

УДК 621.01(06)

Е.А. Шейко, канд. техн. наук, доц.  
Донецкий национальный технический университет, Украина  
Тел.: +38 (095) 8208113; E-mail: nauka@mail.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СВОЙСТВ ВАКУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ИЗДЕЛИЙ

В данной статье приведена методика экспериментальных исследований по определению свойств нитрид титанового покрытия на внутренней цилиндрической поверхности изделия, которое выполнено по специальной технологии. В работе определены параметры шероховатости поверхности и микротвердость поверхности изделия. А также установлена зависимость толщины напыляемого покрытия от угла наклона оси изделия к направлению потока плазмы и даны общие рекомендации.

**Ключевые слова:** нитрид титановое покрытие, внутренняя цилиндрическая поверхность, изделие, свойства.

### Введение

В настоящее время вакуумные ионно-плазменные покрытия широко применяются для различных изделий машиностроения для повышения их свойств [1, ..., 4]. Особенно перспективными для этого являются нитрид титановые покрытия [2, 3]. Эти покрытия имеют большую твердость (микротвердость  $\mu_v = 20 \dots 23$  МПа), высокую износостойкость, абразивную стойкость, тугоплавкость, пластичность при высоких температурах и другие свойства, что обуславливает высокие функциональные параметры изделий [4].

Вместе с тем, можно отметить, что процесс нанесения приведенных покрытий обычно сейчас выполняется для наружных поверхностей изделий [1, ..., 4], и в настоящее время нет данных о нанесении этих покрытий на внутренние цилиндрические поверхности (ВЦП) изделий от внешнего потока плазмы при выполнении принципа концентрации изделий в вакуумной камере.

Для реализации процесса нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на ВЦП изделий при выполнении принципа концентрации изделий в вакуумной камере [5, ..., 7], автором данной статьи разработан специальный способ нанесения этих покрытий на ВЦП изделий от внешнего потока плазмы при выполнении принципа концентрации изделий в вакуумной камере [8]. Этот способ позволяет реализовывать с помощью специального приспособления процесс нанесения покрытий на ВЦП изделий с заданными параметрами качества.

Математические структурно-функциональные символьные модели покрытия с учетом потоков материи, энергии и информации могут быть представлены следующими выражениями:

- для однослойного покрытия

$$V_o \rightarrow \bigwedge_{v=1}^{\infty} \{(m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v)\}, \quad (1)$$

- для многослойного покрытия

$$V_m \rightarrow \bigvee_{v=1}^n \{(m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v}), (\bigwedge_{s=1}^{\infty} dl_s \times \bigwedge_{t=1}^{\infty} dl_t \times dl_v)\}, \quad (2)$$

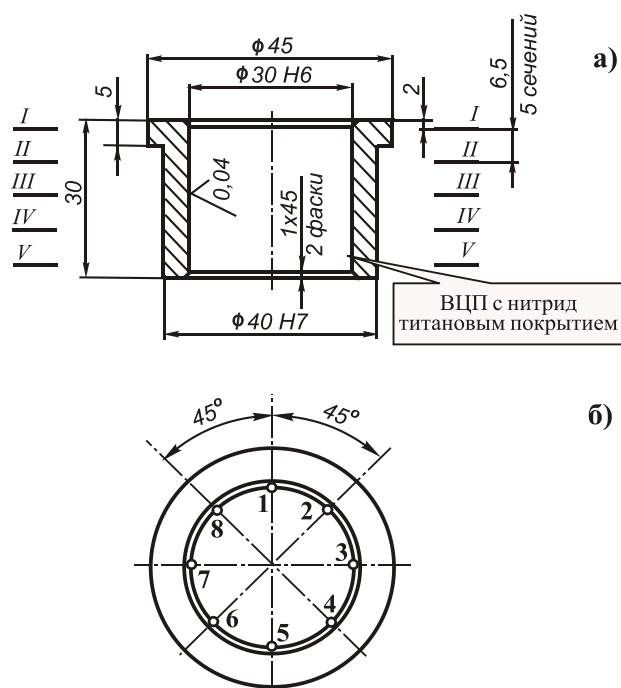


Рис. 1. Общий вид изделия с ВЦП с вакуумным ионно-плазменным покрытием (I-I, II-II, III-III, IV-IV, V-V – поперечные сечения; 1, 2, ..., 8 – точки измерения толщины покрытия):

