

УДК 620.193.14:623.423

## ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ МЕТОД НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ВНУТРЕННИЕ ПОВЕРХНОСТИ

**В. Н. НАДТОКА**, канд. техн. наук (ГП КБ «Южное», г. Днепропетровск), **Р. В. ПАНКОВ**, инж.,  
**Л. Н. ДЕЙНЕКО**, д-р техн. наук (Нац. металлург. акад. Украины, г. Днепропетровск),  
**Н. В. МАСЛЯНЫЙ**, канд. техн. наук (Днепропетровский нац. ун-т)

Рассмотрены экологически чистые способы нанесения покрытий на внутренние поверхности орудийных стволов. Предложен экологически безопасный метод нанесения покрытий.

Розглянуто екологічно чисті способи нанесення покриттів на внутрішні поверхні гарматних стволів. Запропоновано екологічно безпечний метод нанесення покриттів.

Environmentally clean methods for application of coatings on internal surfaces of the gun barrels are considered. Environmentally clean method for application of the coatings is suggested.

В последнее десятилетие во многих отраслях промышленности возрос интерес к экологически чистым вакуумным покрытиям, в частности к технологиям PVD-покрытий (Physical Vapor Deposition). Одна из наиболее совершенных PVD-технологий — осаждение покрытий с помощью электродугового разряда в вакууме. Вакуумно-дуговые покрытия характеризуются высокой прочностью соединения с основным металлом, имеют высокое сопротивление фрикционному износу, эрозии под влиянием кавитации, потоков газа и пыли, а также хорошую коррозионную стойкость в условиях влияния воздушной атмосферы и коррозионных сред [1, 2].

Вакуумно-дуговое осаждение хорошо отработано на деталях простой формы. Однако покрытие этим методом внутренних поверхностей труб и других деталей сложной формы — трудная задача. В то же время существует необходимость в разработке эффективной технологии покрытия внутренней поверхности орудийных стволов для повышения их долговечности, поскольку постоянное повышение дальности и скорости стрельбы достигается путем применения более высокоэнергетических порохов, что приводит к эрозии ствола. До настоящего времени для решения этой задачи продолжает использо-

ваться технология нанесения гальванического хромового покрытия. Очевидные недостатки такого покрытия [3] делают необходимым поиск новых способов защиты внутренних поверхностей артиллерийских стволов.

Американские и европейские разработчики вакуумных технологий нанесения покрытий на детали сложной формы в основном сосредоточили свое внимание на методе магнетронного распыления (Cylindrical Magnetron Sputtering), разработанном сотрудниками Benet Laboratories (Watervliet Arsenal, Watervliet NY 12189-4050) [4]. Это объясняется не только его сравнительной простотой, но и его достаточно широким применением в промышленности ряда западных стран.

В отличие от вакуумно-дугового при магнетронном распылении поток распыляемого материала имеет низкую степень ионизации, поэтому практически невозможно управлять структурой и свойствами покрытий путем ускорения ионов конденсирующегося материала. Вакуумно-дуговой метод позволяет управлять энергией конденсирующихся ионов с помощью электрического потенциала, что обеспечивает высокую прочность сцепления покрытия с материалом обрабатываемых деталей. Возможно получение мелкозернистой структуры покрытия, которая имеет более высокие

© В. Н. НАДТОКА, Р. В. ПАНКОВ, Л. Н. ДЕЙНЕКО, Н. В. МАСЛЯНЫЙ, 2009

защитные свойства по сравнению с покрытием, получаемым магнетронным распылением и характеризующимся обычно столбчатой структурой зерна. Однако такая структура не является оптимальной для защиты поверхности от коррозии, так как на границах зерен скапливаются дефекты, которые возникают в процессе роста толщины покрытия. Вследствие этого по границам зерен могут диффундировать атомы агрессивной среды (продукты сгорания пороха) и при достижении основы разрушать ее.

Цель настоящей статьи заключается в освещении результатов разработки и изготовления экспериментального оборудования и технологии вакуумно-дугового осаждения покрытий из молибдена и хрома на внутренние поверхности артиллерийских стволов.

Разработаны и изготовлены электродуговые источники (рис. 1–3), которые обеспечивают образование радиальных потоков металлических ионов (испаряемой поверхностью является боковая поверхность цилиндрических катодов) и соответственно получение покрытий на внутренних поверхностях артил-

лерийских стволов. Проведены испытания источников металлических ионов, получены покрытия толщиной от 30 до 200 мкм из молибдена и хрома.

Производительность такого процесса нанесения покрытия достаточно высока и может эффективно заменить гальваническое осаждение. Покрытия отличаются высокой плотностью, отсутствием трещин, хорошим сцеплением с материалом обрабатываемой детали и могут быть получены при относительно низких температурах подогрева (~350...400 °С) покрываемых изделий. Последнее особенно важно в случае орудийных стволов, у которых не допустим нагрев металла выше температуры отпуска после автофретирования [5, 6], так как при этом происходит уменьшение сжимающих остаточных напряжений в стволе, что повышает склонность металла к разрушению в результате повышенного износа.

