, количеством, формой и размерами наплавляемых деталей, допустимой долей участия основного металла в наплавленном, технико-экономическими показателями, а для восстановительной наплавки – величиной износа.

Таблица 1. Технико-экономические показатели методов наплавки

Метод наплавки	Производительность метода		Толщина покрытия, мм	Припуск на обработку, мм	Доля основного металла в наплавленном, %	Прочность сцепления, МПа	Деформация детали после наплавки	Снижение сопротивления усталости, %	Кэф-фициент производительности, Кп	Кэф-фициент технико-экономической эффективности, Кз
	кг·ч	см <sup>2</sup> ·мин								
Газопламенная	0,15-2,0	1-3	0,5-3,5	0,4-0,8	5-30	480	Значительная	25	0,7-0,6	0,14
В среде CO <sub>2</sub>	1,5-4,5	18-36	0,5-3,5	0,7-1,3	12-45	550	Значительная	15	1,8-1,7	0,40
В среде Ar	0,3-3,6	12-26	0,5-2,5	0,4-0,9	6-25	450	Пониженная	25	2,1-1,7	0,17
Плазменная	1-12	45-72	0,5-5,0	0,4-0,9	0-30	490	Пониженная	12	2,2-1,9	0,56

Выбор типа наплавленного металла и, следовательно, марки присадочного материала, производится в соответствии с видом рабочего нагружения наплавленной детали. Основными видами нагружения деталей машин и инструмента являются: абразивное, ударно-абразивное, гидроабразивное, контактно-ударное, термомеханическое, трение металла о металл, кавитационное, коррозионное. Детали машин чаще всего испытывают одновременно несколько видов нагружения. Поэтому при выборе типа наплавленного металла ориентируются на преобладающий вид износа.

Из сравнительного анализа рассмотренных методов очевидно преимущество процесса плазменной наплавки, вследствие высокой производительности способа, незначительного припуска на механическую обработку, минимальной доли основного металла в наплавленном, наименьшего снижения сопротивления усталости. Особенно эффективен процесс плазменно-порошковой наплавки, позволяющий обеспечить точно заданную глубину проплавления и толщину покрытия, высокую равномерность по толщине слоя, возможность обеспечения необходимого состава, структуры и свойств уже в первом слое металла наплавки, высокую степень автоматизации, малые остаточные напряжения и деформации, отсутствие разбавления наплавленного покрытия основным металлом.

### Технологии напыления

Напыление – процесс, заключающийся в нагреве распыляемого материала высокотемпературным источником, образовании двухфазного газопорошкового потока и формировании покрытия на поверхности изделия толщиной менее 1 мм.

В зависимости от вида используемого источника энергии процессы напыления подразделяются на:

- газопламенные, в которых используется тепло при сгорании горючих газов (ацетилена, пропан-бутана, водорода, метана, природного газа и др.) в смеси с кислородом или сжатым воздухом;