а – продольный разрез, б – вид с верха

твердости покрытия на ВЦП изделия; определить толщину нитрид титанового покрытия по окружности ВЦП для конкретного сечения изделия; определить особенности изменения толщины нитрид титанового покрытия на ВЦП изделия по различным сечениям изделия; установить зависимость толщины напыляемого покрытия на ВЦП изделия от угла наклона оси изделия к направлению потока плазмы.

### Методика экспериментальных исследований

Для выполнения экспериментальных исследований по определению особенностей нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на ВЦП изделия были изготовлены натурные образцы натурные образцы специальных втулок (рис. 5.1). Общее количество втулок определено на основании основных рекомендации теории эксперимента их количество составило 12.

На рис. 1 представлены основные геометрические параметры втулок с ВЦП. Данные втулки изготовлены из одной заготовки стали 45.

Направляющие втулки были предварительно изготовлены на токарном станке. Технологический процесс отделочной обработки ВЦП изделия (до нанесения покрытия) включал выполнение следующих операций: шлифование ВЦП, пескоструйная обработка ВЦП, полировка ВЦП, обработка ультразвуком, специальная мойка и подготовка ВЦП к нанесению покрытия.

где  $(m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v})$  – кортеж параметров технологических воздействий материального, энергетического и информационного характера в зависимости от параметров  $s, t, v$ .

Вместе с тем, можно отметить, что в настоящее время еще не исследованы параметры качества покрытий на ВЦП изделий. Поэтому в данной работе выполняются исследования свойств покрытий на ВЦП изделий.

Целью данной работы является исследования параметров качества нитрид титановых покрытий на ВЦП изделий, наносимых вакуумным ионно-плазменным методом от внешнего потока плазмы при выполнении принципа концентрации изделий в вакуумной камере.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены следующие задачи: разработать методику экспериментальных исследований; определить параметры шероховатости ВЦП изделий с нитрид титановым покрытием; установить параметры микро-

ВЦП изделия обработано на круглошлифовальном станке модели 3Э110М (рис. 2) с применением внутришлифовальной головки методом - напроход. Обработка вы-



Рис. 2. Общий вид процесса обработки ВЦП изделия на станке модели 3Э110М

полнена с длительным выхаживанием ВЦП, при этом параметр шероховатости соста вил  $R_a = 0,32$  мм, материал абразивного круга - электрокорунд, диаметр круга 12 мм. Припуск на шлифование ВЦП (по диаметру) составлял 0,18 мм. Скорость шлифовального круга составляла  $v_k = 30$  м/с, скорость вращения изделия  $v_u = 0,03$  м/с. Продольная подача -  $s_n = 0,005$  м/об на один оборот детали.

Пескоструйная обработка ВЦП изделия выполнена на установке для пескоструйной обработки ВЦП изделий. Пескоструйная обработка ВЦП изделий выполнялась струей сжатого воздуха, подаваемого из ресивера при давлении  $Q = 6$  атм., с взвешенными в нем частицами песка (зерна песчинок кварца и полевых шпатов размерами 0,1 ... 0,5 мм) на обрабатываемую поверхность. После пескоструйной обработки параметр шероховатости поверхности составил  $R_a = 0,22$  мм.

При полировании припуск на обработку составил 0,015 мм, в качестве абразивных материалов использованы тонкие микрошлифпорошки с размерами зерен М10. Для полировки использован войлочный круг. Обработка выполнена с длительной обработкой 185 с, при этом параметр шероховатости составил  $R_a = 0,04$  мм.

Для последующего нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий выполнена ультразвуковая обработка и специальная мойка изделия с ВЦП. Ультразвуковая обработка изделий выполнена в течении 10 мин.

