

А.Н. Михайлов, д-р техн. наук, Е.А. Михайлова, Донецк, Украина

## **ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛИРОВКИ ИЗДЕЛИЙ С ТОНКИМИ НИТРИД ТИТАНОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

*У даній роботі розглянуті особливості формування поверхневого шару вакуумних іонно-плазмових покриттів для виробів машинобудування. Установлено зв'язки між товщиною покриття й параметрами шорсткості поверхонь основи й покриття. Це дає можливість проектувати необхідну структуру операцій технологічного процесу до й після нанесення покриття на поверхні виробу, а також забезпечувати необхідні параметри якості поверхонь залежно від видів зв'язків.*

*В данной работе рассмотрены особенности формирования поверхностного слоя вакуумных ионно-плазменных покрытий для изделий машиностроения. Установлены связи между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностей основы и покрытия. Это дает возможность проектировать необходимую структуру операций технологического процесса до и после нанесения покрытия на поверхности изделия, а также обеспечивать необходимые параметры качества поверхностей в зависимости от видов связей.*

*In given work are considered particularities of the shaping surface layer physical vapor deposition coating for product of machine building. The installed relationship between thickness of the coating and parameter to roughness of the surfaces of the base and coating. This enables to design the necessary structure an operation technological process before and after the fixing of the coating on surfaces of the product, as well as provide the necessary parameters a quality surfaces depending on type of the relationships.*

### *1. Введение*

В настоящее время для повышения качества изделий машиностроения широко применяются вакуумные ионно-плазменные покрытия различного назначения [1, 2]. Эти покрытия позволяют существенно повысить эксплуатационные свойства различных изделий машиностроения. Вместе с тем для обеспечения заданных свойств изделий с вакуумными ионно-плазменными покрытиями необходима технологическая подготовка изделия к нанесению покрытия, выполнение покрытия и дальнейшая отделочная обработка поверхностного слоя изделия с покрытием. Эти вопросы не достаточно освещены в современной литературе [1, 2, 3], а также требуют уточнения и дальнейшей разработки.

Целью данной работы является повышения качества и производительности комбинированной обработки изделий с вакуумными ионно-плазменными покрытиями на основе установления связей между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностного слоя основы и покрытия, разработки прогрессивного метода полировки поверхностного слоя покрытия, а также установления рациональных припусков обработки покрытия.

В соответствии с поставленной целью в работе предполагается решить следующие задачи: определить связи между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностного слоя основы и покрытия; разработать прогрессивный метод полировки поверхностного слоя покрытия; предложить рациональный метод определения припусков при полировке поверхностного слоя изделия с тонкими покрытиями, например, на основе нитрид титана.

## *2. Связь между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностного слоя основы и тонких покрытий*

Проведенные исследования показывают [1, 2], что возможны варианты образования структуры покрытия. На параметры структуры вакуумных ионно-плазменных покрытий влияют следующие факторы:

- температура поверхности основы поверхности изделия,
- давление реакционного газа,
- ток дуги.

В целом структуру покрытия можно представить тремя вариантами (рис. 1) [3]:

- I зона, низкотемпературная, формируется при температуре поверхности основы до температуры  $T_1 = 0,35 T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  - температура плавления конденсированного вещества;

- II зона, промежуточная, формируется при температуре поверхности основы от  $T_1$  до  $T_2$ , где  $T_2 = (0,45 \dots 0,5) T_{пл}$ ;

- III зона, высокотемпературная, формируется при температуре поверхности основы выше  $T_2$ .

В I зоне, покрытие состоит из конусоподобных кристаллов, а его поверхность имеет куполоподобное строение. При этом во внутренних объемах кристаллов и особенно в их прилегающих зонах имеются микропоры.

Около II зоны происходит поступательный переход до второй зоны с ровной матовой поверхностью, при этом образующееся покрытие имеет столбчатую структуру. Особенностью структуры этого покрытия является наличие межкристаллических границ. Микропористость покрытия в этой зоне практически не наблюдается, и ширина столбчатых кристаллов растет с увеличением температуры основы изделия.