Напыление на пробку затвора

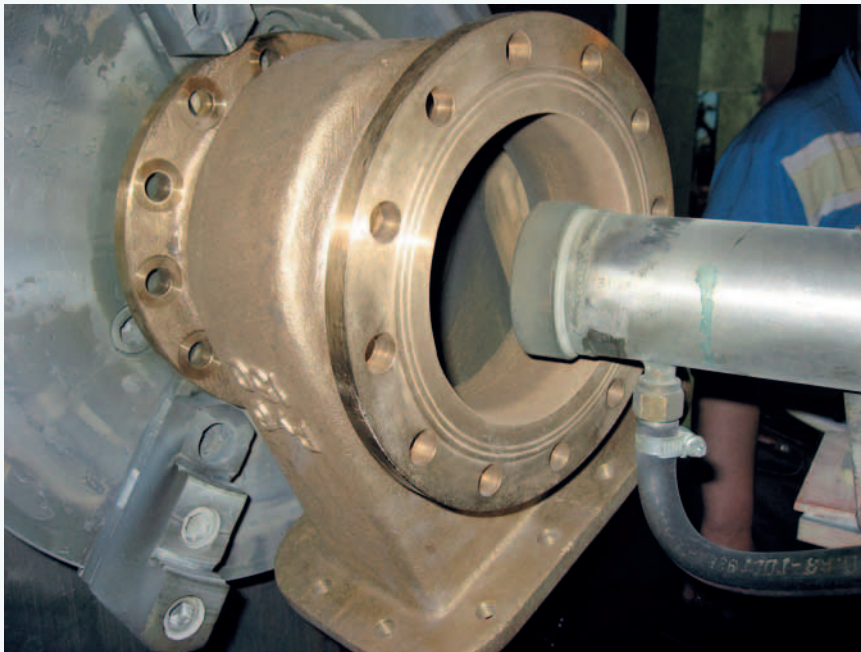
- электродуговые, где осуществляется плавление проволоки электрической дугой и распыление расплавленного металла сжатым воздухом;
- детонационные, использующие энергию детонации газовых смесей (кислород + горючий газ), в которых перенос и нагрев частиц осуществляется ударной волной, образующейся в результате взрыва горючей смеси и выделении при этом теплоты;
- плазменные, где плавление наносимого порошкового материала осуществляется в плазменной струе;
- высокоскоростные, где порошок подается в камеру сгорания, в которой обеспечивается горение топлива, содержащего кислород и горючие газы (керосин, водород, пропан, метан) с последующим прохождением порошка и газов через расширяющееся сопло.

Назначение процессов напыления – нанесение защитных покрытий заданных свойств минимальной толщиной от 0,05 мм и восстановление размеров изношенных и бракованных поверхностей. Технико-экономические показатели процессов напыления представлены в *табл. 2*.

Таблица 2. Технико-экономические показатели способов напыления

Метод напыления	Вид напыляемого материала	Оптимальная толщина покрытия	Температура пламени, дуги, детонации, струи	Скорость истечения пламени, дуги, детонации, струи	Скорость частиц	Прочность сцепления покрытия с основой	Пористость покрытия	Производительность процесса		Кoeffициент использования материала	Уровень шума	
								металл	керамика			
		мм	К	м/с	м/с	МПа	%	кг/ч		%	дБ	
Газопламенный	порошок, проволока	0,1-1,0	3463 (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> )	150-160	20-80	5-25	5-25	3-10	1-2,5	70-90	70-110	
Электродуговой	проволока		5300-6300	100-300	50-150	10-30	5-15	2-50		75-95	75-120	
Детонационный	порошок		2500-5800	2000-3000	600-1000	10-160	0,5-6	0,1-6,0	0,5-1,5	25-60	125-140	
Плазменный	в инертных средах					50-400	10-60	2-15	0,5-8 (20-60 кВт)		70-90	75-115
	в активных средах		порошок, проволока	5000-15000	1000-1500				15	5	70-90	110-120
	в разряженных средах				2900	500-1000	70-80	0,5-1				≤75
Высокоскоростной	порошок		2500-3000	2600	350-500	10-160	0,3-1	3-4		40-75	100-120	





Напыление на корпус задвижки

**Преимущества технологии напыления:**

- высокая универсальность процессов, позволяющая наносить покрытия для широкого спектра функционального назначения, а также для восстановления размеров изношенных деталей;
- малое термическое воздействие на напыляемую основу (температура ее нагрева не превышает 100-150 °С), что позволяет исключить нежелательные структурные превращения в ней, избежать деформаций и изменения размеров изделий;
- возможность нанесения покрытий на изделия, изготовленные практически из любого материала;
- отсутствие ограничений по размерам напыляемых изделий;
- возможность нанесения покрытий на локальные поверхности;
- возможность нанесения многослойных покрытий разнородными материалами;
- высокая технологичность процесса, в связи с гибкостью регулирования параметров режима;
- возможность получения регламентируемой однородной пористости покрытия для использования в условиях работы со смазкой поверхностей скольжения;
- положительное влияние на усталостную прочность основы, за счет получения при напылении слоистой структуры покрытия, в отличие от столбчатой, образующейся при осаждении из газовой или паровой фазы, диффузионном насыщении;
- нанесение равномерного покрытия с минимальными припусками для последующей механической обработки;
- возможность эксплуатации, в отдельных случаях, напыленных деталей без последующей механической обработки;
- возможность использования напыления для формообразования деталей (напыление производят на поверхности формы-оправки, которую после окончания процесса удаляют; остается оболочка из напыленного материала);

