

Инструмент, порошки, пасты

УДК 621.9:621.923

**В. И. Лавриненко, М. Н. Шейко, Е. В. Дабижа,
И. В. Бондарь, П. И. Бологов, А. Г. Лубнин** (г. Киев)

Влияние ионно-плазменных покрытий на эксплуатационные свойства алмазного правящего инструмента

Исследовано влияние ионно-плазменных покрытий на эксплуатационные свойства алмазного правящего инструмента в условиях алмазно-абразивной обработки. Показано, что перспективным способом повышения эффективности правящего инструмента, изготовленного методами гальваностегии и гальванопластики, является применение толстых износостойких покрытий из нитрида и карбида титана с компенсирующими прослойками из пластичного металла (кобальта).

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия, алмазный слой, правящий инструмент, карбид титана, нитрид титана, кобальт.

Инструменты с покрытиями нашли широкое применение в металлообрабатывающем производстве, с их помощью повышена производительность обработки, получены высокие точностные характеристики обработанных деталей, расширены области технологического применения инструмента, увеличилась его износостойкость и надежность [1]. В то же время, практически все разработки в этом направлении выполнены для режущих инструментов (резцов, сверл, фрез и сменных многогранных пластин). Вместе с тем, известны разработки по нанесению покрытий на абразивный инструмент, позволившие повысить коэффициент шлифования от полутора до двух раз [2]. В [3] показано, что наличие специальных пленок на рабочей поверхности алмазного круга может существенно изменить его эксплуатационные характеристики. Поэтому, по мнению авторов, исследование способов нанесения покрытий на алмазный инструмент позволит выявить новые возможности повышения эффективности его использования в производстве.

В современном производстве широко применяют различные методы нанесения покрытий на инструмент в зависимости от его функционального назначения и особенностей самого производства. Данные покрытия имеют зернистость от 40 до 80 мкм и микротвердость 13—14 ГПа, что позволяет использовать их в качестве износостойких покрытий на режущем инструменте [4—

6]. Для упрочнения штампов эффективны детонационные твердосплавные покрытия VN20. Высокой работоспособностью обладает деформирующий инструмент с такими покрытиями [5]. Однако, несмотря на преимущества в свойствах наносимых покрытий, внедрение детонационного метода осуществляется медленно, не в последнюю очередь, из-за высокого (от 120 до 145 дБ) уровня шума при их нанесении [5].

В значительной мере этого можно избежать, используя метод конденсации вещества в вакууме при ионной бомбардировке [7], который дает возможность наносить однослойные и многослойные покрытия сложного состава на основе нитридов и карбонитридов титана. При этом нижний слой покрытия, непосредственно примыкающий к алмазосодержащему слою, осаждается при высокой температуре конденсации, что обеспечивает высокую адгезию, верхний слой — при возможно меньшей температуре, это позволяет получить высокую твердость и износостойкость покрытия. Данная технология позволяет повысить работоспособность инструмента с покрытием в 2—3 раза.

В последнее время все большее внимание исследователи обращают на ионно-плазменный метод нанесения покрытий. В [8] показано, что актуальными являются исследования по модифицированию поверхности как путем нанесения покрытий, так и обработкой рабочей поверхности инструментов, деталей машин и приборов в плазме металлов, инертных и активных газов. Например, у ОАО «АВТОВАЗ» [9] имеется положительный опыт упрочнения инструмента путем нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий. Существенное повышение качества напыляемых покрытий возможно за счет применения источника плазмы с сепарацией микрокапельной составляющей потока, при этом они формируются только из ионизированных частиц. Слои, полученные конденсацией сепарированного плазменного потока, не содержат дефектов, характерных для конденсатов, осажденных в прямом потоке, и покрытия получаются более однородными и бескапельными, что определяет высокие физико-механические свойства материала покрытия. Исследование бескапельных покрытий на основе TiN показало, что их микротвердость в 1,5 раза выше, чем у покрытия, полученного без сепарации плазменного потока. Причем, наряду с высокой твердостью покрытия, они обладают и высокой пластичностью. По данным [9] для сепарированного покрытия характерна плотная мелкодисперсная структура со столбчатыми кристаллитами размером 80—200 нм.