В III зоне формируется равновесная структура покрытия. Если материал покрытия склонен к полиморфному превращению, то он может дополнительно изменять структуру при этой температуре.

На рис. 1 представлены гипотетические модели вариантов особенностей параметров шероховатости поверхности основы и покрытия: рис. 1,а – до механической обработки, рис. 1,б - после механической обработки.

Можно отметить, что возможны и другие структурные варианты покрытия поверхности изделия, однако для практики целесообразно использовать три рассмотренных варианта.

Также заметим, что наиболее целесообразно наносить покрытия на поверхность изделия со структурой I и II зон. Это обусловлено тем, что структура покрытия III зоны может иметь измененную кристаллическую решетку.

Выполненные исследования позволили установить, что между толщиной покрытия, параметрами шероховатости основы поверхности изделия и параметрами шероховатости покрытия существует связь. Эта связь может быть трех видов (рис. 2).

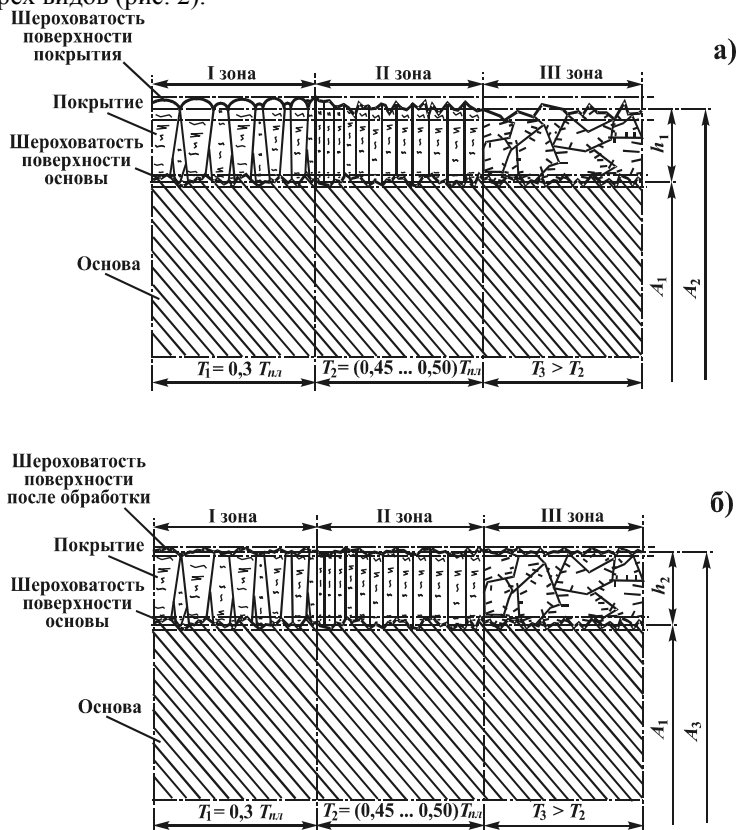


Рисунок 1 – Гипотетические модели вариантов параметров шероховатости поверхности основы и покрытия:

