



УДК 621.798

*Соловых Е.К.<sup>2</sup>, Ляшенко Б.А.<sup>1</sup>, Рутковский А.В.<sup>1</sup>, Сорока Е.Б.<sup>1</sup>, Антонюк В.С.<sup>3</sup>*<sup>1</sup> Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. Украина, Киев.<sup>2</sup> Кировоградский национальный технический университет. Украина, Кировоград.<sup>3</sup> Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт". Украина, Киев

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВАКУУМ-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ДИСКРЕТНОЙ СТРУКТУРЫ

### Анотація

*Розглянуто можливості керування геометричними параметрами вакуум-плазмових покриттів дискретної структури.*

### Abstract

*There have been considered possibilities to control geometric parameters of discrete structure vacuum-plasma coating.*

### Введение

Принцип нанесения упрочняющих дискретных покрытий заключается в замене традиционного сплошного слоя на прерывистый мозаично-дискретной структуры. Этим повышается адгезионная и когезионная стойкость покрытия за счет ограничения уровня максимальных напряжений как в слое покрытия, так и в плоскости адгезионного контакта. Новый принцип позволяет многократно повысить предельное состояние покрытия: контактные нагрузки в 3..5 раз, критические деформации растяжения основы — до 2 порядков, долговечность — в несколько раз по сравнению со сплошным покрытием той же толщины, состава и твердости [1].

Размеры и конфигурация отдельных участков покрытия рассчитаны, исходя из условия минимизации уровня напряженно-деформированного состояния при механических и температурных воздействиях на покрытие. Оптимальные размеры и конфигурация дискретной структуры определяются аналитическими и численными методами с учетом остаточных технологических напряжений [2–4].

Положительный эффект при нанесении дискретных покрытий обеспечивается за счет применения гибких вакуум-плазменных технологий, особенно на режущий инструмент [1].

Статья посвящена отличительным особенностям процессов нанесения дискретных покрытий. Рассмотрены специальные приемы, обеспечивающие изменение линейных размеров и формы единичных участков покрытия, а также формирование по рабочей поверхности равнотолщинных участков и размещение их с варьируемой сплошностью.

Основное содержание и результаты работы. Для формирования топографии дискретных покрытий воспользуемся опытом электронной промышленности [5]. Для получения топографии микросхем широко применяются экраны, трафареты и маски. В машиностроении устройства данного типа применяются для нанесения покрытия слоями, толщина которых изменяется по заданному закону или для нанесения равнотолщинного покрытия на поверхность сложной кривизны [1]. Часто маски и трафареты применяются для нанесения в вакууме надписей или узоров [6].

Для формирования дискретного покрытия из единичных участков наиболее простым техническим решением является размещение сетчатого экрана между поверхностью детали и испарителем. Однако в литературе наряду с патентными источниками по технологии износостойких дискретных покрытий [1] отсутствуют подробности об особенностях применения сеток и экранов. Это обусловлено рядом причин: отсутствием необходимости в подобных исследованиях, довольно высокой температурой процесса осаждения покрытия, отсутствием исследований взаимодействия сетчатого экрана с ионным потоком и т.п.

Для осуществления процесса осаждения дискретного износостойкого покрытия на режущий инструмент в вакууме сетчатый экран должен удовлетворять следующим требованиям:

- выдерживать многократный нагрев до температуры ~500°C и выше;
- обладать формоустойчивостью без коробления на протяжении процесса напыления;
- обеспечить проницаемость испаряемого материала в течение всего технологического цикла;
- обеспечивать заданную топографию покрытия.

Наиболее полно этим требованиям отвечают сетчатые экраны, изготовленные из стальных тканых сеток. Основными их геометрическими параметрами являются размер квадратной ячейки в свету и диаметр проволоки, из которой изготовлена сетка.

Измерения показывают, что кривизна проволоки в тканой структуре сетки влияет на геометрические размеры единичного участка покрытия в

сторону их увеличения. При плотном прижатии сетки к поверхности детали профиль поперечного сечения должен представлять собой равнобедренную трапецию, а не прямоугольник. Высота трапеции равна толщине покрытия, короткая сторона равна размеру ячейки сетки в свету, а большая сторона, прилегающая к поверхности осаждения, имеет размер больше, чем размер ячейки сетки в свету. Увеличение размеров основания единичного участка происходит за счет эффекта "подпыления" покрытия в области тени от проволоки. Таким образом сплошность покрытия оказывается немного больше сетки, из которой изготовлен сетчатый экран.

