

УДК 621.879

**А. В. Бондаренко**, студент,

Научные руководители: **Д. А. Локтев**, к.т.н., доц., **М. С. Островский**, д.т.н., проф., Московский государственный горный университет

E-mail: [kaftmr@msmu.ru](mailto:kaftmr@msmu.ru)

## **Увеличение стойкости червячных фрез с помощью нанесения современных износостойких покрытий**

*Рассмотрена технология нанесения современных износостойких покрытий на червячные фрезы для повышения их стойкости и увеличения параметров режимов резания.*

**Ключевые слова:** фреза червячная, износостойкое покрытие, адгезия, коэффициент трения, твердый и градиентный слой, бомбардировка ионами, теплостойкость и шероховатость поверхности покрытий.

**A. V. Bondarenko, D. A. Loktev**

## **Increase Resistance Hobs with Application of Modern Wear-Resistant Coating**

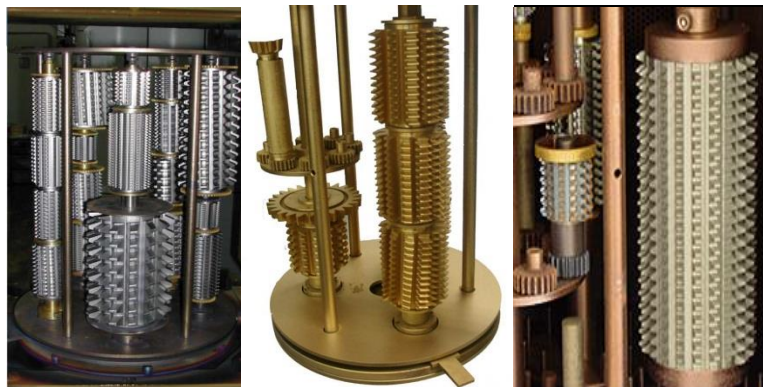
*The technology of application of modern wear-resistant coatings on hobs to increase their stamina and increase the cutting parameters.*

**Keywords:** hob, wear-resistant coatings, adhesion, friction, solid and gradient layers, ion bombardment, thermal stability and surface roughness of coatings.

В процессе нанесения износостойкого покрытия на инструментальном материале создается твердый слой, который создает своего рода барьер между инструментальным и обрабатываемым материалом. Покрытие, как правило, имеет более низкий коэффициент трения по сравнению с инструментальным материалом. В результате снижается трение между стружкой и передней поверхностью, что существенно сокращает абразивный износ. Наличие барьерного слоя также ослабляет эффект адгезионного износа, поскольку сокращается наростообразование в процессе резания. Наличие износостойкого покрытия сокращает количества тепла, попадающего в инструментальный материал. В результате уменьшается нагрев инструментального материала. Уменьшение температуры и создание барьера практически полностью предотвращает диффузию инструментального и обрабатываемого материала и связанный с ней диффузионный износ. Покрытие также создает химический барьер, увеличивая стойкость инструмента против окисления и других химических воздействий.

Таким образом, наличие покрытия замедляет все основные процессы износа инструментального материала. Этим фактом можно воспользоваться не только для повышения стойкости, но и для существенного повышения производительности.

На сегодняшний день существует много видов износостойких покрытий на режущий инструмент. Они различаются по структуре, по химическому составу и толщине. В однослойных покрытиях на материал наносится равномерный слой определенного химического состава. Это самые простые покрытия. Современная технология позволяет наносить более сложные покрытия с более высокими эксплуатационными характеристиками. Градиентными называются покрытия, в которых химический состав постепенно изменяется от покрываемого материала к внешней поверхности покрытия. Градиентные покрытия могут состоять из одного химического соединения или реализовывать постепенное замещение одного химического соединения другим. Покрытия, в которых слои с разным химическим составом чередуются и имеют четко очерченные границы, называются многослойными. Если слоев много, то они очень тонкие (толщина каждого слоя составляет несколько нанометров –  $10^{-9}$  м) и такие покрытия называют нанослойными.