а – до механической обработки, б – после механической обработки

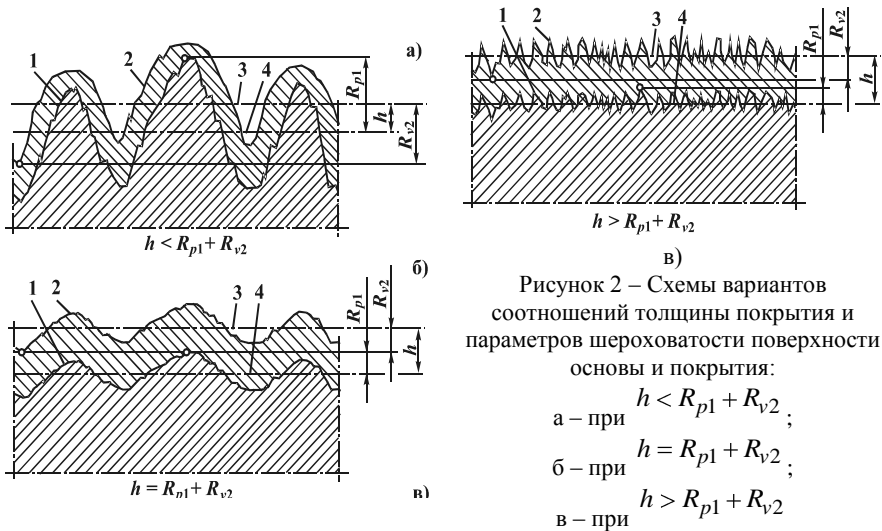


Рисунок 2 – Схемы вариантов соотношений толщины покрытия и параметров шероховатости поверхности основы и покрытия:

- а – при  $h < R_{p1} + R_{v2}$  ;
- б – при  $h = R_{p1} + R_{v2}$  ;
- в – при  $h > R_{p1} + R_{v2}$

Первый вид связей (рис. 2,а) возникает тогда, когда толщина покрытия  $h$  меньше, чем сумма высоты сглаживания профиля шероховатости  $R_{p1}$  основы и глубины сглаживания профиля шероховатости  $R_{v1}$  покрытия. Данная связь может быть представлена следующим выражением:

$$h < R_{p1} + R_{v2} ; \quad (1)$$

где  $h$  – толщина покрытия;  $R_{p1}$  – высота сглаживания профиля шероховатости основы поверхности изделия;  $R_{v2}$  – глубина сглаживания профиля шероховатости покрытия поверхности изделия.

Можно отметить, что параметры высоты сглаживания профиля шероховатости  $R_{p1}$  основы и глубины сглаживания профиля шероховатости  $R_{v1}$  покрытия определяются на основании следующих выражений:

$$R_{\max 1} = R_{p1} + R_{v1} ,$$

$$R_{\max 2} = R_{p2} + R_{v2} ;$$

где  $R_{\max 1}$  и  $R_{\max 2}$  - наибольшие высоты профилей шероховатости основы и покрытия, соответственно;  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$  - высоты сглаживания профиля шероховатости покрытия основы и покрытия, соответственно;  $R_{v1}$  и  $R_{v2}$  - глубины сглаживания профиля шероховатости покрытия основы и покрытия, соответственно.

Можно отметить, что покрытия с данным видом связи можно рекомендовать, для следующих случаев:

- для нанесения покрытия, на поверхность изделия имеющего большие параметры шероховатости, для защиты от коррозии;
- для нанесения супер тонких покрытий на поверхность изделия.

В этом случае, толщина покрытия меньше параметров шероховатости и покрытие повторяет геометрию покрытия основы.

*Второй вид связей* (рис. 2,б) возникает тогда, когда толщина покрытия  $h$  равна сумме высоты сглаживания профиля шероховатости основы  $R_{p1}$  и глубины сглаживания профиля шероховатости покрытия  $R_{v1}$ . Эта связь может быть представлена следующим выражением

$$h = R_{p1} + R_{v2}. \quad (2)$$

В этом случае толщина покрытия соизмерима с параметрами шероховатости поверхностей. Это переходные покрытия, они могут применяться как для решения вопросов коррозионной стойкости, так и для износостойкости.

*Третий вид связей* (рис. 2,в) образуется тогда, когда толщина покрытия  $h$  больше суммы высоты сглаживания профиля шероховатости основы  $R_{p1}$  и глубины сглаживания профиля шероховатости покрытия  $R_{v1}$ . Эта связь может быть представлена следующим выражением

$$h > R_{p1} + R_{v2}. \quad (3)$$

В этом случае толщина покрытия больше параметров шероховатости поверхностей. Эти покрытия могут применяться для решения вопросов повышения износостойкости.

