

ФИНИШНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СВЕРЛ

Selection of the optimal wear-resistant coating and coating technology to improve the durability of the tool is an actual problem. The comparative analysis of the properties of wear-resistant coatings and technologies of their application is provided in article for work-hardening of drills.

Одним из основных направлений повышения эффективности металлорежущего инструмента является увеличение его ресурса за счет применения тонкопленочных износостойких покрытий, состоящих, например, из различных тугоплавких соединений (TiN, TiCN, TiAlN, ZrN, ZrCN, ZrHfN, CrN и др.). Свойства данных покрытий достаточно широко изучены и они активно применяются в промышленности. Одновременно в мировой практике используются многокомпонентные и композитные нанопокртия, уникальность которых заключается в высокой объемной доле границ раздела фаз и их прочности, отсутствии дислокаций внутри кристаллов, возможности изменения соотношения объемных долей кристаллической и аморфной фаз, взаимной растворимости металлических и неметаллических компонентов. Это обеспечивает улучшенные физико-механические свойства покрытий, такие как твердость, упругость, усталостная прочность, жаро- и коррозионная стойкость. Кроме того, данные покрытия имеют повышенные трибологические характеристики.

Исходя из основных принципов трения и износа, можно предположить, что повышенная твердость поверхностного слоя является основным критерием решения задач увеличения ресурса. В действительности же, при реальных условиях контакта деталей и инструмента минимизация износа зависит от упругости и стойкости к деформациям поверхностного слоя не меньше, чем от твердости. Поэтому к износостойким покрытиям следует относить материалы с оптимальными значениями твердости и модуля упругости и имеющие повышенные трибологические свойства (низкий коэффициент трения, минимальную длительность приработки, минимальное тепловыделение при трении, минимальный износ трущихся поверхностей). Дополнительно такие покрытия могут обеспечивать снижение уровня возникающих напряжений, предотвращать растрескивание, трибохимические эффекты, быть диэлектрическими. При этом использование современных износостойких покрытий должно основываться на обеспечении максимальных адгезионных характеристик с основным материалом.

Выбор оптимального износостойкого покрытия и технологии его нанесения с целью повышения долговечности конкретного инструмента является актуальной проблемой. В представленной работе приведен сравнительный анализ свойств износостойких покрытий и, соответственно, технологий их нанесения на основе определения физико-механических и трибологических характеристик материала покрытия для упрочнения сверл, в том числе изготовленных из порошковой быстрорежущей стали.

ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

В качестве основных современных технологий нанесения износостойких покрытий для металлорежущего инструмента используются процессы химического (CVD — chemical vapor deposition) и физического осаждения из газовой фазы (PVD — physical vapor deposition). За рубежом более широко применяются CVD-процессы. При CVD-процессах в качестве исходных материалов используются газы. Составы газовой фазы и покрытия существенно различаются. Покрытие образуется за счет прохождения химических реакций используемых реагентов. Сами процессы в большинстве случаев проводятся при атмосферном давлении в специальных камерах,

в отдельных случаях — в вакуумных камерах. Из анализа мировых достижений в области нанесения покрытий известно, что понизить температуру нагрева изделий в CVD процессах можно при использовании в качестве реагентов образования газовой фазы элементоорганических соединений и при помощи плазменной активации (рис. 1). Это способствует исключению негативных явлений от термического воздействия и обеспечивает возможность более широкого использования различных материалов основы.

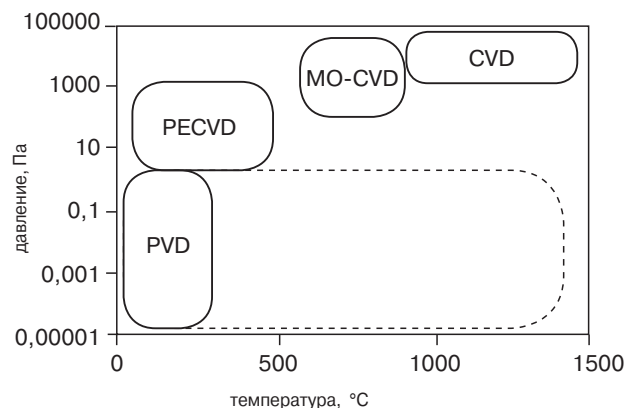


Рис. 1. Виды процессов осаждения покрытий в зависимости от параметров давления и температуры их проведения, где CVD — химическое осаждение покрытий, PVD — физическое осаждение покрытий, PECVD — химическое осаждение покрытий с плазменной активацией, MO-CVD — химическое осаждение покрытий с использованием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