В отличие от большого количества работ по применению ионно-плазменного метода нанесения покрытий на режущие инструменты недостаточно данных о таких покрытиях на абразивных инструментах [2, 10]. Так, авторами [10] проведены исследования нанесенных методом CVD алмазных покрытий толщиной 0,3—8,0 мкм на круги формы 1A1 и 6A2 диаметром 80 и 125 мм соответственно и их испытание при финишном шлифовании стекла — достигнута шероховатость $Ra = 5$ нм.

Целью настоящей работы было исследование влияния ионно-плазменных покрытий на стойкость алмазного инструмента в условиях алмазно-абразивной обработки.

Возможны два варианта улучшения эксплуатационных свойств абразивного инструмента при нанесении покрытий на его поверхность: снижение коэффициента трения в процессе эксплуатации («мягкие» покрытия) [2] или повышение твердости поверхности («твердые» покрытия) [10]. Авторы исследовали эффективность различных покрытий для правящего инструмента

— правящих карандашей типа “Славутич” (рис. 1, табл. 1). Нанесение покрытий на различные образцы инструментов осуществляли на установке типа ВУ-2МБС, модернизированной для решения поставленных задач. Эксперименты проводили на испытательном стенде на базе круглошлифовального станка мод. 3Е171ВФ. Правке подвергали абразивный круг 1 600×35×305 25А 25Н СМ2 7 К6. Режимы правки: скорость вращения круга $v_{кр} = 35$ м/с, продольная подача $S_{пр} = 1$ м/мин, поперечная подача $S_{п} = 0,02$ мм.



Рис. 1. Правящий карандаш типа “Славутич” до нанесения покрытия.

Таблица 1. Результаты испытаний работоспособности алмазных правящих карандашей “Славутич”

Покрытие	Расход абразива, кг	Изменение массы образца, мг	Относительный расход рабочего слоя, мг/кг	Относительный расход алмазов, мг/кг
Без покрытия	0,703	27,5	39,12	2,93
Cu (1,5 ч)	0,327	17,0	51,99	3,90
Cu и обработка поверхности ионами:				
Cu ⁺ (1,5 ч)	0,350	14,8	45,32	3,40
Cu ⁺ и N ⁺ (1,5 ч)	0,341	15,3	44,87	3,37
Cu, N и обработка поверхности ионами:				
Cu ⁺ и N ⁺ (1,5 ч)	0,333	27,0	81,08	6,08
Cu ⁺ и Ti ⁺ (1,5 ч)	0,282	17,0	60,28	4,52
Cu, Ti и обработка поверхности ионами:				
Cu ⁺ и Ti ⁺ (1,5 ч)	0,246	76,0	308,94	23,17
Cu и TiN/Co (10:1) (1,5 ч)	0,346	8,5	24,57	1,84
TiN/Co	0,651	15,7	24,12	1,81
TiC/Co	0,705	10,7	15,18	1,13

Из результатов, приведенных в табл. 1, следует, что нанесение медных покрытий различных модификаций (с обработкой ионами Cu⁺ и N⁺, Cu⁺ и Ti⁺, N⁺) не улучшает эксплуатационные свойства правящих карандашей. Только в одном случае, при нанесении покрытий из меди и нитрида титана с кобальтом, износостойкость карандашей увеличилась в 1,6 раза. То есть позитивную роль покрытий следует искать в нанесении не “мягких” покрытий, а “твердых”.

Исследования показали, что более эффективными являются покрытия из тугоплавких соединений переходных металлов, в частности, карбида и нитрида титана (см. табл. 1).

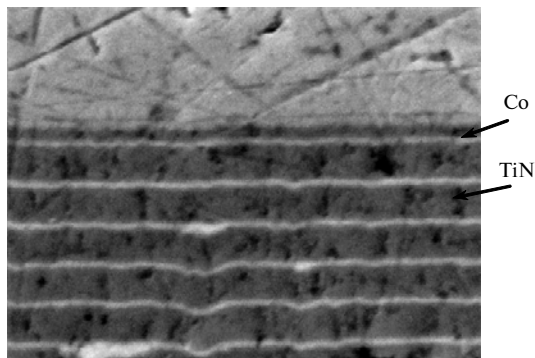


Рис. 2. Многослойное покрытие на основе нитрида титана с прослойками из кобальта.