В отличие от оборудования и процесса, называемого Coaxial Energetic Ion Deposition Process, которые разработаны Alameda Applied Sciences Corporation [7], в предлагаемом нами процессе труба не является анодом. Это позволяет управлять энергией конденсирующихся ионов путем приложения электрического потенциала к трубе и таким образом изменять структуру и свойства самих покрытий.



Рис. 1. Электродуговой испаритель металлов радиального типа с механизмом перемещения

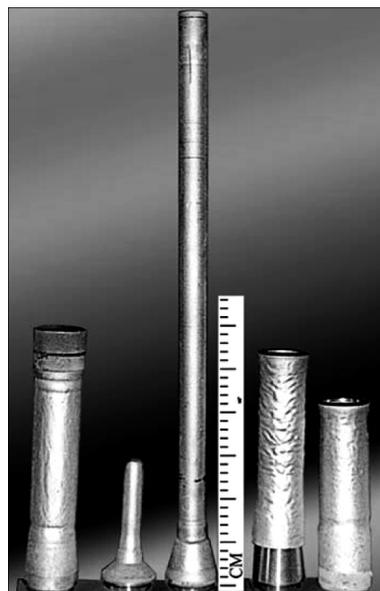


Рис. 2. Цилиндрические катоды вакуумных дуговых источников плазмы

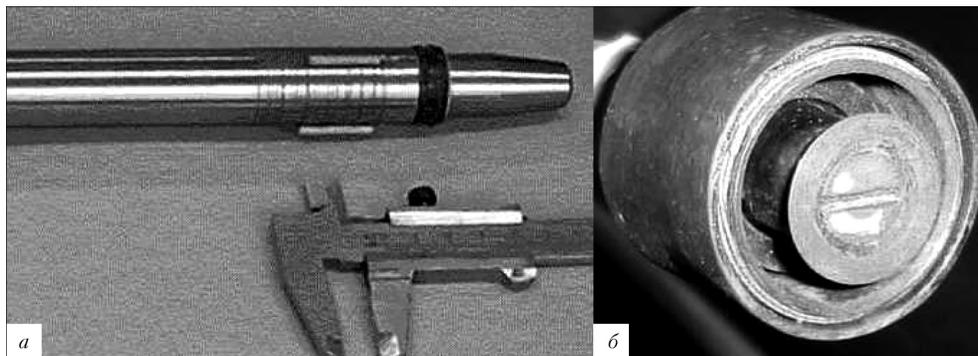


Рис. 3. Устройства и источники металлических ионов (а) диаметром 20 мм и ионов аргона (б)

С целью изучения влияния воздействия высокого напряжения на структуру покрытия хрома процесс его нанесения выполнялся на разных режимах [8]: при нулевом потенциале на поверхности конденсации; периодической подаче высокого напряжения на поверхность конденсации; при периодической подаче высокого напряжения на поверхность конденсации в середине процесса нанесения покрытия.

Структура поверхности хромового покрытия, полученного без подачи напряжения на поверхности конденсации, имеет зерна хрома, вытянутые перпендикулярно поверхности конденсации (столбчатая структура). Подача высокого напряжения на поверхность конденсации на некоторое время в середине процесса приводит к приостановке роста зерен и формированию мелкозернистой структуры. Это объясняется тем, что при этом начинается процесс распыления покрытия, возникает множество локальных дефектов, которые при дальнейшем нанесении покрытия выполняют роль центров кристаллизации. В результате формируется мелкозернистая структура, которая затем постепенно переходит в крупнозернистую столбчатую структуру. Покрытие хрома, полученное при периодической подаче высокого напряжения на поверхность конденсации, имеет многослойную структуру с зернами хрома, значительно меньшими, чем в покрытии, полученном без его подачи на поверхность конденсации. Такая структура покрытия обладает более высокими защитными свойствами против коррозии, вызванной внешней средой.

Эксплуатационные свойства деталей с покрытиями существенно зависят не только от материала покрытия, но и способа его нане-

сения. Результаты исследования структуры покрытий и переходной зоны покрытие — основной металл показывают [9], что в приповерхностных слоях практически всегда имеются готовые зародыши разрушения, причем чем больше твердость покрытия и склонность его к хрупкому разрушению, тем опаснее становятся любые дефекты в виде несплошностей и пор [10]. Вязкость разрушения (трещиностойкость) неоднозначно изменяется при нанесении покрытий различными методами. Известно, что усталостные трещины (в том числе и термоусталостные) зарождаются обычно на поверхности изделия. Поэтому важно знать характер влияния покрытия на кинетику термоусталостного разрушения.