Выполненные исследования позволили установить связи между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностей основы и покрытия.

### *3. Особенности специальной полировки изделий с тонкими покрытиями. Назначение припусков*

Полирование – обработка (отделка) материалов до получения зеркального блеска поверхности [4]. Полировка металлов производится на полировальных станках быстровращающимися мягкими кругами из фетра, сукна или войлока либо быстродвижущимися лентами, на поверхность которых нанесены шлифпорошок или полировальная паста микрошлифпорошков.

Полированием эластичными кругами получают шероховатость поверхности, находящуюся в пределах  $R_a = 0,16 \dots 0,010$  мкм. При этом предварительно обработанная поверхность должна иметь шероховатость не ниже следующих параметров  $R_a = 0,32 \dots 0,16$  мкм [5]. Количество снимаемого в процессе полирования металла составляет  $0,01 \dots 0,03$  мм,

скорость вращения полировального круга – 10 ... 40 м/с. Зернистость абразивного материала применяемого для полирования, выбирают в зависимости от вида полирования:

- для черного полирования зернистость шлифпорошка 10 ... 6 (размер зерен 100 ... 60 мкм);

- для чистового полирования зернистость шлифпорошка от 6 ... 4 (размер зерен 60 ... 40 мкм) микрошлифпорошка до М40 ... М10 (размер зерен 40 ... 10 мкм).

Для полирования изделий из труднообрабатываемых материалов - твердых сплавов, керамики, ситалла, кремния, кварца и других материалов – применяют алмазные пасты с зернистостью алмазного порошка 60/40 ... 1/0 с нормальной (Н), повышенной (П) и высокой (В) массовыми долями алмазов (ГОСТ 25593 -83).

Можно отметить, что нитрид титановые покрытия, наносимые вакуумным ионно-плазменным напылением, имеют микротвердость порядка 20 ГПа и выше, при этом толщина покрытия может находиться в следующих пределах 2 ... 15 мкм.

Выполненный анализ особенностей *полировки поверхности до нанесения* вакуумного ионно-плазменного покрытия (в основном нитрид титановых покрытий) позволил установить следующее:

- до нанесения ионно-плазменного покрытия, для улучшения процесса нанесения покрытия, необходимо выполнить полировку поверхности;

- перед полировкой поверхности изделия необходимо обеспечить параметры шероховатости поверхности в следующих пределах  $R_a = 0,32 \dots 0,16$  мкм [5];

- полировка поверхности может быть выполнена традиционными методами.

Вместе с тем, проведенный анализ особенностей *полировки поверхности после нанесения покрытия* также позволил установить следующее:

- процесс полировки имеет определенные специфические особенности, связанные с тем, что при традиционных методах полирования припуск на обработку составляет 0,01 ... 0,03 мм [5], а толщина нитрид титанового покрытия составляет 2 ... 15 мкм, поэтому здесь традиционные методы не подходят из-за возможности повреждения или полного удаления покрытия;

- вследствие того, что нитрид титановое покрытие имеет толщину, находящуюся в пределах 2 ... 15 мкм, процесс полировки должен быть направлен не на сьем материала покрытия, а только на уменьшение параметров шероховатости в пределах шероховатости;

- расчет и назначение припусков на обработку покрытия поверхности изделия должен иметь новый подход, отличный от рекомендуемых в работах [5, 6, 7] для специальных или обычных материалов изделий;

– вследствие того, что микротвердость нитрид титанового покрытия составляет 20 ГПа и выше, а его толщина составляет 2 ... 15 мкм, полировка должна выполняться тонкими микрошлифпорошками с размерами зерен меньше толщины покрытия (M5 ... M10) и имеющих более низкую твердость, чем нитрид титановое покрытие (электрокорунд нормальный и белый, формокорунд и другие материалы);

– данный вид полирования называется высотным сглаживающим полированием или глянецованием покрытия поверхности изделия.