Известно, что эксплуатационные свойства инструмента улучшаются при нанесении не одного слоя покрытия, а нескольких [1, 11, 12].

Нанесение многослойных покрытий на различные образцы инструментов осуществляли на указанной выше установке типа ВУ-2МБС, которая была оснащена двумя дуготронами для поочередного или одновременного микродугового вакуумного ионно-плазменного

испарения двух материалов. Они позволяют проводить процессы при более высоком токе дуги и, таким образом, интенсифицировать процесс напыления.

Установлено, что для синтеза покрытия из TiN достаточной является температура подложки 300 °С, а для покрытия из TiC — 400 °С. При данных температурах в покрытиях отсутствует остаточный титан. Поэтому при осаждении многослойных покрытий на основе карбида или нитрида титана подложку предварительно нагревали до температуры 400±10 °С, которую поддерживали в процессе формирования всего многослойного покрытия. Известно [13], что величина внутренних напряжений в формируемом слое увеличивается с ростом его толщины и несколько больше у покрытий из нитрида титана, чем у карбида титана, а соответственно, и значение критической толщины однослойного покрытия у нитрида титана ниже. Это учитывали при формировании многослойных покрытий из этих материалов с мягкой прослойкой между слоями — расчетная критическая толщина слоев у многослойного покрытия из TiC составляла 3,5 мкм, а из TiN — 1,5 мкм.

В качестве мягкой прослойки использовали тонкий слой покрытия из кобальта. При толщине прослойки 0,1 мкм критическая толщина многослойного покрытия на основе TiN составляла около 10 мкм. При больших значениях толщины покрытие после остывания в течение одного часа полностью разрушалось. Для толщины прослойки 0,2 мкм критическая толщина многослойного покрытия составляла ~ 12 мкм, и при толщине прослойки 0,27 мкм — ~ 15 мкм. Структура многослойного покрытия из нитрида титана представлена на рис. 2.

Эксплуатационные свойства правящих карандашей при нанесении на их поверхность многослойных покрытий TiN/Co и TiC/Co улучшаются, оба покрытия способствуют повышению износостойкости многослойного правящего инструмента (см. табл. 1).

Поскольку в промышленности широко применяют прецизионные правящие ролики, относящиеся преимущественно к однослойному правящему инструменту, то исследовали также влияние многослойных ионно-плазменных покрытий TiC/Co и TiN/Co на работоспособность однослойных правящих инструментов, полученных гальваническим методом.

В правящем инструменте износ рабочей поверхности происходит вследствие абразивного износа самих режущих элементов (алмазных зерен) и вырывания алмазных зерен из связки. Анализ характера износа рабочей поверхности алмазных правящих роликов и брусков показал, что, в ряде случаев, второй механизм превалирует над первым. Это происходит за счет гидроабра-

живного вымывания связки вокруг зерна. Величина заделки зерна в связке уменьшается, прочность удержания ослабевает. Параметр, количественно характеризующий вымывание связки (и, как следствие, вылет зерна над связкой) и прочность его удержания, — это удельный объем межзеренного пространства ω , $\text{мм}^3/\text{мм}^2$. Его величина стремится к своему пределу ω_{max} , зависящему от режимов резания, а скорость роста, кроме прочего, определяется твердостью связки в месте заделки зерна. Чем выше твердость, тем меньше величина ω , достигаемая за некоторый промежуток времени.

Была выдвинута гипотеза о механизме снижения расхода алмазов в правящем инструменте, согласно которой ионно-плазменное покрытие, повышая твердость и износостойкость поверхности никелевой связки, замедляет темпы гидроабразивного вымывания связки и, следовательно, интенсивность вырывания наиболее нагруженных и выступающих зерен.

