

УДК 620.17, 620.18

А.Н. Бебенин<sup>1</sup>, В.И. Рудый<sup>2</sup>, В.Н. Литовченко<sup>2</sup>, Р.А. Воробьев<sup>2</sup>,  
И.А. Янкитова<sup>2</sup>, Т.Г. Карнавская<sup>2</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ТУГОПЛАВКИХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ВАКУУМНОГО МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «БУРЕВЕСТНИК»<sup>2</sup>

В результате проведения испытаний образцов с нанесенным защитным тугоплавким покрытием определены механические характеристики покрытия: микротвердость, модуль упругости, доля упругой работы вдавливания. Показано, что защитное покрытие способно воспринимать необходимый уровень растягивающих напряжение без разрушения адгезионных связей.

*Ключевые слова:* защитное покрытие, тантал, ионно-плазменное вакуумное магнетронное нанесение, растягивающее напряжение, предел текучести, адгезия, микротвердость, шероховатость.

Для обеспечения живучести на поверхность канала высоконагруженных артиллерийских орудий наносят тугоплавкое защитное покрытие. При дульных энергиях орудий более 20 МДж наиболее перспективным материалом для покрытий считаются сплавы на основе тантала, технология нанесения – ионно-плазменная вакуумная магнетронная.

В данной статье приводятся результаты испытаний образцов оружейной стали с нанесенным танталовым покрытием по технологии HIPIMS bipolar (магнетронной распыление импульсами высокой мощности с дуальной схемой работы магнетронов).

Использование этой технологии позволило создать необходимое по условиям функционирования ствольной трубы работоспособное «толстое» покрытие толщиной до 300 мкм. Анализ качества получаемого покрытия на соответствие требуемым эксплуатационным свойствам готового изделия на стенде контроля характеристик покрытия осуществлялся по следующему алгоритму:

1. Предварительная оценка толщины покрытия ( $\delta_n$ ) определяется магнитным толщиномером МТ-2007.
2. Шероховатость поверхности покрытия ( $R_a$ ) на установке SurfTest SJ-310R.
3. Механические характеристики (микротвердость по Викерсу - HV, приведенный модуль упругости - E, доля упругой работы вдавливания - nIT) определяются на установке наноидентификации FISCHERSCOPE HM2000.
4. Оценка адгезии покрытия на плоских образцах при трехточечном изгибе на машине Inspekt 100 с выдачей на экран диаграммы «нагрузка – прогиб».

Контроль характеристик покрытия тантала проводится на цилиндрических образцах-свидетелях (рис. 1) диаметром 19 мм и высотой 5.5 мм. Образцы для трехточечного изгиба и их размеры представлены на рис. 2.



Рис. 1. Образцы - свидетели для проведения контроля

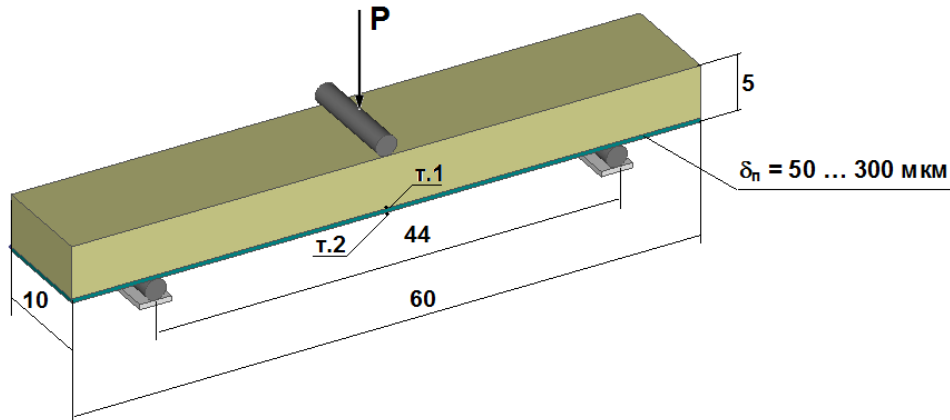


Рис. 2. Схема реализации трехточечного изгиба на плоских образцах

Механические характеристики танталового покрытия, полученные в результате испытаний по представленному алгоритму, представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Механические свойства танталового покрытия

№ образца	$\delta_n$ (мкм)	HV (кгс/мм <sup>2</sup> )	E (ГПа)	nIT (%)	Ra (мкм)	HF (балл)
1	50	839	219	33	0.612	HF1
2	100	838	189	35	0.623	HF1
3	150	852	185	36	0.957	HF1
4	200	799	187	35	1.235	HF1
5	300	967	192	39	1.243	HF1

Из табл. 1 видно, что нанесенное танталовое покрытие обладает твердостью 800...970 HV, что примерно в 1,5 раза выше твердости основного металла, и модулем упругости, близким с модулем стальной основы. Видно, что шероховатость поверхности увеличивается с увеличением толщины наносимого защитного слоя, а оценка адгезии по Роквелл-тесту соответствует высшему баллу HF1.