- высокая производительность процесса напыления;
- возможность автоматизации процесса.

**Недостатки процессов напыления:**

- нестойкость напыленных покрытий к ударным механическим нагрузкам;
- анизотропия свойств напыленных покрытий;
- низкий коэффициент использования напыленного материала при нанесении покрытий на мелкие детали;
- обязательное использование перед процессом напыления активационной обработки (например, абразивно-струйной), что увеличивает длительность и трудоемкость процесса;
- выделение аэрозолей напыляемого материала и побочных газов требует использования мощной вытяжной вентиляции;
- повышенный уровень шума, а в случаях, связанных с электрической дугой – ультрафиолетового излучения.

**3. Технологии осаждения**

Осаждение – это методы нанесения защитных покрытий микронной толщины (менее 10 мкм), характеризующиеся конденсацией на поверхности изделий компонентов паровой или газовой фазы в условиях обработки частицами высоких энергий в вакууме или плазменными струями при атмосферном давлении.

Отличительными свойствами методов является обеспечение высокой адгезионной прочности покрытия к основе за счет применения физических процессов подготовки и активации поверхности (нагрева и предварительной очистки поверхностей тлеющим разрядом, бомбардировкой ионами инертных газов).

Процесс формирования покрытий осуществляется за счет обработки ионами в процессе конденсации, осаждения высокоэнергетических ионов, а также атомов и молекул с участием плазмохимических процессов.

Процессы осаждения подразделяются на плазменные, заключающиеся в нанесении покрытий при атмосферном давлении и являющиеся продуктами плазмохимических реакций реагентов, прошедших через дуговой или высокочастотный плазмотрон, ионно-плазменные – процессы, происходящие в вакууме, в которых необходимый для получения покрытий материал переводится из твердой в газовую фазу распылением мишени энергетическими ионами, ионно-лучевые – процессы аналогичные ионно-плазменному, в которых дополнительно используются электроннолучевые пушки.

Назначение процессов осаждения – изготовление деталей машин и механизмов, технологической оснастки и инструмента, предусматривающее финишный способ нанесения тонкопленочных покрытий различного применения.

Рассмотрим сравнительные характеристики двух основных процессов осаждения покрытий микрон-

ной толщины при помощи использования плазменных струй, истекающих при атмосферном давлении – высокочастотного плазменного нанесения износостойких покрытий и электродугового плазменного нанесения тонкопленочных покрытий (технология финишного плазменного упрочнения – ФПУ).

Процесс высокочастотного плазменного нанесения тонкопленочных покрытий осуществляется на установке «Плазма-401», предназначенной для упрочнения элементов штампов холодного деформирования из инструментальных сталей типа X12M и У10 и различного режущего инструмент. Нанесение износостойких покрытий осуществляется при атмосферном давлении при помощи высокочастотного индукционного (ВЧИ) плазмотрона, позволяющего получать объемные потоки спектрально чистой плазмы благодаря отсутствию эрозирующих электродов. Элементы покрытия образуются за счет разогрева газоразрядной плазмы пучка кварцевых стержней. Одновременно в камеру ВЧИ-плазмотрона подается реакционный газ – аргон, барботируемый через этиловый спирт. В зоне высоких температур пары реакционных веществ разлагаются на исходные компоненты, а при снижении температуры происходит восстановление элементов с плазмохимическим синтезом кремнийуглеродистых соединений, которые уносятся плазмообразующим газом и осаждаются на напыляемой детали.