Для подтверждения данной гипотезы для однослойного правящего инструмента, изготовленного методом гальваностегии, были проведены аналогичные исследования влияния толстых покрытий из TiN и TiC с тонкими прослойками Co на его износостойкость. Исследования проводили по методике, изложенной выше для многослойного правящего инструмента, на специальном стенде, созданном на базе круглошлифовального станка мод. 3Б151. Правке подвергали абразивный круг 1 600×63×305 14А 40П СМ2 7 К6. Режимы правки: $v_{\text{кр}} = 35$ м/с, $S_{\text{пр}} = 1$ м/мин, $S_{\text{п}} = 0,02$ мм.

Исследуемые образцы были изготовлены в виде правящих карандашей, на рабочей поверхности которых методом гальваностегии были закреплены по пять кристаллов из одной партии синтетических алмазов марки АС160Т зернистостью 630/500 с общей массой 2,7 мг (рис. 3).



Рис. 3. Однослойные правящие карандаши до нанесения покрытий.

Образцы заращивали гальваническим никелем в одинаковых условиях, на одинаковых режимах попарно. Было выделено три группы образцов: без покрытия, с ионно-плазменным покрытием TiC/Co и TiN/Co толщиной 10 ± 1 мкм. Испытания проводили методом правки абразивного круга до полного износа алмазов (табл. 2).

Таблица 2. Результаты испытаний работоспособности однослойных алмазных правящих карандашей

Покрытие	Расход абразива, кг	Изменение массы образца, мг	Относительный расход алмазов, мг/кг
Без покрытия	0,506	2,7	5,34
TiC/Co	1,185	2,7	2,29
TiN/Co	0,908	2,7	2,97

Установлено (см. табл. 2), что нанесение многослойных покрытий из TiN с компенсирующими прослойками из пластичного металла (Co) повышает

работоспособность однослойного правящего инструмента в 1,8 раза, а покрытие из TiC — в 2,3 раза. Это близко к данным табл. 1, в соответствии с которыми покрытие из TiN на многослойном правящем инструменте позволяет повысить износостойкость в 1,6 раза, а покрытие из TiC — в 2,6 раза.

Таким образом, применение толстых износостойких покрытий из TiN, а особенно из TiC (см. табл. 2), с компенсирующими прослойками из пластичного металла (Co) на однослойном инструменте, изготовленном методом гальваностегии, является перспективным методом повышения эффективности такого инструмента.

Целью следующего этапа исследований было нанесение ионно-плазменного покрытия TiN/Co на рабочую поверхность алмазного правящего инструмента (брусков), изготовленного методом гальванопластики. В данном случае для покрытия был выбран нитрид титана, поскольку оптимальная температура подложки при нанесении этого покрытия ниже, чем при нанесении карбида титана (см. выше). Экспериментальный правящий брусок (рис. 4) был изготовлен по особой технологии с осаждением толстого слоя никеля, что позволило исключить необходимость укрепления оболочечной конструкции заливкой сплава Вуда, температура плавления которого ниже технологической температуры нанесения ионно-плазменного покрытия. Брусок был изготовлен многодорожечным (см. рис. 4), поэтому можно было наносить покрытие на две дорожки, а оставшиеся две оставлять контрольными, и с одной установки в одинаковых условиях, на одинаковых режимах производить правку абразивных кругов (брусок устанавливали поперек направления обработки) и наблюдать за состоянием защищенной и не защищенной рабочих поверхностей. Покрытие было нанесено на стадии, когда рабочая поверхность достаточно вскрыта. Таким образом, была защищена поверхность межзеренных карманов, что должно замедлить темп их дальнейшего расширения.