Проведенные исследования позволили установить, что перед нанесением покрытия для улучшения его параметров связи с основой необходимо поверхность полировать. В этом случае можно использовать традиционные методы и режимы полировки.

Для выполнения полировки поверхности с вакуумным нитрид титановым покрытием необходимо выполнение высотного сглаживающего полирования, базирующегося на следующем:

– в качестве абразивных материалов необходимо использовать тонкие микрошлифпорошки с размерами зерен меньше толщины покрытия зернистостью M5 ... M10;

– применяемые абразивные материалы должны иметь более низкую твердость, чем нитрид титановое покрытие (электрокорунд нормальный и белый, формокорунд и другие материалы), это исключит возможность повреждения покрытия, здесь будут удаляться только вершины профиля шероховатости и реализовываться процесс их сглаживания;

– на новых методах расчета припусков высотного сглаживающего полирования.

Последовательно назначая припуски по всем операциям и переходам из условия неполного удаления высоты шероховатости, полученной на этапе напыления покрытия, при механической обработке на этапе технологического процесса после нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия обеспечивается эффективность отделочной обработки поверхности изделия близкая к предельному значению. При этом суммарное значение всех припусков на этом этапе обработки не должно превышать величины параметров высоты шероховатости поверхности, образующейся на этапе нанесения покрытия.

Для расчета и назначения припусков при высотном сглаживающем полировании покрытия может быть использован метод деления параметров (шероховатости) поверхностного слоя по операциям технологического процесса и последовательного уменьшения их на последующих операциях.

Для поверхности изделий с покрытием минимальный припуск (двусторонний припуск) на обработку может определяться следующим образом:

$$2z_{\min i} = 2 \frac{R_{\max(i-1)}}{n}; \quad (4)$$

где  $z_{\min i}$  - минимальны припуск на обработку  $i$ -го поверхностного слоя;  $R_{\max(i-1)}$  - наибольшая высота профиля  $(i-1)$ -го поверхностного слоя, здесь  $R_{\max(i-1)} = R_{p(i-1)} + R_{v(i-1)}$ ;  $n$  - коэффициент уточнения припуска (для высотного сглаживающего полирования покрытий  $n = 1,3 \dots 2,0$ ).

Можно отметить, что при  $n = 2$  полностью выполняется сглаживание высоты профиля  $R_{p(i-1)}$  до центральной линии сглаживания, а при  $n = 1,3$  происходит уменьшение  $R_{\max(i-1)}$  на 30%.



Рисунок 3 – Полировальный станок для специальной обработки изделий с покрытиями

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных исследований процесса высотного сглаживающего полирования покрытия поверхностного слоя изделия. Здесь результаты представлены в зависимости от коэффициента уточнения припуска. Скорость полировального круга  $v = 20$  м/с, покрытие на основе нитрид титана (катоды – ВТ 5-1), исходные параметры шероховатости поверхности изделия  $R_a = 0,08$  мкм, обрабатываемый материал - сталь 18Х2Н4МА, алмазная паста (ГОСТ 25593-83) АСМ, шлифовальный круг – войлок. В качестве обрабатывающего устройства использован станок для полировки поверхности (рис. 3).

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований процесса высотного сглаживающего полирования покрытий поверхностного слоя изделия

№ п/п	Операция полиро- вания	Коэф. уточн. припуска, <i>n</i>	Время полиро- вания, <i>T</i> , с	Характер. пасты, зернис- тость	Параметр шероховатости, $R_a$ , мкм (не более)	
					до обработки	после обработки
1	Предва- рительная	1,26	185	АСМ 10/7	0,080	0,063
2	Чистовое	1,26	185	АСМ 7/5	0,063	0,050
3	Глянце- вание	1,25	190	АСМ 5/3	0,050	0,040