Сущность технологии электродугового плазменного нанесения тонкопленочных покрытий (процесс финишного плазменного упрочнения – ФПУ) состоит в нанесении износостойкого покрытия с возможностью или отсутствием одновременного осуществления процесса повторной плазменной закалки приповерхностного слоя (на глубину нескольких микрометров). Покрытие является продуктом плазмохимических реакций реагентов, прошедших через дуговой плазмотрон. Закалка происходит за счет локального воздействия высококонцентрированной плазменной струи.

Цель ФПУ – изготовление инструмента, штампов, прессформ, ножей, фильер, подшипников и др. деталей машин со специальными свойствами поверхности: износостойкостью, антифрикционностью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью, разгаростойкостью, антисхватыванием, стойкостью против фреттинг-коррозии.

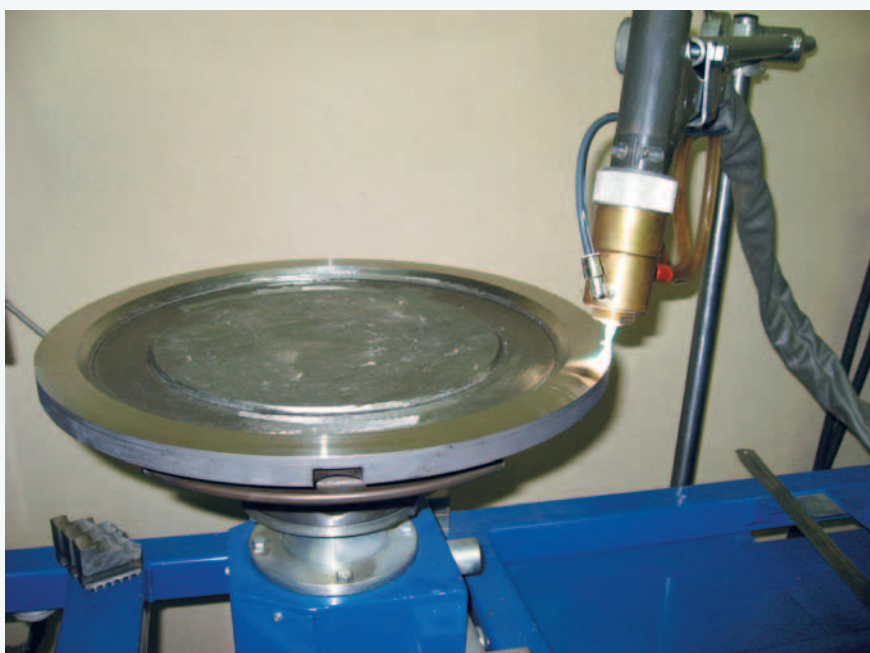
Эффект от ФПУ достигается за счет изменения физико-механических свойств поверхностного слоя: увеличения микротвердости, уменьшения коэффициента трения, создания сжимающих напряжений, заживления микродефектов, образования на поверхности диэлектрического и жаростойкого пленочного покрытия с низким коэффициентом теплопроводности, химической инертностью и специфической топографией поверхности.

Оборудование для ФПУ включает в себя источник тока, блок аппаратуры с жидкостным дозатором и малогабаритный плазмотрон.

Технологический процесс ФПУ проводится при атмосферном давлении и состоит из операций предварительной очистки (любым известным методом) и непосредственно упрочнения обрабатываемой поверхности путем взаимного перемещения изделия и плазмотрона. Температура нагрева деталей при ФПУ не превышает 100-150 °С. Параметры шероховатости поверхности после ФПУ не изменяются. В качестве плазмообразующего газа используется аргон, исходным материалом для прохождения плазмохимических реакций и образования покрытия является жидкий препарат СЕТОЛ. Его расход не превышает 0,5 г/ч (не более 0,5 литра в год).