Применение элементоорганических соединений для нанесения покрытий повышает уровень экологической безопасности, с учетом их нетоксичности (в отличие от широко применяемых для этих целей силианов, боранов или галогенидов при традиционных CVD процессах), а также понижает уровень взрывоопасности, с учетом их использования в жидком состоянии. Кроме этого элементоорганические соединения могут содержать все необходимые компоненты для получения покрытий в единой субстанции, что повышает эффективность контроля за технологическим процессом и воспроизводимость свойств наносимых покрытий.

Плазменная активация обеспечивает повышенное качество подготовки поверхности подложки, ведет к более быстрому прохождению химических реакций, а также к более высоким скоростям осаждения покрытия.

Ограничение широкого использования методов PVD и CVD на отечественных предприятиях связано с применением сложного и дорогостоящего оборудования, требующего высокой квалификации обслуживания. Для российского менталитета промышленных предприятий наиболее рационально для нанесения тонкопленочных 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 тонкопленочных покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой [1], объединяющая положительные эффекты процессов MO-CVD и PE-CVD. При этом дополнительно ее новизна заключается в отсутствии использования закрытых камер, более низких температур нагрева изделий в процессе осаждения покрытий и применении гибко управляемой электродуговой плазмы. В связи с тем, что нанесение тонкопленочных износостойких покрытий 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 нанесение различных упрочняющих покрытий, как на покупной инструмент, так и на самостоятельно изготавливаемый и перетачиваемый инструмент.



Рис. 2. Общий вид плазматрона с плазмохимическим реактором.

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).

К основным достоинствам ФПУ относятся: осуществление процесса без вакуума и камер; минимальный нагрев изделий, не превышающий 200°C; возможность нанесения покрытия локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритов; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

Основным принципом нанесения тонкопленочного износостойкого покрытия, например, на основе системы Si-O-C-N, B-O-C-N, B-Si-O-C-N и др., взятых за основу технологии ФПУ, является разложение паров в жидких элементорганических препаратов, которые вводятся в плазмохимический реактор дугового плазматрона, 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 может осуществляться многослойно при толщине каждого слоя порядка 2–20 нм полосами шириной 8–15 мм (с учетом линейного перемещения плазменной струи). С целью минимального термического воздействия на материал основы при ФПУ плазменную струю перемещают со скоростью 3–150 мм/с.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

С целью повышения долговечности сверл, изготавливаемых из быстрорежущих сталей, наибольшее применение в качестве упрочняющих находят покрытия из TiN и TiAlN, осаждаемые с использованием PVD процессов [2].

Проведем анализ физико-механических и трибологических свойств данных покрытий, а также нанокompозитного покрытия системы Si-O-C-N, наносимого методом финишного плазменного упрочнения. Покрытия TiN и TiAlN наносились на модернизированной установке HNB-6,6-И1 с дополнительной сепарацией плазменного потока, нанокompозитное покрытие системы Si-O-C-N — на установке финишного плазменного упрочнения ТЕСИС-115. В качестве образцов использовались диски диаметром 15 и 30 мм, толщиной 5 мм, изготовленные из стали P18, прошедшей термическую обработку до твердости 60–62 HRC.

Для определения физико-механических свойств, в соответствии с ISO 14577–4:2007, применялся метод наноиндентирования. Измерение физико-механических свойств исследуемых покрытий производилось при использовании нанотвердомера TI750ubi (Hysitron, США). Обработка результатов измерений проводилась по методу Оливера и Фара. Результаты измерения физико-механических свойств рассматриваемых материалов покрытий и расчетные значения критериев H_{plast}/E^* , H_{plast}^3/E^{*2} для разных усилий нагрузки приведены в табл. 1, где H_{plast} , ГПа — нанотвердость;

$E^* = E/(1-\nu^2)$, ГПа — приведенный модуль упругости (где E — модуль Юнга, $\nu = 0,25$ — коэффициент Пуассона); H/E^* — стойкость покрытия к упругой деформации разрушения (индекс пластичности); H^3/E^{*2} — сопротивление пластической деформации; $We, \%$ — доля работы упругой деформации (упругое восстановление).