**Рис. 1. Фрезы червячные в установке фирмы Platit для нанесения износостойкого покрытия**

Существуют два основных метода нанесения износостойкого покрытия на режущий инструмент - методом химического осаждения (CVD) и методом физического осаждения (PVD). Для нанесения покрытия методом химического осаждения исходные материалы переводят в газообразное состояние. Рабочие газы попадают в камеру нанесения покрытия, в которой при температуре  $900...1100^{\circ}\text{C}$  происходит химическая реакция с образованием твердого вещества, которое затем осаждается на изделие в виде покрытия. Остаток рабочих газов и прочие продукты реакции постоянно откачиваются насосами (рис. 2). Преимуществом этого метода является достаточно высокое рабочее давление, в результате

покрытие распределяется равномерно даже на изделиях сложной формы. Таким методом можно покрывать даже стенки отверстий. То, что процесс нанесения покрытия происходит при высокой температуре, обеспечивает хорошую сцепляемость покрытия с материалом изделия за счет диффузионных процессов. В то же время высокая температура процесса является и основным недостатком этого метода. Очевидно, что эта температура существенно превышает температуру отпуска быстрорежущей и инструментальной стали. Теоретически можно наносить покрытие на инструмент из быстрорежущей стали методом химического осаждения с последующей повторной закалкой. Однако, при закалке неминуемо возникнут деформации, которые существенно повлияют на точность изделия. Поэтому для точных инструментов из быстрорежущей стали (например, червячных фрез) метод нанесения покрытия химическим осаждением неприменим. Отметим, что температуры свыше  $800^{\circ}\text{C}$  также неблагоприятно сказываются на свойствах твердого сплава. Он становится более хрупким и, кроме того, исчезают благоприятные сжимающие напряжения, полученные при спекании твердого сплава. Поэтому все более широкое распространение получают новые методы химического осаждения - среднетемпературные и с поддержкой плазмой.

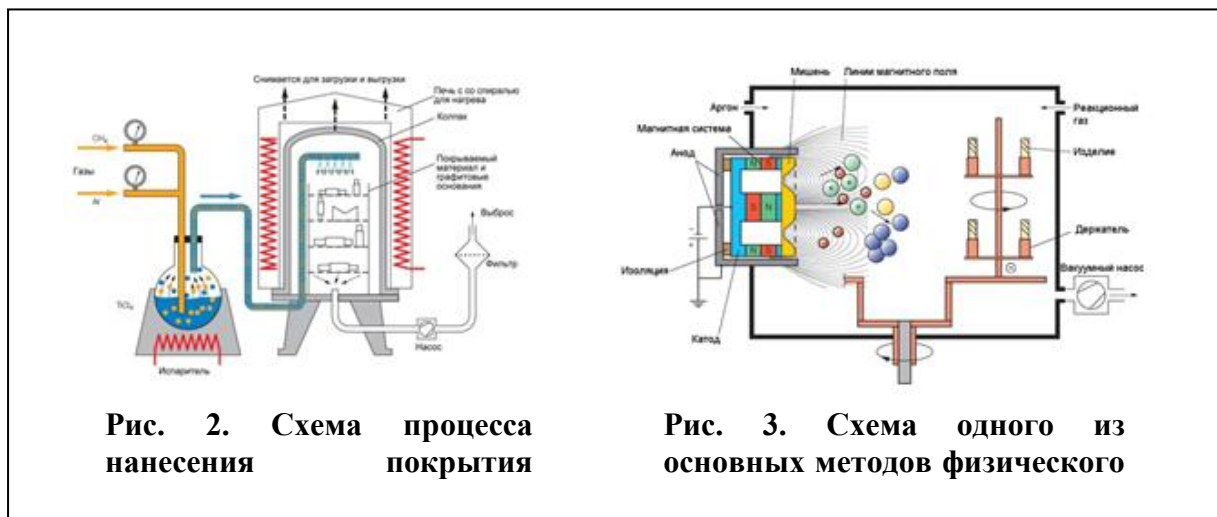
Для метода физического осаждения твердый исходный материал превращается в газовую фазу за счет тепловой или кинетической энергии. Из газовой фазы материал покрытия осаждается тонким слоем на изделие. При подаче в камеру покрытия рабочего газа (азота и углеродосодержащих газов) образуются нитриды и карбиды исходного вещества. Процесс происходит в вакууме с образованием плазмы, т.е. газа, состоящего из ионов, электронов и нейтральных частиц. Плазма электропроводна, диамагнитна и в то же время нейтральна за счет практически равного количества частиц, несущих позитивный и негативный заряды. При этом методе покрытие бомбардируется ионами. Существует несколько вариантов реализации метода физического осаждения покрытия. Они различаются способом превращения твердого материала в газообразную фазу и способом переноса плазмы к изделию. Материал изделия может испаряться или распыляться. Применяют следующие основные виды испарения материала мишени: тепловое испарение, испарение электрической дугой, испарение электронным пучком, испарение лазером. Испарившийся материал мишени переносится к изделию, соединяясь по пути с реакционным газом. Для увеличения скорости (и, соответственно) кинетической энергии переноса к изделию подводится отрицательное напряжение. Для распыления материала мишени он бомбардируется ионами газа. Освободившиеся ионы мишени вступают в реакцию с газом и осаждаются на изделии. Поскольку при методе физического осаждения используется концентрированный источник материала покрытия, необходимо обеспечить движение изделия таким образом, чтобы плазма