В стволах артиллерийских орудий окружные растягивающие напряжения от действия пороховых газов могут достигать предела текучести основного материала. В материалах с категорией О-120, О-130 условный предел текучести составляет:  $\sigma_{02} = 1320 - 1430$  МПа. Важно, чтобы защитное покрытие, нанесенное на канал ствола, было способно воспринимать такой уровень растягивающих напряжений без разрушения когезионных и адгезионных связей. Наиболее просто такой уровень напряжений можно реализовать испытаниями на 3<sup>х</sup> точечный изгиб (рис. 2).

Защитное покрытие толщиной  $\delta_n = 50 - 300$  мкм располагается в растянутой зоне образца. При принятых размерах образцов с поперечным сечением  $10 \times 5$  и длиной пролета 44

мм нагрузки ( $P$ ) прикладываются ступенями: 4; 5.5; 8.2; 10 кН. На каждой ступени фиксируется напряжение в т. 1 на границе «покрытие – основа» или в т. 2 – на поверхности покрытия. Для конкретного испытания защитное покрытие нанесено на образцы из стали ОХНЗМФА, термообработанные в основном на 50 HRC (условный предел текучести  $\sigma_{02} = 1450$  МПа, временное сопротивление  $\sigma_b = 1600$  МПа).

На первой ступени нагружения  $P_1 = 4$  кН в т. 1 растягивающее напряжение достигает величины  $\approx 1000$  МПа и находится в упругой зоне деформирования (рис. 3).

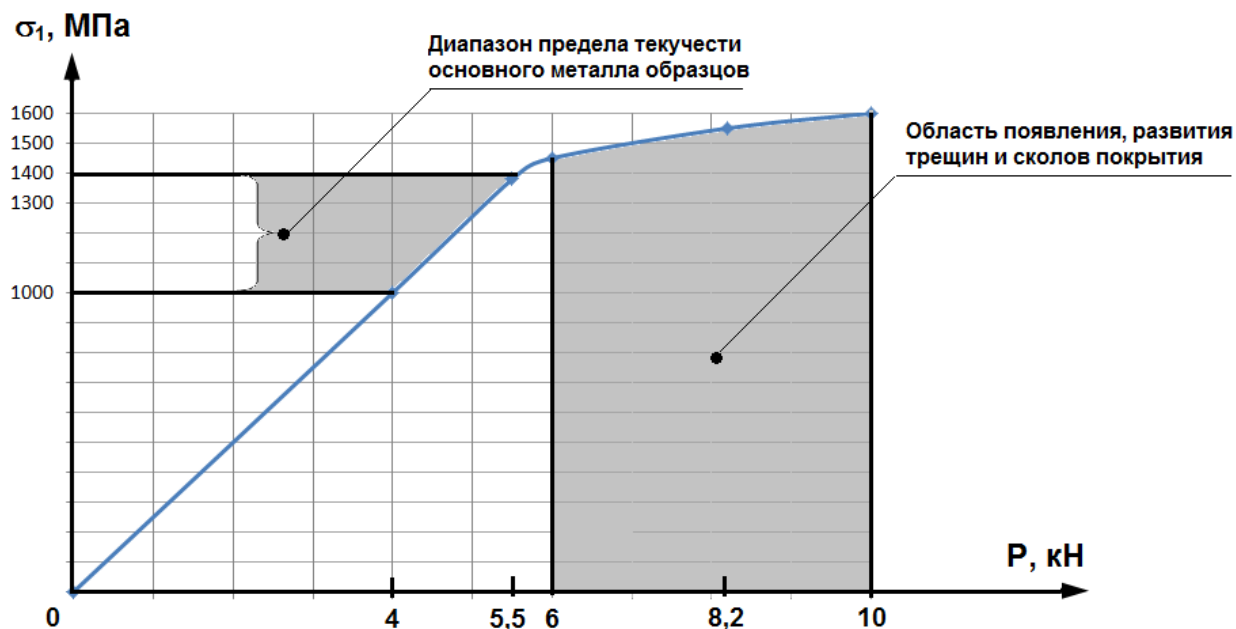
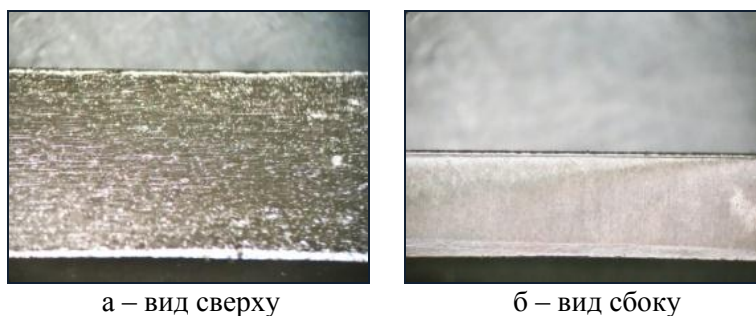