Сплошность сетки  $\chi$  можно оценить как отношение площади ячейки сетки в свету к площади квадрата, стороны которого проходят по осевым линиям проволоки (рис. 1).

Обозначим  $K$  соотношение размеров составных элементов,

$$K = \frac{a}{d}$$

Зависимость между  $K$  и  $\chi$  для промежуточных значений сплошности сетки в интервале  $\chi = 30...70\%$  приведена на рис. 2.

Увеличение значения  $K$  приводит к нанесению покрытия на большую площадь и увеличивает значение сплошности покрытия  $\Psi$ . Проведение измерений при вакуум-плазменном осаждении покрытия TiN показало, что сплошность сетки  $\chi$

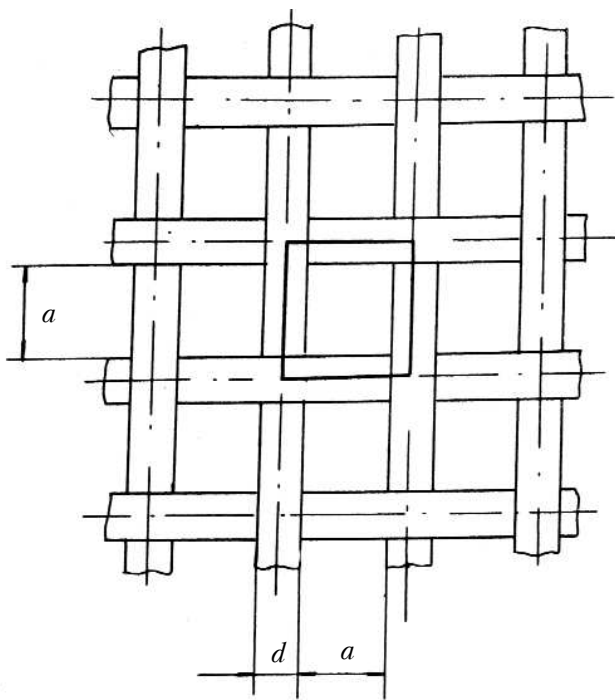


Рис. 1. Схема определения сплошности сетки-экрана:  
 $a$  — размер ячейки на просвет;  
 $d$  — диаметр проволоки

должна быть меньше заданной сплошности покрытия  $\Psi$  примерно на 10%.

Экспериментальные исследования износостойкости в зависимости от сплошности покрытия  $\Psi$  устанавливает область  $\Psi = 40...60\%$  для минимальных значений износа в условиях трения скольжения [1]. Исходя из граничных значений сплошности сетки  $\chi$  в 30% и 50%, определяем граничные значения  $K$ , которые соответственно равны 1,2 и 2,4, а затем определяем граничные размеры диаметров проволоки  $d$  в зависимости от размера ячейки в свету  $a$  (рис. 3).

Таким образом, определяем область существования размеров сеток, обеспечивающих заданные размеры единичного участка и сплошность покрытия.

Дополнительными критериями при выборе сетчатого экрана являются формоустойчивость при нагреве и технологичность изготовления.

Первоначально исследовали влияние нагрева сетчатых экранов в вакууме до температуры 450...480°C на внешний вид экрана, т.е. на сохранение им формы при нагреве. Испытания

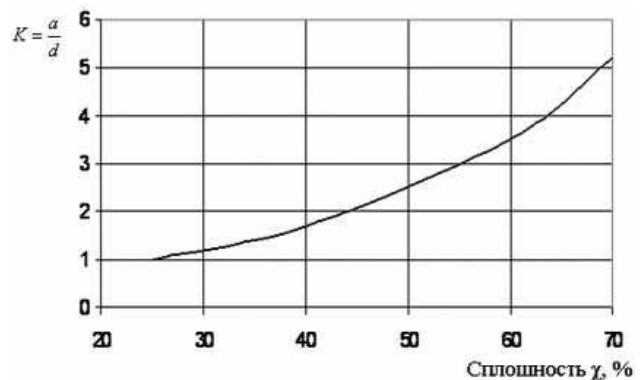


Рис. 2. Зависимость сплошности  $\chi$  от соотношения размеров составных элементов  $K$