попадала равномерно на всю поверхность изделия. На рис. 3 схематически представлены один из основных методов физического нанесения покрытия - испарением электрической дугой.

### Основные характеристики двух методов нанесения покрытия химическим и физическим методом

	PVD	CVD
Параметры технологии		
Давление	$<10^2 \text{ Па}$	$<10^2 \text{ Па}$
Температура основы	$<500^\circ \text{ C}$	$>500^\circ \text{ C}$
Степень осаждения	Высокая	Низкая
Структура	Аморфная, тонкокристаллическая	Кристаллическая с кромками
Сцепляемость	Трудное	Легкое
Поры/трещины	Редко	Возможно
Условия производства		
Размер партии	Маленький	Большой
Возможность перекрытия	Плохая	Хорошая
Требования к оборудованию	Высокие	Низкие
Стоимость /шт.	Высокая	Низкая

В таблице приведены основные характеристики двух методов нанесения покрытия - химическим и физическим методом.

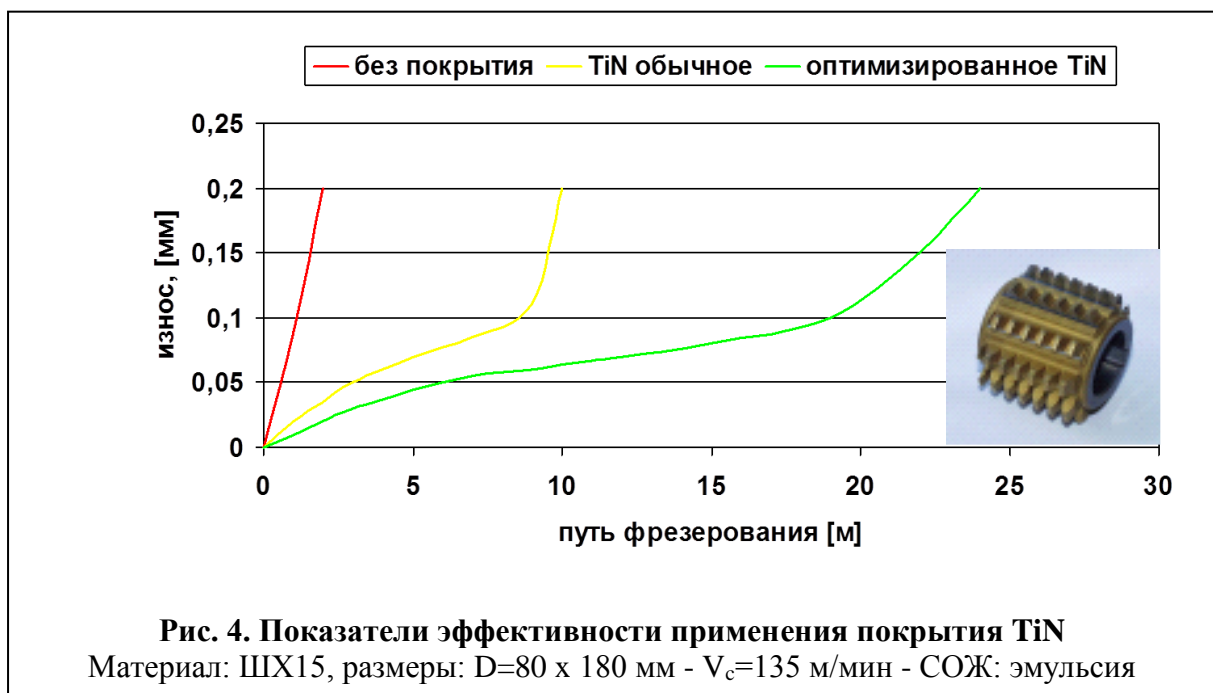


Износостойкие покрытия оцениваются по следующим основным характеристикам:

- твердость слоя покрытия;
- теплостойкость покрытия (способность покрытия сохранять свои свойства при высоких температурах);
- коэффициент трения (влияет на сход стружки и выделяемое при этом тепло);

- теплопроводность покрытия (влияет на распределение выделяемого при резании тепла);
- вязкость покрытия (способность противостоять изгибающим нагрузкам без разрушения);
- шероховатость поверхности покрытия (влияет на сход стружки и на возникновение очагов разрушения покрытия).

Наиболее распространенным на сегодняшний день износостойким покрытием для червячных фрез является нитрид титана TiN. Покрытие TiN обладает высокой твердостью в сочетании с высокой вязкостью, хорошей износостойкостью, низким коэффициентом трения со сталью, хорошей химической стойкостью, высокой сопротивляемостью окислению на воздухе, хорошей адгезией на изделиях сложной формы. Высокая твердость покрытия обеспечивает сопротивляемость, как абразивному износу, так и луночному износу. В результате становится возможным увеличение режимов обработки, при этом износ инструмента остается на том же уровне, что у инструментов без покрытия. В результате нанесения покрытия TiN можно увеличить стойкость червячной фрезы в 2-12 раз (рис. 4).



Поскольку рабочая температура этого покрытия не превышает 600°C, скорость резания может быть увеличена в определенных пределах. Ограничение по рабочей температуре предопределяет использование инструментов с покрытием TiN только с применением СОЖ.

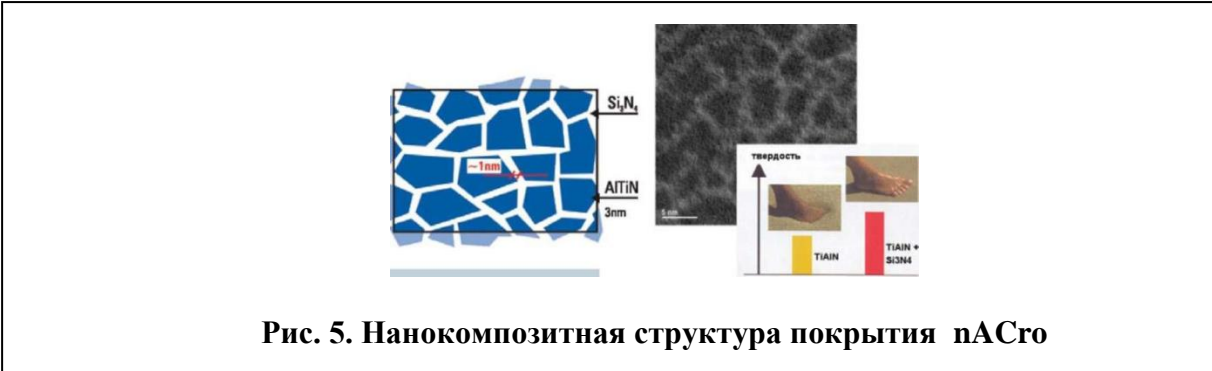
Традиционное покрытие карбонитридом титана TiCN отличается от покрытия TiN более высокой твердостью. Высокая твердость (обусловленная наличием углерода в кристаллической решетке) в сочетании с низким коэффициентом трения определяет широкую область