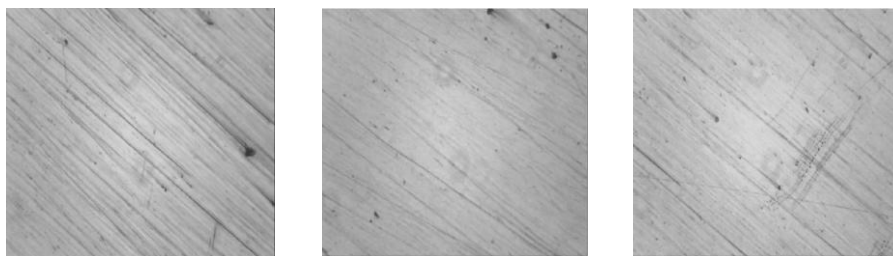


Рисунок 4 – Общий вид поверхности изделия из стали 18Х2Н4МА (увеличение  $\times 100$  раз): **а** - предварительное полирование, **б** – чистовое полирование, **в** - глянцеование

На рис. 4 представлен общий вид поверхности изделия из стали 18Х2Н4МА (увеличение  $\times 100$  раз), обработка выполнена в соответствии с параметрами, представленными в табл. 1. На рис. 4,а показана поверхность после предварительного полирования; на рис.4,б - поверхность после чистового полирования; на рис. 4,в – поверхность после глянцеования.

Выполненные в работе исследования позволили установить следующее:

- перед нанесением ионно-плазменного покрытия, для улучшения процесса нанесения покрытия, необходимо выполнить полировку поверхности, при этом можно применять традиционные методы и режимы полировки;

- для выполнения полировки поверхности с вакуумным нитрид титановым покрытием необходимо использовать нетрадиционные методы полировки поверхности, базирующиеся на выполнении высотного сглаживающего полирования;

- расчет и назначение припусков на обработку покрытия поверхности изделия должен иметь новый подход, базирующийся на расчете и назначении припусков при высотном сглаживающем полировании покрытия, основанный на методе деления параметров шероховатости поверхностного слоя по

операциям технологического процесса и последовательном уменьшении их на последующих операциях.

#### *4. Заключение.*

Выполненные исследования позволили установить связи между толщиной покрытия и параметрами шероховатости поверхностей основы и покрытия. Это дает возможность технологу проектировать необходимую структуру операций технологического процесса до и после нанесения покрытия на поверхности изделия, а также обеспечивать необходимые параметры качества поверхностей в зависимости от видов связей.

В работе разработан прогрессивный метод полировки поверхностного слоя покрытия базирующемся на новом подходе в обработке. Этот метод получил название высотное сглаживающее полирование тонких покрытий.

Для реализации высотного сглаживающего полирования в данной работе разработан рациональный метод определения припусков при полировке поверхностного слоя изделия с тонкими покрытиями, например, на основе нитрид титана.

На базе полученных результатов можно выполнять разработку технологических процессов комбинированной отделочной обработки изделий с тонкими покрытиями и обеспечивать повышение их качества и производительности изготовления.

**Список литературы:** 1. Машиностроение. Энциклопедия. / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. // Технология, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III – 8. / Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 744 с. 2. Михайлов А.Н., Михайлова Е.А.. Общая классификация вакуумных ионно-плазменных покрытий на внутренних цилиндрических поверхностях изделий машиностроения. // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, №7. 2006. С. 3 – 6. 3. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Инженерія поверхні: Підручник. – К.: Наукова думка, 2007. – 558 с. 4. Политехнический словарь / Редкол.: А.Ю. Ишлинский (гл. ред.) и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 656 с. 5. Краткий справочник металлста / Под общ. ред. П.Н. Орлова, Е.А. Скороходова. – М.: Машиностроение, 1986. – 960 с. 6. Боровский Г.В., Григорьев С.Н., Маслов А.Р. Справочник инструментальщика / Под общ. ред. А.Р. Маслова. – М.: Машиностроение, 2005. – 464 с. 7. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

*Поступила в редколлегию 15.05.2010*