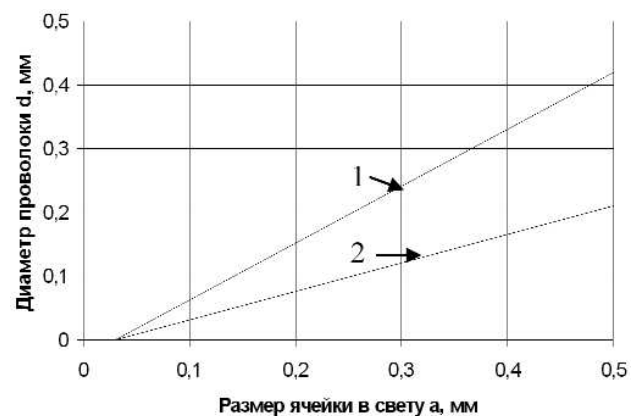


Рис. 3. Номограммы для выбора сеток требуемой сплошности:  
 1 —  $\chi = 30\%$ ; 2 —  $\chi = 50\%$

проходили сетчатые экраны как плоской, так и цилиндрической формы, изготовленные из стальных сеток с размерами ячеек в свету 0,1 мм, 0,2 мм и 0,4 мм. Испытания показали, что сетчатые экраны, изготовленные из сетки  $a = 0,1$  мм при нагреве в вакууме до указанной температуры теряют форму, провисают и сплющиваются. Экраны, изготовленные из сеток с  $a = 0,2$  и  $a = 0,4$  мм, прошли данное испытание удовлетворительно, хотя на экранах, изготовленных из сетки  $a = 0,4$  мм, отмечено смещение проволок от первоначального положения, т.е. изменение размеров ячеек.

При исследовании технологичности изготовления сетчатых экранов из сеток установлено, что изготовление экрана из сетки  $a = 0,1$  мм связано с трудностями из-за непрочности сетки и склонности ее к перекашиванию при натяжении во время изготовления плоских экранов. Изготовление экранов из сетки  $a = 0,4$  мм связано с трудностями противоположного характера, а именно, из-за большой жесткости проволоки возникали сложности при изготовлении цилиндрических экранов. Сетка с  $a = 0,2$  мм удовлетворительно зарекомендовала себя как при изготовлении плоских экранов, так и при изготовлении цилиндрических экранов.

Поэтому для изготовления экранов была выбрана тканая сетка 020 по ТУ 14-4-507-74 с размерами квадратной ячейки в свету  $0,2 \times 0,2$  мм. Сетка изготавливается из стальной проволоки марки 03X18H9T-ВИ (X18H0T-ВИ) или 03X18H10T-ВИ (X18H10T-ВИ) с химическим составом и техническими требованиями по ТУ 14-1-1-1702-76. Диаметр проволоки  $d = 0,13$  мм, сплошность сетки  $\chi = 36,7\%$ .

Однако главным критерием при выборе параметров сетчатого экрана остается их соответствие

расчетным значениям оптимальных размеров отдельного участка покрытия, определенным из условия минимизации напряженно-деформированного состояния при воздействии эксплуатационных факторов [2-4]. Поэтому выбор сетки для экрана представляет собой инженерный компромисс.

Напряженно-деформированное состояние отдельного участка дискретного покрытия существенно зависит от формы его кромочной зоны. Особенно влияет форма кромки на распределение касательных напряжений в плоскости адгезионного контакта. На рис. 4 приведена зависимость максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$  в плоскости адгезионного контакта от угла притупления кромки  $\theta$ .

Зависимость получена численным методом при температурном воздействии [4]. Как следует из рис. 4, притуплением кромки можно существенно снизить напряжения в плоскости адгезионного контакта. Целесообразно притупление кромки на угол  $\theta \geq 60^\circ$ , что позволит снизить напряжения в плоскости адгезионного контакта соответственно не менее, чем на 30%.