Таблица 1. Физико-механические свойства покрытий

| № | Покрытие | H_{plast} , ГПа | E^* , ГПа | H_{plast}/E^* | H_{plast}^3/E^{*2} | $We, \%$ |
|---|----------|-------------------|-------------|-----------------|----------------------|----------|
| 1 | TiN | 22 | 300 | 0,07 | 0,12 | 87 |
| | | 24 | 320 | 0,08 | 0,14 | 81 |
| | | 25 | 340 | 0,07 | 0,14 | 90 |
| 2 | TiAlN | 25 | 293 | 0,09 | 0,19 | 99 |
| | | 37 | 383 | 0,10 | 0,36 | 85 |
| | | 38 | 336 | 0,11 | 0,50 | 77 |
| 3 | Si-O-C-N | 19 | 127 | 0,14 | 0,41 | 89 |
| | | 19 | 128 | 0,15 | 0,44 | 93 |
| | | 20 | 123 | 0,16 | 0,54 | 82 |
| | | 17 | 112 | 0,15 | 0,41 | 76 |

В соответствии с полученными значениями покрытие системы Si-O-C-N имеет примерно в 1,5–2,0 раза более высокую стойкость к упругой деформации разрушения (критерий H_{plast}/E^*), в 1,2–3,0 раза более высокое сопротивление пластической деформации (критерий H_{plast}^3/E^{*2}) по сравнению с покрытиями TiN и TiAlN и более близкий модуль упругости к модулю упругости материала подложки — стали P18 (200–220 ГПа), характеризующий минимизацию упругих напряжений на границе раздела покрытие-подложка и внутренних остаточных напряжений в системе.

Трибологические испытания покрытий и материала основы — стали P18 проводились с использованием трибометра TRB-S-DE (CSM, Швейцария) по схеме «шар-диск» в соответствии с международными стандартами:

— ASTM G99–05 (2010) — Испытания на трение и износ по схеме «шар — диск» (США),

— ASTM G133–05 (2010) — Испытания на трение и износ по схеме «шар — плоскость» при поступательном движении (США),

— DIN 50324–1992 — Испытания на трение и износ при трении скольжении по схеме «шар — диск» (Германия),

— JIS R 1613:2010 — Испытания на трение и износ по схеме «шар — диск» (Япония),

— ISO 20808:2004 — Определение характеристик износа и трения по схеме «шар — диск» (интернациональный стандарт) с использованием контртела (шара $\varnothing 3$ мм), изготовленного из нитрида кремния Si3N4.

При каждом испытании использовался новый шарик, а его износ при оценке диаметра образующейся лунки не превышал 0,1–0,2 мкм. Нагрузка на контртело составляла 5 Н. Линейная скорость — 10 см/с. Путь трения — 80 м. При испытаниях использовалась смазка SAE5 W40. Ширина следа износа после трибоиспытаний определялась с использованием микроскопа Olympus GX 51.

Результаты трибологических испытаний представлены в табл. 2. В качестве примера на рис. 3 приведен

Таблица 2. Значения параметров трибологических испытаний на трибометре TRB-S-DE

| Покрытие | Основа | Средний коэффициент трения | Износ, мкм | |
|----------|--------------------------|----------------------------|------------|-----------------|
| | | | По глубине | По ширине следа |
| - | P18 ($\varnothing 30$) | 0,2 | 6,7 | 617 |
| TiN | P18 ($\varnothing 30$) | 0,1 | 3,0 | 90,3 |
| TiAlN | P18 ($\varnothing 30$) | 0,2 | 5,0 | 75,3 |
| Si-O-C-N | P18 ($\varnothing 30$) | 0,04 | 2,0 | 99,8 |

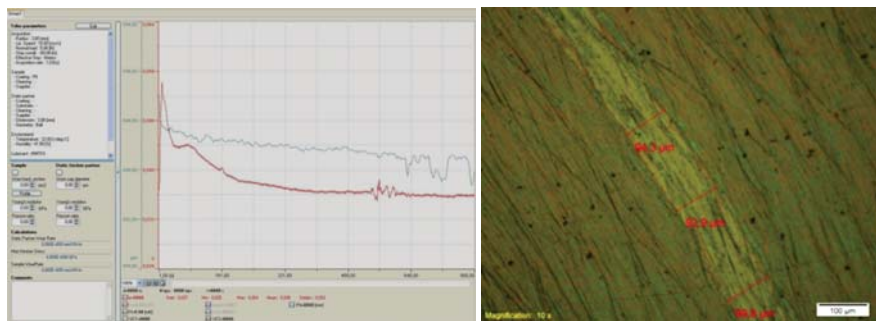


Рис. 3. Протокол испытания на трение и износ (а) и вид полосы износа покрытия Si-O-C-N (б).