применения данного покрытия как в качестве твердого покрытия на инструмент, так и в качестве снижающего трение покрытия на детали машин. Цвет покрытия - серо-голубой или медно-красный и зависит от соотношения доли углерода и азота. При использовании инструментов с покрытием TiCN обязательно применяется СОЖ (из-за низкой температурной стойкости покрытия). Покрытие часто наносится в виде многослойного или градиентного с постепенным увеличением содержания углерода к поверхности.

Доля покрытий (Ti,Al)N в общем объеме износостойких покрытий последние годы постоянно увеличивается. Преимущество этих покрытий в высокой стойкости к окислению при очень высокой твердости и низкой теплопроводности. Покрытие (Ti,Al)N создает тепловой барьер, практически изолирующий инструментальный материал от воздействия тепла, образующегося при резании. Происходит перераспределение тепловых потоков, и большая часть тепла уходит в стружку. Кроме того, в отличие от других видов покрытия, с увеличением температуры резания на поверхности этого покрытия образуется пленка оксида алюминия, обладающая более низким коэффициентом трения. В результате снижаются усилия при обработке. Как следствие, областью применения инструментов с покрытием (Ti,Al)N является обработка с большими термическими нагрузками на инструмент. К таким операциям относится высокопроизводительная обработка, когда повышение режимов резания приводит к увеличению температуры в зоне контакта между заготовкой и инструментом, и обработка без применения СОЖ.

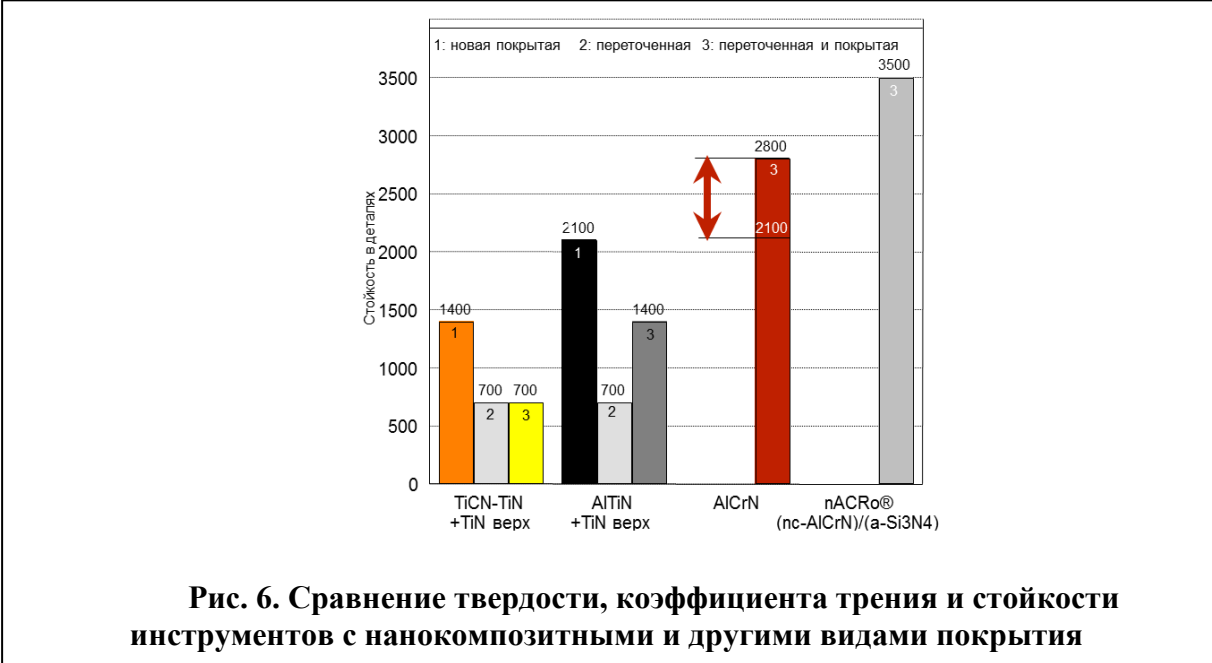
Созданное около трех лет назад не содержащее титана покрытие AlCrN уже нашло широкое распространение, прежде всего именно для червячных фрез. Более высокая износостойкость покрытия обеспечивает увеличение стойкости и сокращение затрат на инструмент. По сравнению с рассмотренными выше видами покрытия, покрытие AlCrN характеризуется стойкостью к окислению при температурах до 1100°C, сохраняя при этих температурах высокую химическую стабильность. Это покрытие может быть нанесено на червячные фрезы как из порошковой быстрорежущей стали, так и из твердого сплава. По сравнению с покрытиями TiAlN в этом случае обеспечивается рост стойкости (в некоторых случаях двухкратный).