Вакуумное ионно-плазменное покрытие ВЦП изделий напылялось на установке ННВ 6.6-И1. Материал катодов ВТ 1-0 (рис. 3), количество катодов – 3. Покрытие композиционное на основе нитрид титанового покрытия TiN. Толщина покрытия 12 мкм. Покрытие нанесено с использованием разработанного способа и устройства для его осуществления [8]. Длительность нанесения покрытия составил 50 мин, угол наклона оси втулки составил  $\omega = 15^\circ$ . Общий вид изделий с ВЦП с нитрид титановым покрытием представлен на рис. 4.



Рис. 3. Общий вид катода установки ННВ 6.6-И1, отработавшего 10 часов

В данной работе предусматривается установить следующие параметры нитрид титанового покрытия на ВЦП изделия:

1. Определить параметры шероховатости ВЦП изделий с нитрид титановым покрытием.
2. Установить параметры микротвердости покрытия на ВЦП изделия.
3. Определить толщину нитрид титанового покрытия по окружности ВЦП для конкретного сечения изделия.

4. Определить особенности изменения толщины нитрид титанового покрытия на ВЦП изделия по различным сечениям изделия.

5. Установить зависимость толщины напыляемого покрытия на цилиндрическую внутреннюю поверхность изделия от угла наклона оси изделия к направлению потока плазмы.



Рис. 4. Натурные образцы направляющих втулок (подложка - сталь 45)

В данной работе планируется выполнение экспериментальных исследований по определению параметров шероховатости ВЦП изделий на профилограф-профилометре, в зонах ВЦП, представленных на схеме рис. 1.

Установление параметров микротвердости нитрид титанового покрытия на ВЦП изделия планируется выполнить на микротвердомере ПМТ-3 в 8 зонах по 5 точкам измерения в каждой. Для выполнения

измерений микротвердости планируется выполнить разрезку изделия на элементы и выполнение измерения на микротвердомере ПМТ-3.

Процесс определения толщины нитрид титанового покрытия по окружности ВЦП для конкретного сечения изделия планируется выполнить путем выполнения сечения изделия в плоскости *I-I* за счет обработки на токарном станке, обработки на плоскошлифовальном станке и полировки поверхности изделия в плоскости *I-I*. Затем будет проведено травление полированной поверхности и измерение толщины покрытия на большом металлографическом микроскопе НЕОРНОТ-2 по восьми точкам схемы рис. 1. Толщина покрытия будет измеряться на микроскопе путем сравнения его параметров с параметрами объекта-микрометра и соответствующих пересчетов.

Определение особенностей изменения толщины нитрид титанового покрытия на ВЦП изделия по различным сечениям изделия планируется выполнить по пяти сечениям изделия в соответствии со схемой рис. 1. Подготовка каждого сечения к измерению должна выполняться аналогично предыдущему исследованию. В каждом сечении измерения должны выполняться по восьми точкам.

А также в данной работе планируется установить зависимость толщины напыляемого покрытия на образцы-свидетели от угла наклона оси изделия к направлению потока плазмы. Образцы свидетели планируется устанавливать под углом к потоку плазмы и выполнять процесс нанесения покрытия. Углы  $\omega$  наклона оси изделия к направлению потока плазмы следующие  $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ . Длительность нанесения нитрид титанового покрытия составляла во всех случаях 20 мин.

Таким образом, предлагаемая методика экспериментальных исследований позволит выполнить заданные исследования и установить особенности нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на ВЦП изделия.

### **Основные результаты экспериментальных исследований**

Экспериментальные исследования по определению параметров шероховатости ВЦП изделий выполнены на профилограф-профилометре в зонах ВЦП, представленных на схеме рис. 1. Результаты измерений параметров шероховатости нитрид титанового покрытия на профилограф-профилометре (образец №5) представлены в табл. 1. Среднее значение параметра шероховатости ВЦП изделия до нанесения покрытия со-

ставлял  $R_a = 0,04$  мм. Нитрид титановое покрытие (TiN) напылено на установке ННВ 6.6-И1 на серию натуральных образцов изделий (рис. 4) с ВЦП в течении 50 минут, катоды изготовлены из материала ВТ 1-0 (3 катода). Угол наклона оси изделия к направлению потока плазмы составлял  $\omega = 15^\circ$ , материал основы изделия с ВЦП сталь 45 (подложка).