протокол испытаний покрытия Si-O-C-N с графиками изменения со временем коэффициента трения и глубины заглабления индентора в материал покрытия, а также вид полосы износа с замерами ее ширины на образце с покрытием.

Сравнительный анализ покрытий между собой показал, что минимальным коэффициентом трения обладает покрытие системы Si-O-C-N и он более чем в 2,5 раза меньше коэффициента трения ближайшего покрытия TiN и в 5 раз меньше материала основы. Наличие резких амплитудных изменений глубины износа может определяться образующимися продуктами износа, влияющими непосредственно на процесс трения.

Отсутствие трибологического покрытия на материале основы — стали P18 кардинально изменяет параметры трения и износа — кривая изменения коэффициента трения со временем имеет возрастающий характер, максимальную глубину и ширину износа (**рис. 4**).

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА СВЕРЛА

Нанесение покрытия системы Si-O-C-N на сверла диаметром менее 10 мм возможно при их групповой обработке с расположением упрочняемых изделий по окружности в специализированной оснастке на диаметре планшайбы D (**рис. 5**). Поворот изделий вокруг собственной оси может быть периодический с учетом необходимого обеспечения воздействия плазмы на все стороны упрочняемых поверхностей (например, с шагом на 180 градусов при диаметре изделий менее 6 мм) или с постоянным вращением вокруг собственной оси, но с учетом того, чтобы относительное перемещение обрабатываемой поверхности и плазменной струи не превышало 150 мм/с, что обусловлено газодинамическими процессами взаимодействия обрабатываемой поверхности и плазменной струи.

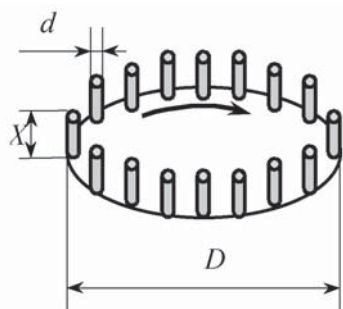


Рис. 5. Расположение сверл на специализированной оснастке.

Для исключения перегрева обрабатываемых изделий рекомендуется назначать окружную скорость планшайбы 30...40 мм/с. При расчете задается: длина упрочняемой цилиндрической части изделий X , мм; диаметр планшайбы D , мм; осевая скорость вдоль оси изделия v_x , мм/с (при шаговом смещении плазменной струи вдоль оси изделия на 8 мм $v_x = 0$); толщина покрытия F , мкм; окружная скорость v планшайбы на диаметре D , мм/с.

Повышение производительности групповой обработки при массовом производстве может быть достигнуто использованием не одного, а нескольких плазменных модулей.

В **табл. 3** приведены примеры групповой обработки инструмента диаметром 10 и 6 мм с длиной упрочняемой рабо-

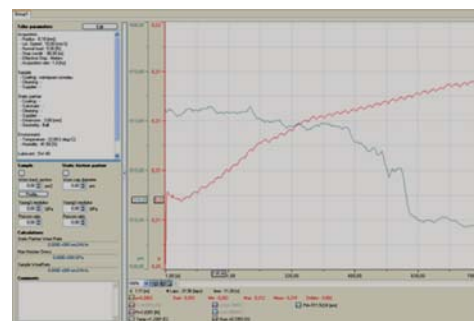


Рис. 4. Протокол испытания на трение и износ материала основы — стали P18 (без покрытия) со смазкой SAE5 W40.

чей части 32 мм. Из **табл. 3** видно, что производительность нанесения покрытия для изделий диаметром 10 мм может достигать 272 изделия в час при постоянном вращении изделий и при использовании 4 плазменных модулей, а для изделий диаметром 6 мм может достигать 640 изделий в час при периодическом повороте изделий на 180 градусов и при использовании 4 плазменных модулей.