По сравнению с аналогами – ионно-плазменным напылением, лазерным и электроискровым упрочнением, эпиламированием, нанесением кластерных покрытий процесс ФПУ имеет следующие преимущества:

- высокая воспроизводимость и стабильность упрочнения за счёт двойного эффекта – от износостойкого покрытия и структурных изменений в тонком приповерхностном слое;
- проведение процесса упрочнения на воздухе при температуре окружающей среды не требует применения вакуумных или других камер и ванн;
- вследствие нанесения тонкопленочного покрытия (толщиной не более 3 микрометров), укладываемого в допуски на размеры деталей, процесс упрочнения используется в качестве окончательной финишной операции;
- отсутствие изменений параметров шероховатости поверхности после процесса упрочнения;
- минимальный нагрев в процессе обработки (не более 100-120 °С) не вызывает деформаций деталей, а также – позволяет упрочнять инструментальные стали с низкой температурой отпуска;
- возможность упрочнения локальных (по глубине и площади) объемов деталей в местах износа с сохранением



Осаждение покрытия на диск задвижки

исходных свойств материала в остальном объёме;

- тонкоплёночное покрытие по микротвёрдости наиболее близко к алмазоподобным покрытиям;
- образующиеся на поверхности после ФПУ сжимающие остаточные напряжения при циклической нагрузке повышают усталостную прочность изделия (для сравнения: после операции шлифования возникают растягивающие напряжения, ведущие к снижению усталостной прочности);
- высокая адгезионная прочность сцепления покрытия с основой обеспечивает максимальную сопротивляемость истиранию (в том числе – при взаимодействии инструмента с обрабатываемым материалом);
- низкий коэффициент трения способствует подавлению процессов наростообразования при резании или налипанию при штамповке и прессовании;
- формирование специфического микрорельефа поверхности способствует эффективному его заполнению смазочно-охлаждающей жидкостью при эксплуатации инструмента и деталей машин;
- образующееся на поверхности тонкоплёночное аморфное (стеклообразное) покрытие защищает изделие от воздействия высокой температуры (испытания на высокотемпературную воздушную коррозию в течение 100 часов при температуре 800 °С);
- высокая производительность упрочнения (время обработки, например, кромок вырубного штампа средних размеров может составлять несколько минут);
- простота операций по очистке и обезжириванию перед упрочнением (отсутствие специальной предварительной подготовки);
- возможность упрочнения поверхностей деталей любых габаритов в ручном или автоматическом режимах;
- минимальное потребление и низкая стоимость расходных материалов;
- низкая потребляемая мощность установки для упрочнения – менее 6 кВт;
- незначительная площадь, занимаемая оборудованием – 1-3 м<sup>2</sup>;
- малогабаритный плазмотрон для упрочнения (массой около 1 кг) может быть легко закреплён на ма-



Осаждение покрытия на пробку

нипуляторе, в руке робота, а также позволяет вести обработку вручную;

- транспортабельность и маневренность оборудования (масса порядка 100 кг);
- экологическая чистота процесса в связи с отсутствием отходов при упрочнении;
- минимальный уровень шума, не требующий специальных мер защиты;
- в отличие от методов упрочнения с использованием поверхностно-активных веществ, в данной технологии отсутствуют особые требования к помещению, нет контактирования с токсичными материалами, не требуется затрат времени на выдержку в растворах и сушку обработанных деталей;
- возможность образования профилированных углублений путем обработки поверхности методом ФПУ и образования рабочих зазоров 2-3 мкм (например, для газодинамических подшипников);
- в отличие от избирательного переноса в процессе трения при ФПУ происходит принудительное образование в зоне фрикционного контакта тонкой не окисляющейся аморфной пленки с низким сопротивлением сдвигу, неспособной накапливать дислокации (дефекты) при деформации.

*Впервые опубликовано в журнале «РИТМ» № 1-2011,  
<http://www.ritm-magazine.ru/>*