Покрытие nAlCrO по химическому составу совпадает с покрытием AlCrN, но имеет нанокompозитную структуру. Нанокompозитная структура (рис. 5) представляет собой нанокристаллические зерна материала покрытия, внедренные в покрытие с сухим песком на пляже, то нанокompозитное покрытие обладает свойствами мокрого песка.



**Рис. 5. Нанокompозитная структура покрытия nACro**

В результате при более высокой твердости это покрытие одновременно является и более эластичным, хотя обычно эти два параметра являются взаимно исключаящими. Увеличение твердости и снижение коэффициента трения благоприятно сказывается на стойкости инструментов с нанокompозитными покрытием (рис. 6).



**Рис. 6. Сравнение твердости, коэффициента трения и стойкости инструментов с нанокompозитными и другими видами покрытия**

Рассмотрим комбинации инструментального материала и покрытий для червячных фрез. На обычную быстрорежущую сталь наносят, как правило, покрытия  $TiN$ ,  $TiCN$  и  $TiAlN$ . Покрытие  $TiN$  применяется для обработки различных материалов с применением СОЖ на скоростях резания, не превышающих  $100$  м/мин. Покрытие  $TiCN$  также требует обязательного использования СОЖ и применяется для обработки материалов высокой твердости. Фрезы из обычной быстрорежущей стали достаточно редко применяются для сухой обработки. Если все же такая комбинация имеет место, то на фрезу наносят покрытие  $TiAlN$ . Скорости резания в этом случае не превышают  $110$  м/ мин, что определяется свойствами быстрорежущей стали. На порошковую быстрорежущую сталь могут наноситься все рассмотренные выше виды износостойких покрытий.

Любое из этих покрытий может быть применено в случае обработки с применением СОЖ. Скорости резания в этом случае могут быть увеличены до 130 м/мин. Червячные фрезы с покрытиями, содержащими алюминий, применяются также для сухой обработки (без СОЖ). Скорости резания в этом случае могут быть увеличены до 180 м/мин. Отметим, что на фрезы для сухой обработки в процессе восстановления режущих свойств после переточки обязательно наносится новое покрытие для предотвращения возникновения луночного износа. Решение о повторном нанесении покрытия на червячные фрезы, работающие с СОЖ, принимается в зависимости от условий их эксплуатации. Выбор покрытия на твердый сплав также зависит от того, предполагается ли применение СОЖ на данной операции. Покрытие AlCrN может быть применено во всех случаях. Покрытие TiN не применяется. Покрытие TiCN применяется только для обработки с СОЖ. Покрытие TiAlN на твердом сплаве применяется в виде однослойного покрытия для сухого резания.