Поэтому форму кромки отдельного участка при вакуум-плазменном нанесении наиболее доступно и технологически просто регулировать изменением положения сетчатого экрана относительно поверхности детали. Изменение формы профиля единичного участка в зависимости от расстояния между поверхностью детали и сетчатым экраном исследовали экспериментально.

Суть эксперимента заключалась в одновременном нанесении покрытия из TiN на образцы, расположенные в центре пучка над испарителем с изменяемым зазором  $h$  между экраном и образцами (рис. 5).

Образцы 1 из сталей 12X18H10T и P6M5 размерами  $20 \times 10 \times 5$  мм нумеровались и закреплялись в кассете 2, которая имела ступенчатый профиль. Таким образом, при фиксировании положения сетчатого экрана 3 относительно кассеты 2 каждый образец находился на различном расстоянии  $h$  от экрана 3. Положение экрана 3 фиксировано на расстоянии 100 мм от испарителя 4.

Эксперимент проведен на установке типа ЭПН-3, реализующей технологию реактивного электронного потока [7], что обеспечивало более стабильное поддержание температуры образцов при умеренных скоростях осаждения покрытия.

Внешний вид покрытия оценивался визуально по характеру отраженного света от дискретного покрытия. Одноцветное отражение свидетельствовало об образовании перемычек между отдельными участками.

Профиль поперечного сечения единичного участка определялся металлографическими исследова-

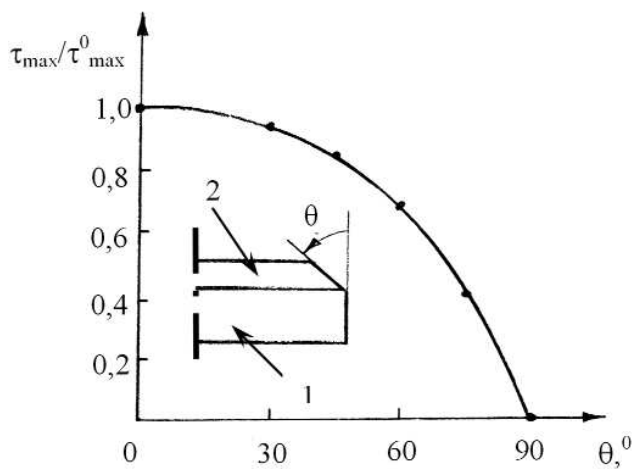
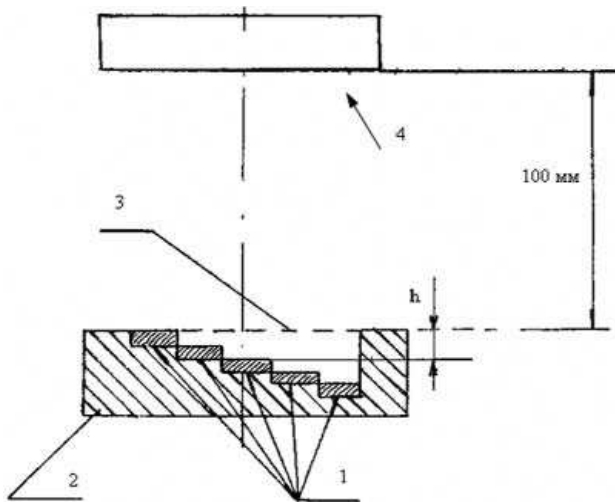


Рис. 4. Зависимость максимального касательного напряжения в плоскости адгезионного контакта от угла притупления кромки  $\theta$ .  
1 – основа; 2 – покрытие



**Рис. 5.** Схема эксперимента по изучению влияния величины зазора на профиль дискретного участка покрытия:

1 – образцы; 2 – кассета; 3 – сетчатый экран;  
4 – испаритель

дованиями на микроскопе МИМ-8. Для этого изготавливались стандартные поперечные шлифы. Плоскость шлифа проходила по середине единичного участка.