Рис. 3 Диаграмма « $\sigma_1 - P$ »

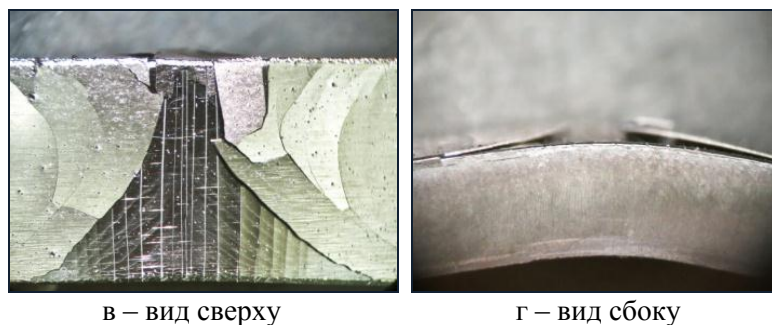
На второй ступени  $P_2 = 5.5$  кН в точке 1 напряжение достигает величины  $\approx 1300 - 1400$  МПа, то есть верхнего уровня предела текучести материала образцов. Для качественного покрытия на этой ступени не должно фиксироваться каких-либо повреждений покрытия. На третьей ступени при повышении нагрузки до  $P_3 = 8.2$  кН в основном материале развивается полномасштабная текучесть, напряжение в точке 1 достигает уровня 1500 МПа, в покрытии появляются трещины и сколы.

На четвертой ступени при повышении нагрузки до  $P_4 = 10$  кН идет долом образца при напряжениях, близких к временному сопротивлению материала. На каждой ступени после снятия нагрузки проводится осмотр и фотографирование состояния покрытия и основного металла с использованием микроскопа (рис. 4).



а – вид сверху

б – вид сбоку



**Рис. 4 Фотографии поверхности образца №4 с танталовым покрытием:**

*a, б* – нагрузка на образец 5.5 кН; *в, г* – нагрузка на образец 8.2 кН

Как видно из рис. 3 и рис. 4 *a, б* при нагрузке 5,5 кН, которая обеспечивает уровень растягивающих напряжений не ниже предела текучести, покрытие не отслаивается и не разрушается. Это говорит об удовлетворительной адгезии покрытия по параметру сцепления при растяжении. При переходе границы нагрузки в полномасштабную текучесть (рис. 3 и рис. 4, *в, г*) покрытие растрескивается и отслаивается от стальной основы.

Таким образом, анализ механических характеристик исследуемого защитного покрытия показал, что использование магнетронной технологии HIPIMS bipolar позволяет получить танталовое покрытие толщиной до 300 мкм с необходимыми эксплуатационными свойствами.

*Дата поступления  
в редакцию 11.12.2014*

**A.N. Bebenin<sup>1</sup>, V.I. Rudy<sup>2</sup>, I.A. Yankitova<sup>2</sup>, V. N. Litovchenko<sup>2</sup>, R. A. Vorobyov<sup>2</sup>,  
T.G. Karnavskaya<sup>2</sup>**

**INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE PROTECTIVE  
REFRACTORY COATING APPLIED BY THE METHOD OF ION-PLASMA VACUUM  
MAGNETRON SPUTTERING**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>1</sup>,  
Joint Stock Company Central Research Institute "BUREVESTNIK"<sup>2</sup>

In the test samples with a protective refractory covering is defined mechanical characteristics covering: microhardness, elastic modulus, the elastic portion of the work of indentation. It is shown that the protective covering is able to perceive the necessary level of tensile stress without failure of the adhesive bonds.

*Key words:* protective covering, tantalum, the ion-plasma vacuum magnetron sputtering, tensile stress, yield stress, adhesion, microhardness, roughness.