Таблица 1. Результаты измерений параметров шероховатости нитрид титанового покрытия на профилограф-профилометре (образец №5)

Поперечные сечения изделия	Точки измерения покрытия (образец №5)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Значения параметра шероховатости $R_a$ , мкм							
<b>I-I</b>	0,036	0,038	0,036	0,037	0,035	0,036	0,036	0,034
<b>II-II</b>	0,036	0,034	0,036	0,035	0,034	0,034	0,035	0,034
<b>III-III</b>	0,038	0,037	0,036	0,036	0,035	0,037	0,035	0,036
<b>IV-IV</b>	0,040	0,034	0,035	0,037	0,036	0,034	0,037	0,038
<b>V-V</b>	0,036	0,042	0,038	0,042	0,036	0,038	0,036	0,042

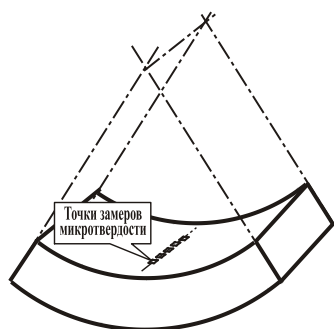


Рис. 5. Схема расположения точек замеров микротвердости покрытия на ВЦП кольцевого сектора изделия

Выполненные исследования параметра шероховатости  $R_a$  показали, что в данном случае нитрид титановое покрытие не значительно изменяет параметры шероховатости. Это связано с тем, что покрытие имеет небольшую толщину до 12 мкм.

Определение параметров микротвердости нитрид титанового покрытия на ВЦП изделия выполнено на микротвердомере ПМТ-3 по 8 точкам измерения. Для выполнения измерений микротвердости покрытия на ВЦП изделия проведена разрезка изделия на элементы (кольцо разрезано на 8 секторов) и осуществлено измерение микротвердости нитрид титанового покрытия на микротвердомере ПМТ-3. На рис. 5 представлена схема расположения точек замеров параметров микротвердости покрытия на ВЦП кольцевого сектора изделия. В табл. 2 представлены результаты измерения микротвердости нитрид титанового покрытия на ВЦП изделия.

Таблица 2. Результаты измерений микротвердости нитрид титанового покрытия на ВЦП изделия (элементы образца №5)

Точки измерения	Сектора кольца по сечению <b>I-I</b> (элементы образца №5)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Значения параметров микротвердости $H_\mu$ , ГПа							
<b>1</b>	23,2	23,0	23,2	23,1	23,1	23,2	22,8	23,0
<b>2</b>	22,9	22,9	22,6	22,7	22,9	22,0	22,2	23,1
<b>3</b>	23,0	23,1	23,3	23,0	23,2	23,2	23,3	23,0
<b>4</b>	23,1	22,4	22,2	22,1	23,3	23,2	23,0	22,9
<b>5</b>	22,8	22,9	22,9	22,7	22,6	22,8	22,5	22,6



В табл. 3 представлены результаты измерений толщины вакуумных ионно-плазменных покрытия (нитрид титановое покрытие) на большом металлографическом микроскопе НЕОРНОТ-2 для образца №5. Нитрид титановое покрытие (TiN) напылено на установке ННВ 6.6-И1 на серию натуральных образцов изделий (рис. 4) с ВЦП в течении 50 минут, катоды изготовлены из материала ВТ 1-0 (3 катода). Угол наклона оси



Рис. 6. Общий вид поверхности изделия с ВЦП по сечению I-I

изделия к направлению потока плазмы составлял  $\omega = 15^\circ$ , материал основы изделия с ВЦП сталь 45. Для нанесения покрытия использовалось специально разработанное устройство для напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий [6, 7, 8]. В табл. 3 приведены данные по толщине покрытия изделия характерные для всех натуральных образцов.

Измерение параметров толщины покрытия ВЦП изделия (рис. 1) выполнялось по восьми точкам изделия в пяти сечениях. Для определения параметров толщины покрытия выполнялся срез слоев изделия с последующей полировкой поверхности изделия (рис. 6). После полировки поверхности сечения изделия выполнялось измерение параметров толщины покрытия на большом металлографическом микроскопе НЕОРНОТ-2.