Анализ показывает, что несплошность покрытия сохраняется при зазоре  $h=2$  мм и наблюдается при зазорах 3 и 4 мм. Однако при зазорах 3 и 4 мм отдельные участки четко не просматриваются, что свидетельствует об образовании между ними перемычек. В этом случае можно говорить об образовании сплошного покрытия с рельефной поверхностью регулярной переменной толщины. Поэтому для метода реактивного электронного потока (РЭП) максимальный зазор для нанесения дискретного покрытия составляет 2 мм.

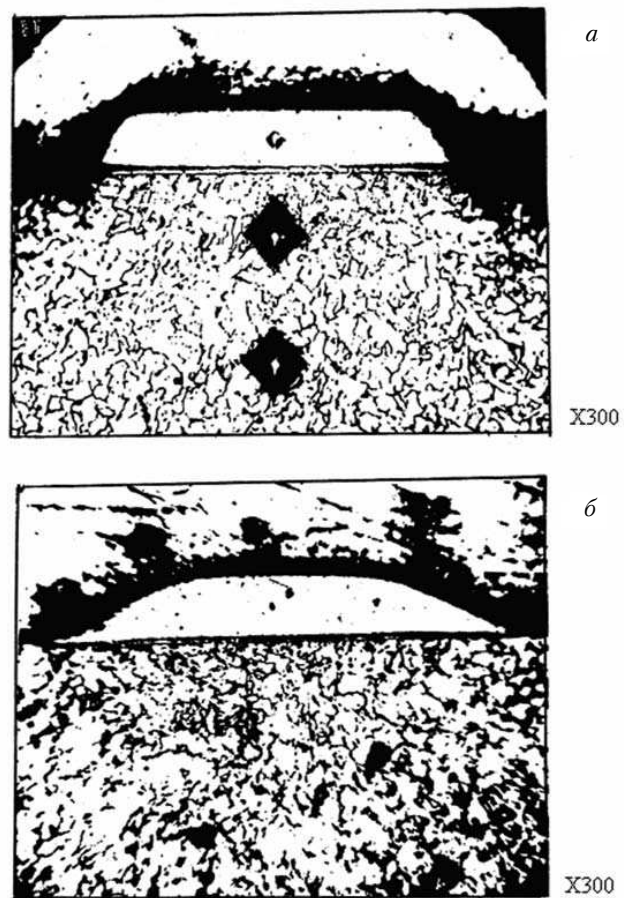
При нанесении покрытия магнетронным распылением дискретность покрытия сохраняется только при плотном прижатии сетчатого экрана к поверхности детали, т.е. зазор равен нулю. Исчезновение дискретности покрытия при удалении экрана можно объяснить более высоким рабочим давлением в вакуумной камере и степенью ионизации плазменного потока. Для магнетронного распыления они выше, чем для метода РЭП и составляют порядка  $10^{-2}$  мм рт. ст. Более высокое давление в вакуумной камере снижает длину свободного пробега молекул, а более высокая степень ионизации приводит к осаждению покрытия на затененной экраном части поверхности подложки.

Из сравнения этих двух методов следует, что при магнетронном нанесении дискретного покрытия требуется изготовление сетчатых экранов для каждого размера детали, а при нанесении методом РЭП можно использовать одни и те же сетчатые экраны для нескольких размеров деталей. Следовательно, возможности нанесения дискретного

покрытия на режущий инструмент у метода РЭП гораздо шире.

В промышленной практике из вакуум-плазменных технологий наиболее распространен метод конденсации ионной бомбардировки (КИБ). Оборудование типа "Булат" целесообразно использовать для нанесения дискретных покрытий на твердосплавный инструмент, а также на крупногабаритные (диаметр  $D>10$  мм) изделия из быстрорежущих сталей. Для мелкогабаритных ( $D<10$  мм) определяющей является точность регулирования и контроль температуры. Поэтому для упрочнения мелкогабаритных деталей следует применять магнетронное распыление или РЭП [7].

Металлографические исследования подтвердили возможность управления формой профиля единичного участка путем перемещения сетчатого экрана по нормали к поверхности подложки. На рис. 6, а видно, что при плотном прижатии сетчатого экрана к поверхности подложки ( $h=0$ ) единичный участок в сечении имеет трапециевидную форму. Увеличение зазора  $h$  до 2 мм преобразует трапециевидную форму в эллипсоидную при плавном сопряжении с поверхностью подложки (рис. 6, б).