Покрытие может наноситься на новые червячные фрезы и восстанавливаться после переточки. Различными в этом случае являются первые, подготовительные, операции. После изготовления новой червячной фрезы она поступает на участок подготовки перед нанесением покрытия. Основной операцией на этом этапе является струйная обработка специально подобранным абразивом. Целью этой обработки является удаление заусенцев, образовавшихся на кромках фрезы после шлифования зубьев по передней поверхности, и очистка задних поверхностей зубьев для лучшей сцепляемости покрытия с инструментальным материалом. Операция производится на специальных автоматизированных струйных установках. После струйной обработки червячные фрезы, как правило, попадают непосредственно на операцию нанесения покрытия. В отдельных случаях они могут проходить через специализированную мойку, однако, при нормальной струйной обработке это не требуется (в этом заключается основное отличие нанесения покрытий на червячные фрезы от нанесения покрытий на большинство других инструментов, когда мойка является обязательным этапом). Червячные фрезы загружаются в камеру нанесения покрытия в вертикальном положении на поворотные стойки (рис. 1, в начале статьи). После завершения цикла нанесения покрытия осуществляется контроль покрытия. Поскольку контролировать саму фрезу достаточно затруднительно из-за её сложной формы, в камеру нанесения покрытия помещается небольшой образец («свидетель») из того же инструментального материала, что и червячная фреза. На образец наносится такое же покрытие, как и на фрезу и на нем оно и контролируется. Для этого в серийном производстве применяется прибор, называемый калотестер (рис. 7).