Таблица 3. Групповая обработка цилиндрического инструмента на планшайбе диаметром 1000 мм методом ФПУ путем нанесения покрытия толщиной 150 нм

| Диаметр изделий d , мм | Число установленных изделий I | Вращение изделий | Число плазменных модулей | Производительность обработки $P_{обр}$, изд./час. |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|--|
| 10 | 260 | постоянное | 1 | 68 |
| 10 | 260 | постоянное | 4 | 272 |
| 6 | 390 | постоянное | 1 | 102 |
| 6 | 390 | постоянное | 4 | 408 |
| 6 | 390 | периодическое на 180° | 1 | 160 |
| 6 | 390 | периодическое на 180° | 4 | 640 |

Таким образом, автоматизация технологии нанесения покрытия методом ФПУ с использованием соответствующего механического оборудования при массовом производстве дает возможность повысить производительность по сравнению, например, с PVD процессами.

МОДЕЛЬНЫЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СВЕРЛ ПОСЛЕ ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Модельные испытания сверл из различных материалов и покрытий проводились на кафедре конструкционных материалов и материаловедения СПбГПУ под руководством проф. М.Т. Коротких. Объектом испытаний были выбраны спиральные сверла диаметром 6 мм из порошковой быстрорежущей стали P6 M5 ФЗ-МП (Vanadis-23), стандартной стали P6 M5, из стали HSS-PM с покрытием TiAlN Garant (1146206), из стали HSS-Co с покрытием TiAlN Garant (1146006), из стали N HSS с покрытием TiN Holec (1143606), а также сверла из порошковой быстрорежущей стали P6 M5 ФЗ-МП (Vanadis-23) с износостойким покрытием системы Si-O-C-N, наносимых методом финишного плазменного упрочнения.

В качестве обрабатываемого материала применялась пластина, изготовленная из нержавеющей стали 12X18 H9 T толщиной 15 мм. Режим резания — отверстия сквозные, скорость резания — 18,8 м/мин; подача 0,05 мм/об, охлаждение — 10% раствором водного эмульсола KUTWELL 42, при подаче в зону резания свободным поливом. В качестве критерия износа выбрано достижение величины фаски износа на периферии режущей кромки сверла, равной 0,4 мм. Стойкость сверл определялась количеством обработанных отверстий до достижения предельного износа.

Результаты испытаний сверл из различных материалов и покрытий приведены в **табл. 4**.

Таблица 4

| Характеристика сверл | Стойкость (кол-во отверстий) |
|--|------------------------------|
| Из порошковой быстрорежущей стали Р6М5ФЗ-МП (Vanadis-23) | 4 |
| Из порошковой быстрорежущей стали Р6М5ФЗ-МП (Vanadis-23) с покрытие Si-O-C-N | 12 |
| Из материала HSS-PM с покрытием TiAlN Garant (114620 6) | 2 |
| Из материала HSS-Co с покрытием TiAlN Garant (114600 6) | 6 |
| Из материала N HSSc покрытием TiN Horex(114360 6) | 7 |
| Р6М5 | 0 |

На основании данных модельных испытаний выявлено, что наиболее высокой стойкостью обладают сверла из порошковой быстрорежущей стали Р6 М5 ФЗ-МП (Vanadis-23) с покрытием системы Si-O-C-N. При данных условиях испытаний они в 3 раза более долговечны по сравнению с такими же сверлами, но без данного покрытия и в 2–6 раз имеют более высокую стойкость, чем сверла из быстрорежущей стали с покрытиями TiN и TiAlN.

Промышленные испытания сверл из порошковой быстрорежущей стали Р6 М5 К5-МП с покрытием системы Si-O-C-N проводились на ОАО «Пермский завод «Машиностроитель» на роботизированном технологическом комплексе на базе робота KUKA KR60 HA при перфорации заготовки — звукопоглощающей сэндвичевой конструкции авиационного двигателя 94–05–8006 (материал — стеклопластик ВПС-33). Сверление полимерных композиционных материалов (стеклопластиков, углепластиков) обычно связано с образованием большого количества сколов, разломачиванием материала, со сложностью получения необходимой шероховатости поверхности, плохим отводом тепла из зоны резания, абразивным воздействием наполнителя материала, деструкции полимерного связующего, низкой производительностью и др. факторами.