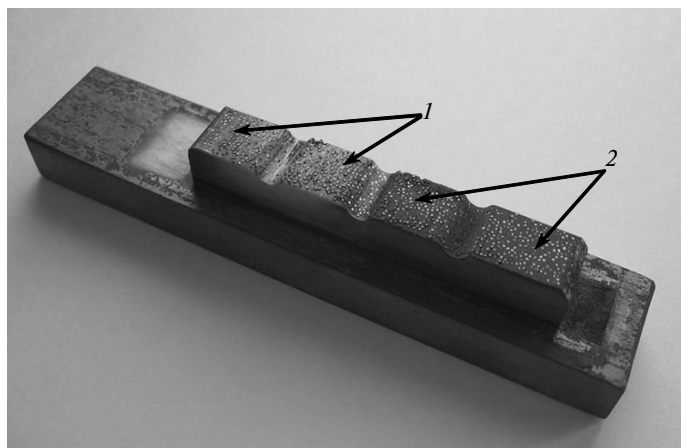


Рис. 4. Экспериментальный правящий брусок, изготовленный методом гальванопластики: 1 — контрольная поверхность без покрытия; 2 — с покрытием.

Характеристика алмазных зерен в рабочем слое правящего бруска: марка — AC125T, зернистость — 500/400. Правку проводили на плоскошлифовальном станке мод. ЗЕ721ВС, на столе которого устанавливали брусок. Режим правки: подача на глубину $t_0 = 0,001$ мм/ход, $S_{np} = 22,5$ м/мин, $v_{кр} = 30$ м/с, соотношение скоростей относительного перемещения поверхностей абразивного круга и правящего бруска — 80. Правку осуществляли с охлаждением

10 %-ным содовым раствором. Рабочую поверхность бруска (как защищенную, так и контрольную) исследовали с периодичностью через 20 000 циклов хода стола станка. Измерения объемов межзеренных карманов выполняли по методике [14]. Результаты измерений отражены на рис. 5. Видно, что интенсивность роста объема карманов для защищенных ионно-плазменным покрытием поверхностей уменьшилась, что является положительным фактором и подтверждает изложенные нами ранее данные по эффективному использованию ионно-плазменных покрытий на правящих карандашах.

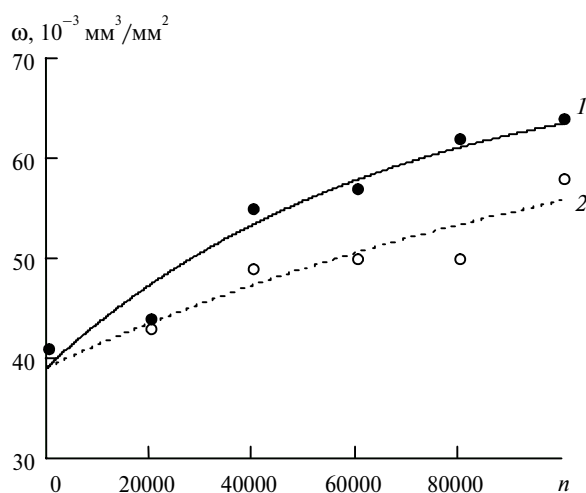


Рис. 5. Динамика роста объема межзеренных карманов: 1 — контрольная рабочая поверхность; 2 — защищенная ионно-плазменным покрытием.

Выводы

Нанесение медных покрытий различных модификаций (с обработкой ионами Cu^+ и N^+ , Cu^+ и Ti^+ , N^+) не улучшило эксплуатационные свойства правящих карандашей. Только при нанесении меди и нитрида титана с кобальтом отмечено положительное влияние такого покрытия — износостойкость карандашей увеличилась в 1,6 раза. Это свидетельствует о том, что позитивную роль покрытий следует искать в нанесении не “мягких” покрытий, а “твердых”.

Установлено, что нанесение многослойных покрытий из нитрида титана с компенсирующими прослойками из пластичного металла (кобальта) повышает работоспособность однослойного правящего инструмента в 1,8 раза, а таких же покрытий из нитрида кремния — в 2,3 раза. Это совпадает с данными по нанесению покрытий на многослойные правящие карандаши: покрытие из нитрида титана позволяет повысить износостойкость в 1,6 раза, а из нитрида кремния — в 2,6 раза. Следовательно, применение износостойких покрытий из TiN , а особенно из TiC , с компенсирующими прослойками из пластичного металла (Co) на однослойном инструменте, изготовленном методом гальваностегии, является перспективным методом повышения эффективности такого инструмента.