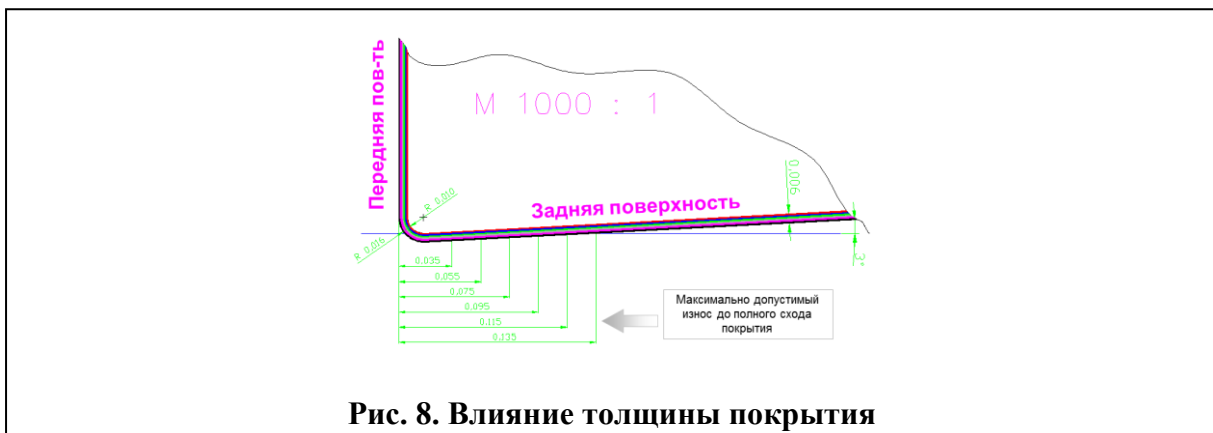


**Рис. 7. Колотестер и схема его использования**

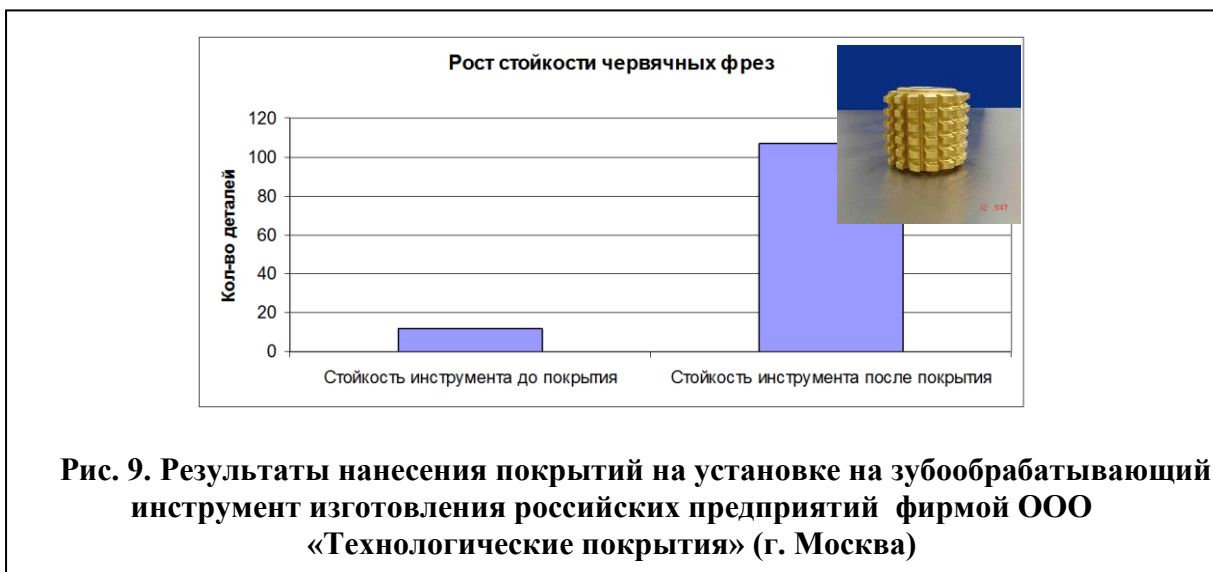
На поверхности образца с помощью вращающегося шарика с нанесенной на него абразивной пастой делается лунка, которая потом измеряется на микроскопе. Зная диаметр шарика, которым была сделана лунка, можно пересчитать диаметр получившегося «отпечатка» в толщину покрытия. Технология нанесения износостойкого покрытия в процессе восстановления режущих свойств инструмента отличается от рассмотренной выше технологии нанесения покрытия на новые фрезы только подготовительными операциями. Сначала надо решить, будет ли восстанавливаться износостойкое покрытие. В некоторых случаях покрытие не наносится заново, фрезы просто перетачиваются по передней поверхности и с них снимаются заусенцы. Это происходит в том случае, когда фреза работает на низких скоростях резания и не требуется обязательного наличия покрытия на передней поверхности для защиты от луночного износа. В этом случае переточка фрезы осуществляется «по покрытию», что снижает стойкость шлифовальных кругов. Если необходимо восстановить износостойкое покрытие и на задней и на передней поверхностях инструмента, то первой операцией является удаление старого покрытия. Покрытия удаляются химическим способом (растворяются) в специально подобранных растворах и условия удаления покрытия очень сильно различаются в зависимости от вида покрытия и технологии его нанесения. Например, для удаления хромового покрытия требуется электролитический процесс. Особенно