**Рис. 6.** Поперечное сечение продольной оси дискретного участка покрытия:  
а – зазор  $h = 0$  мм; б – зазор  $h = 2$  мм

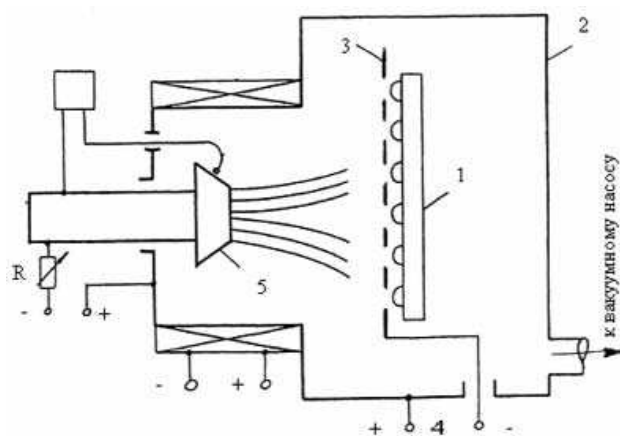
Этот эффект, как уже объяснялось выше, получается за счет "подпыления" на затененную экраном часть подложки.

В мировой практике инструментальных материалов широкое распространение получила керамика, особенно на основе нитрида кремния и кубического нитрида бора. Актуальна также разработка технологий нанесения покрытий на эти материалы. Однако использование вакуум-плазменных методов для нанесения покрытий на неэлектропроводную керамику представляет трудности.

Поэтому был использован технологический прием создания "начальной" электропроводности керамики. При производстве режущих пластин на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ввели 30 мас. % компактного материала TiN. Это обеспечило снижение электросопротивления  $\rho_1 = 3,6 \cdot 10^{13}$  Ом·см для  $\text{Si}_3\text{N}_4$  до  $\rho_2 = 9,4 \cdot 10^{-2}$  Ом·см для смеси  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{TiN}$ . Этого оказалось достаточно для протекания ионного тока осаждения при использовании метода КИБ при подаче разгонного напряжения к керамической детали [8].

Применить прием изменения химсостава основы для "стартовой" электропроводности не всегда возможно, например для режущих пластин из неэлектропроводного кубического нитрида бора. Для нанесения дискретных покрытий в этом случае применяем экран-маску, на которую подается повышенный разгонный потенциал [9]. Схема расположения экрана приведена на рис. 7.

Керамическая пластина 1 помещена в камеру 2 вакуум-плазменной установки. Сетчатый экран 3 устанавливается на расстоянии 0,1–1,0 его толщины от поверхности керамической пластины 1. На экран 3 от источника постоянного тока 4 подается негативный разгонный потенциал. Величина его составляет 1,1–1,2 от напряжения,



**Рис. 7.** Схема расположения экрана:

- 1 – керамическая пластина; 2 – вакуумная камера;  
3 – формообразующий экран; 4 – источник разгонного напряжения; 5 – испаритель

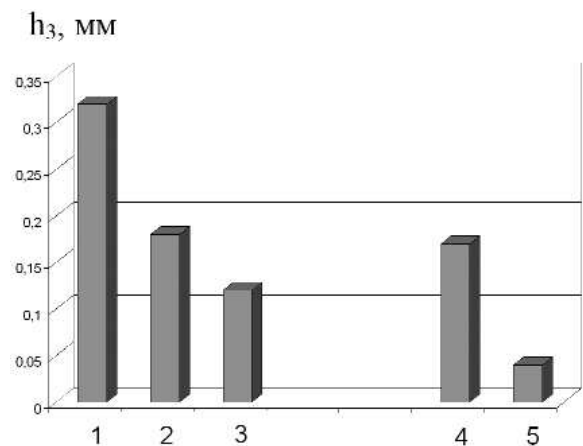
необходимого для нанесения традиционного сплошного покрытия на электропроводные материалы.