Показано, что применение износостойких покрытий из TiN с компенсирующими прослойками из пластичного металла (Co) на однослойном инструменте, изготовленном методом гальванопластики (алмазные правящие бруски), позволило в значительной степени затормозить гидроабразивное вымывание никелевой связки на участках рабочего профиля инструмента.

1. *Верецака А. С., Верецака А. А.* Тенденции совершенствования и методология создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Современные проблемы в машиностроении: Сб. науч. статей / Под общ. ред. А. И. Грабченко. — Харьков: НТУ “ХПИ”, 2007. — С. 192—235.
2. *Кайдалов А. А.* Плазменная обработка режущего и абразивного инструментов для повышения их износостойкости // Инструментальный світ. — 2001. — № 12. — С. 31—33.
3. *Лаврінченко В. І.* Наукові основи шліфування інструментальних матеріалів із спрямованою зміною характеристик контактних поверхонь: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Київ: ІНМ НАН України, 2000. — 35 с.
4. *Богуслаев А. В.* Характеристика и применение напыления газотермических покрытий на деталях авиадвигателей и технологического оснащения // Сучасне машинобудування. — 2000. — № 3—4. — С. 28—33.
5. *Розенберг О. А., Царенко И. В., Цеханов Ю. А.* О работоспособности деформирующих протяжек с детонационными твердосплавными покрытиями // Повышение эффективности протягивания (качество обработки): Сб. науч. тр. — Рига, 1990. — С. 92—102.
6. *Гаранин В. М., Иваненко А. А., Клименко С. А.* Детонационное нанесение покрытий — новые возможности в восстановлении деталей // Сучасне машинобудування. — 1999. — № 2. — С. 96—99.
7. *Табакон В. П.* Механизмы упрочнения материала износостойкого покрытия и технологии их реализации // Современные технологии в машиностроении: Сб. науч. статей / Под общ. ред. А. И. Грабченко. — Харьков: НТУ “ХПИ”, 2006. — В 2 т. Т. 2. — С. 233—247.
8. *Белоус В. А.* Ионно-плазменная обработка поверхности конструкционных материалов // Оборудование и инструмент для профессионалов. — 2005. — № 12. — С. 12—16.
9. *Акифьев В. А., Полунина О. В., Солопов А. В.* Наноструктурированные бескапельные покрытия для увеличения стойкости режущего и штампового инструмента // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы VII Промышл. конф. с междунар. участием, п. Славское, Карпаты, 12—16 фев. 2007 г. — Киев: УИЦ “НТТ”, 2007. — С. 349—351.
10. *Gäbler J., Pleger S., Schäfer L.* CVD Diamond layers with a controlled roughness enable high-precision and micro grinding tools // 2nd Int. Industrial Diamond Conference, Rome, Italy, 19—20 April, 2007. — www.diamondatwork.com
11. *Костюк Г. И., Куринный А. Н.* Сравнение эффективности применения покрытия 0,8ZRN + 0,2HFN на режущих пластинах из твердых сплавов производства Сандвик Коромант, СССР и России // Современные технологии в машиностроении: Сб. науч. статей / Под общ. ред. А. И. Грабченко. — Харьков: НТУ “ХПИ”, 2007. — С. 304—316.
12. *Костюк Г. И.* Методика выбора покрытий и режущих пластин с покрытиями на основе опыта Украины и международных фирм // Современные технологии в машиностроении: Сб. науч. статей / Под общ. ред. А. И. Грабченко. — Харьков: НТУ “ХПИ”, 2006. — Т. 1. — С. 371—401.
13. *Дабижка Е. В., Новиков Н. В., Бондарь И. В. и др.* Развитие современных технологий получения вакуумных покрытий // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ НАНУ, 2005. — С. 95—107.
14. *Шейко М. Н., Мацкевич В. П., Немец В. М., Скок В. Н.* Эволюция рабочей поверхности алмазных брусков в процессе врезной правки // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць — Київ: ІНМ НАН України, 2006. — С. 118—125.

Ин-т сверхтвердых материалов
им. В. Н. Бакуля НАН Украины

Поступила 11.03.08