Таблица 3. Результаты измерений толщины вакуумных ионно-плазменных покрытия (нитрид титановое покрытие) на большом металлографическом микроскопе

Поперечные сечения изделия	Точки измерения покрытия (образец №5)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Значения толщины покрытия $h$ , мкм							
<b>I-I</b>	12,1	12,1	12,2	12,1	12,1	12,2	12,2	12,2
<b>II-II</b>	12,1	12,2	12,1	12,2	12,1	12,1	12,2	12,1
<b>III-III</b>	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,0	11,9	11,9
<b>IV-IV</b>	11,9	12,0	11,9	12,0	12,0	11,9	12,1	12,1
<b>V-V</b>	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,9

Определение особенностей изменения толщины нитрид титанового покрытия на ВЦП изделия по различным сечениям изделия выполнено по пяти сечениям изделия в соответствии со схемой рис. 1. Подготовка каждого сечения к измерению выполнена аналогично предыдущему исследованию. В каждом сечении измерения выполнялись по восьми точкам.



Рис. 7. Общий вид шлифовки поверхности изделия с ВЦП по сечениям

Обработка поверхностей сечений изделия с ВЦП выполнялась на плоскошлифовальном станке модели 3E711В посредством последовательной шлифовки материала изделия (рис. 7).

Для установления особенностей напыления покрытия на ВЦП изделия в зависимости от угла наклона оси ВЦП относительно потока плазмы определена зависимость толщины слоя напыляемого покрытия на поверхность от угла  $\omega$ . На рис. 8 приведена зависимость толщины напыляемого покрытия на образцы-свидетели от угла наклона оси изделия к

направлению потока плазмы  $\omega$ . Образцы-свидетели устанавливались под углом к потоку плазмы, и выполнялся процесс нанесения покрытия. Углы  $\omega$  наклона оси изделия к направлению потока плазмы следующие  $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ .

Таким образом, в данной работе выполнены экспериментальные исследования по определению особенностей нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий и установлены характеристики наносимого покрытия на ВЦП изделия. Проведенные исследования дают возможность проектировать оснастку технологических систем в зависимости от особенностей нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на ВЦП изделия.

### Заключение

Выполненные исследования позволили разработать методику экспериментальных исследований по определению основных параметров свойств нитрид титановых покрытий на ВЦП изделий. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено следующее.

1. В работе определено, что параметры шероховатости ВЦП изделий с нитрид титановым покрытием до и после нанесения покрытия отличаются не значительно в пределах 1,5 ... 2,0 %, что характеризует ВЦП стабильностью параметров шероховатости поверхности.

2. Установлено, что микротвердость нитрид титанового покрытия по высоте ВЦП изменяется в пределах 1,6 ... 1,8 %, что характеризует ВЦП стабильностью параметров микротвердости покрытия поверхности изделия.

3. В работе определено, что толщина нитрид титанового покрытия по окружности ВЦП для конкретного сечения изделия практически не изменяется. При этом толщина покрытия по высоте ВЦП изделия изменяется в пределах 3,0 ... 3,5 %, что характеризует ВЦП стабильностью параметров

толщины покрытия поверхности изделия.

5. Выполненные исследования позволили установить зависимость толщины напыляемого покрытия ВЦП изделия от угла наклона оси изделия к направлению потока плазмы. При этом определено, что с увеличением угла наклона продольной оси изделия повышается производительность нанесения покрытий. Однако здесь имеются определенные ограничения на допустимые углы наклона продольной оси изделия [7].

В целом процесс нанесения покрытий на ВЦП изделий от внешнего источника потока плазмы в условиях концентрации изделий в вакуумной камере характеризуется стабильностью свойств и может быть рекомендован для применения в машиностроении.