осторожно надо удалять покрытия с твердого сплава, так как при неправильно подобранном химическом составе раствора или несоблюдении технологии из поверхностного слоя твердого сплава «вымывается» кобальт, что приводит к уменьшению вязкости твердого сплава. После удаления покрытия червячные фрезы проходят операцию струйной очистки и поступают на заточку. Заточенная червячная фреза должна обязательно пройти процедуру струйной обработки для удаления заусенцев и

подготовки поверхности под последующее нанесение покрытия. С этого момента процесс нанесения покрытия на восстанавливаемые фрезы полностью совпадает с процессом покрытия новых фрез, рассмотренным выше.

Кроме правильного выбора износостойкого покрытия так же имеет их толщина (рис. 8). Покрытие толщиной больше 6 мкм может привести к искажению профиля. Для чистовых операций лучше наносить покрытие толщиной около 3 мкм. Покрытие толщиной 6 мкм на фрезе с задним углом  $3^\circ$  допускает теоретический износ режущих кромок 0,14 мм. При увеличении износа происходит прорыв покрытия и видна основа.



**Рис. 8. Влияние толщины покрытия**



**Рис. 9. Результаты нанесения покрытий на установку на зубообрабатывающий инструмент изготовлений российских предприятий фирмой ООО «Технологические покрытия» (г. Москва)**

В результате применения износостойких покрытий мы достигаем:

- снижение коэффициента трения между режущей кромкой и обрабатываемым материалом;
- снижение температуры в зоне резания;
- уменьшение диффузии.

#### Список литературы

1. Локтев Д.А. \ Стружка, №4(19) 2007г.