Увеличенный разгонный потенциал на экране 3 повышает кинетическую энергию ионизированного потока, который с высокой скоростью пролетает сквозь отверстия в сетчатом экране 3 и осаждается на детали 1. Плотность ионизированного потока в промежутке между экраном 3 и керамической основой 1 настолько высока, что не возникает "запорного" слоя на обрабатываемой поверхности диэлектрического материала. Таким образом экран 3 является формообразующим элементом дискретного покрытия и одновременно замыкает ионизированный поток, образованный испарителем 5. Остальные элементы, приведенные на рис. 7, относятся к стандартным узлам вакуум-плазменного оборудования.

Разработана также технология вакуум-плазменного нанесения дискретных покрытий при использовании сетчатого экрана, изготовленного из пасты [10]. В составе пасты содержится экранирующее и активное вещество. Паста в виде сетки наносится на подложку перед осаждением покрытия. Нанесение производят ротационным методом.

Затраты на экраны и технологическую оснастку окупаются повышением служебных свойств дискретных покрытий. На рис. 8 приведены сравнительные результаты износостойкости керамического режущего инструмента на базе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  со сплошными и дискретными покрытиями при чистовом точении закаленных сталей ХВГ и ШХ-15 (HRC 62...64).

Таким образом, дискретная структура покрытия снижает износ инструмента на 35...80%.



**Рис. 8.** Зависимость износа резцов  $h_3$  по задней грани: 1 – резец без покрытия; 2 – сплошное покрытие CrN+(Cr, Zr)N; 3 – дискретное покрытие CrN+(Cr, Zr)N; 4 – сплошное покрытие (Al, Cr)N; 5 – дискретное покрытие (Al, Cr)N. Скорость точения  $v = 130$  м/мин, подача  $S = 0,1$  мм/об, глубина резания  $t = 0,25$  мм, время точения  $T = 25$  мин

### Выводы

Для нанесения покрытий дискретной структуры вакуум-плазменным методом используют экраны, изготовленные из металлической сетки. Геометрические параметры сеток выбирают из расчетных значений размера дискретного участка и сплошности, обеспечивающих минимальный уровень напряженно-деформированного состояния покрытия в условиях эксплуатации. Расстояние между экраном и деталью определяет форму кромки отдельного дискретного участка. Одним из технологических вариантов изготовления сетчатого экрана может быть нанесение защитной пасты на поверхность детали.

### Литература

1. Б.А. Ляшенко, А.Я. Мовшович, А.И. Долматов. Упрочняющие покрытия дискретной структуры // Технологические системы. — 2001, №4(10). — С. 17–25.
2. Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский, Е.Б. Сорока. О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях // Проблемы прочности. — 2001, № 4. — С. 62–68.
3. Б.А. Ляшенко, Е.Б. Сорока, А.В. Рутковский. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // Проблемы прочности. — 2002, № 4. — С. 119–125.
4. Б.А. Ляшенко, В.С. Антонюк, Е.Б. Сорока. Расчет параметров дискретной структуры покрытий на режущем инструменте и деталях машин // Вестник Полоцкого гос. Университета, серия В. — 2005. — С. 44–46.
5. З.Ю. Готра. Технология микроэлектронных устройств // М.: Радио и связь, 1991. — 528 с.
6. О.Н. Hoffman, F. Stark. Maskenanordnung insbesondere fuer Vakuumbeschichtungsvorrichtungen / Pat BRD 3008825, С 23 С 13/08, опубл. 17.09.81.
7. Н.В. Новиков, А.А. Бидный, Б.А. Ляшенко и др. Методы упрочнения поверхностей машиностроительных деталей // ИСМ АН УССР. — Киев, 1989. — 112 с.
8. А.В. Рутковский. Конструкционная прочность материалов с вакуум-плазменным покрытием // Автореф. канд. дисс., ИПП НАНУ, Киев — 2002. — 17 с.
9. Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский. PVD-покрытия дискретной структуры на режущей керамике // Вакуумные технологии и оборудование (сб. докл. 4-го Междунар. симп. "Вак. технологии и оборудование") — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2001. — С. 236–238.
10. О.В. Цыгулев, В.Г. Каплун, Б.А. Ляшенко и др. Способ нанесения износостойких покрытий в вакууме // Авт. свид. 1506932 (СССР). С 23 С 14/32, опубл. 1989, БИ № 33.