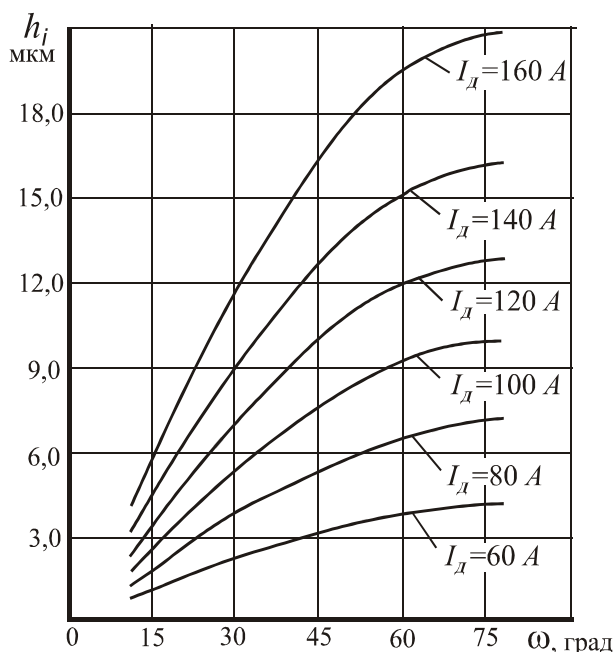


Рис. 8. Зависимость толщины напыляемого покрытия на ВЦП от угла наклона оси изделия к направлению потока плазмы

**Список літератури:**

1. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Рыжов Э.В. Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. – Киев: Наукова думка, 1994. – 180 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / Верещака А.С. - М.: Машиностроение, 1993. - 336 с.
3. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: Учебник для студ. Вузов / Григорьев С.Н. – М.: Машиностроение, 2009. - 368 с.
4. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент [Внуков Ю.Н., Марков А.А., Лаврова Л.В., Бердышев Н.Ю.]. – Киев: Тэхніка, 1992. – 143 с.
5. Михайлова Е.А. К вопросу нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на внутренние поверхности изделий машиностроения / Михайлова Е.А., Михайлов В.А. // *Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнародний зб. наукових праць.* – 2005. - Вип. 30. - С. 157-164.
6. Михайлова Е.А. Особенности нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий на внутренние поверхности изделий машиностроения / Михайлова Е.А. // *Упорочняючі технології і покриття.* – 2006. - №4. - С. 32 – 35.
7. Михайлова Е.А. Некоторые особенности напыления вакуумных ионно-плазменных покрытий на внутренние цилиндрические поверхности изделий машиностроения / Михайлова Е.А. // *Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць.* – 2006. - Вип. 31. - С. 210 - 219.
8. Спосіб нанесення вакуумних іонно-плазмових покриттів на внутрішні циліндричні поверхні виробів: патент України №87935. МПК<sup>7</sup> С23С 14/00.. / Михайлова О.О., Малишко І.О. - № - а200801658; заявл. 08.02.2008. – 4 с.

Надійшла до редакції 09.01.2013.

**О.О. Шейко**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА  
ВИЗНАЧЕННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВАКУМ-  
НИХ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ НА  
ВНУТРІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХ-  
НЯХ ВИРОБІВ**

*У цій статті приведена методика експериментальних досліджень за визначенням властивостей нітриду титанового покриття на внутрішній циліндричній поверхні виробу, котре виконане за спеціальною технологією. У роботі визначені параметри шорсткості поверхні і мікротвердість поверхні виробу. А також встановлена залежність товщини напилуваного покриття від кута нахилу осі виробу до напрямку потоку плазми і дані загальні рекомендації.*

**Ключові слова:** нітрид титанове покриття, внутрішня циліндрична поверхня, виріб.

**Ye.A. Sheiko**

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE DETERMI-  
NATION OF PROPERTIES OF PHYSICAL VA-  
POUR DEPOSITION COATING ON THE IN-  
SIDE SURFACE OF THE CYLINDRICAL  
PRODUCTS**

*This article describes a method of experimental studies to determine the properties of titanium nitride coating on the inside of the cylindrical surface of the product, which is made by special technology. We defined the parameters of the surface roughness and microhardness of the workpiece surface.*

**Keywords:** titanium nitride coating, the inside cylindrical surface, the product, properties