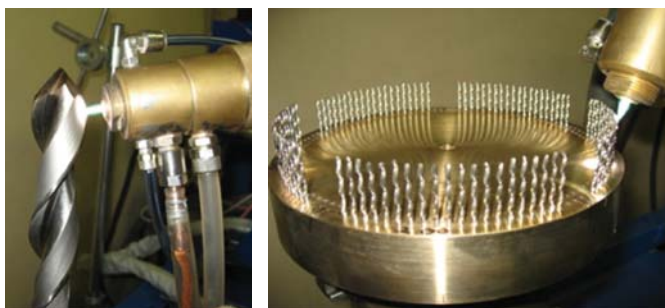
При проведении испытаний стойкости сверл, за критерий затупления принимался технологический фактор — появление первых признаков нарушения нормальной работы и требующей замены инструмента из-за резкого падения качества обработанных отверстий: появления вырывов, разломачивания материала вокруг отверстия, а также возникновения ощутимых колебаний заготовки. Стойкость сверл определялась количеством обработанных отверстий. Результаты промышленных испытаний приведены в **табл. 5**.

Таблица 5

| Тип инструмента | Материал режущей части | Подача, мм/мин | Частота вращения, об/мин | Количество обработанных отверстий, шт. |
|---|---|----------------|--------------------------|--|
| Сверло спиральное Ø2 мм, фирмы IZAR (Испания) | Быстрорежущая сталь HSSCO с покрытием TiN | 4 | 12000 | 3000 |
| Сверло спиральное, Ø2 мм | Порошковая быстрорежущая сталь Р6М5К5-МП с покрытием Si-O-C-N | 4 | 12000 | 5500 |

На основании проведенных промышленных испытаний сверла с покрытием Si-O-C-N имели практически в 2 раза более высокую стойкость, чем серийно используемые на производстве сверла фирмы IZAR Cutting Tools S. A. L. (Испания) с покрытием нитрида титана.

На **рис. 6** показан процесс нанесения покрытия системы Si-O-C-N методом финишного плазменного упрочнения на сверла, а в **таб. 6** результаты его промышленного внедрения.


Рис. 6. Нанесение износостойкого покрытия системы Si-O-C-N методом финишного плазменного упрочнения.
Таблица 6. Производственные испытания сверл из стали Р6 М5

| № | Диаметр сверла | Материал обрабатываемой заготовки | Относительное повышение стойкости | Организация, проводившая испытания |
|----|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| 1. | Ø2,1 | 30ХГСА | 3,0 | «Электромашиностроительный завод «Лепсе», Киров |
| 2. | Ø3,0 | ВЧ 70 | 5,75 | «Моторостроительный завод», Харьков |
| 3. | Ø3,0 | Стеклотекстолит | 3,5 | «Мотор Сич», Запорожье |
| 4. | Ø4,0 | 65Г | 2,0 | Снежинский машиностроительный завод ОАО «Мотор Сич», Снежное |
| 5. | Ø4,2 | 12ХН3А | 5,0 | «Завод технологической оснастки», Николаев |
| 6. | Ø5 | AK7 | 13,6 | «Топливные системы», Санкт-Петербург |
| 7. | Ø8,9 | Ст45 | 4,0 | «Турбомеханический завод», Полтава |
| 8. | Ø23 | Ст45 | 2,5 | Инструментальный завод ПО «Уралвагонзавод», Нижний Тагил |

На основании сравнительного анализа физико-механических и трибологических свойств различных покрытий для упрочнения сверл, модельных и промышленных испытаний технология финишного плазменного упрочнения путем нанесения композиционных нанопокровов может рассматриваться как перспективная для широкомасштабного внедрения на предприятиях крупного, среднего и малого бизнеса, как при массовом выпуске инструмента, так и при использовании покупного и изготавливаемого собственными силами специализированного инструмента.

Павел Абрамович Тополянский
ООО «Научно-производственная фирма «Плазмацентр»
www.plasmacentre.ru

Литература

1. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Изд-во Политехнического университета. СПб.: 2008. — 406 с.
2. Гиршов В. Л., Тополянский П. А. Металлорежущий инструмент из порошковой стали с дисперсной структурой и алмазоподобным нанопокровом. *Металлообработка*. — № 1 (49). — 2009. С. 43–49