В работе [11] приведены результаты исследований по выбору оптимального метода защиты внутренней поверхности деталей, подверженных одновременно износу, наклепу, микрорезанию, от образования микротрещин в результате термической усталости металла с признаками газовой эрозии. Покрытия из хрома наносили различными методами: гальваническим осаждением в ванне с перемешиванием электролита (ГП «Завод им. В. А. Малышева»), гальваническим осаждением по струйной технологии (СМНПО им. М. В. Фрунзе), путем разложения хромоорганического соединения «БАРХОС» (НИЦ ХФТИ) и методом ионно-плазменного осаждения путем использования электродугового испарителя металлов с радиальными потоками плазмы (НПП «Техноинвест-спектр»).

При исследовании трещин термической усталости на внутренней поверхности деталей установлено, что в деталях с ионно-плазмен-

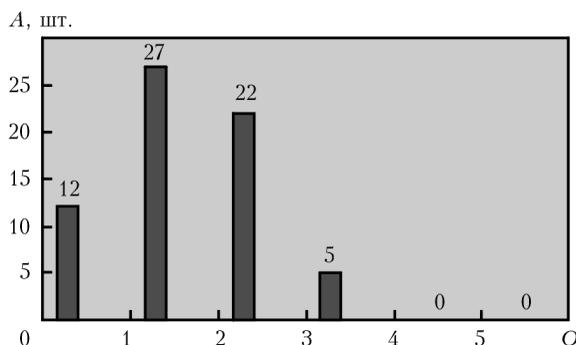


Рис. 4. Количество трещин (А) на внутренней поверхности детали на длине 10 мм в зависимости от способа обработки (Q) [11]: 1 — основной металл без покрытия; 2 — гальваническое хромирование по технологии ПП «Завод им. Малышева»; 3 — гальваническое хромирование по технологии СМНПО им. М. В. Фрунзе; 4 — хромирование разложением соединения «БАРХОС»; 5 — ионно-плазменное покрытие по типовой технологии; 6 — ионно-плазменное покрытие по усовершенствованной технологии

ным покрытием они отсутствуют (рис. 4) в то время, как детали с гальваническим покрытием имеют в 1,8...2,2 раза больше трещин, чем детали до его нанесения [11]. Это обусловлено тем, что в покрытиях, полученных конденсацией в вакууме, присутствуют напряжения сжатия, которые повышают усталостные свойства материала, а в гальванических покрытиях — растягивающие напряжения, которые могут снижать предел усталости стали вплоть до 60 % [12].

Как видно из рис. 5, после 1200 циклов нагрузки для покрытия, полученного разложением соединения «БАРХОС», и после 1500 циклов гальваническим осаждением по технологии СМНПО им. М. В. Фрунзе, кривые износа практически параллельны кривой износа исходного материала, что свидетельствует о полном износе хромового покрытия. В то же время ионно-плазменное покрытие имеет минимальный удельный износ и после 1500 циклов нагрузки.

Таким образом, разработанное оборудование и технология пригодны для авиационной, нефтеперерабатывающей, горнодобывающей и других отраслей промышленности, где поверхности деталей подвергаются коррозионному или эрозионному износу, требуют уменьшения трения сопрягаемых деталей или предотвращения схватывания трущихся поверхностей. Эта технология легко может быть

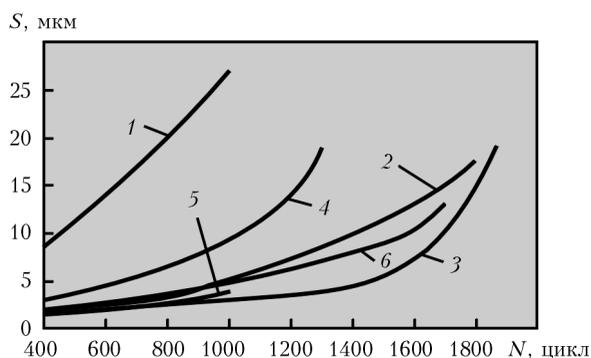


Рис. 5. Степень износа хромовых покрытий в зависимости от способа их нанесения и количества циклов нагрева [11]: 1–6 — то же, что на рис. 5

использована для нанесения не только хрома, но и других металлов и их сплавов в качестве покрытий, а также обеспечивает возможность управления их свойствами в процессе получения. 🍷

1. Аксенов И. И., Андреев А. А., Брень В. Г. и др. Покрытия, полученные конденсацией плазменных потоков в вакууме (способ конденсации с ионной бомбардировкой) // Укр. физ. журн. — 1979. — 24, № 4. — С. 515–525.
2. Гринченко В. Т. Нанесение покрытий взамен гальванических // Тр. постояннодействующего науч.-техн. семинара «Электровакуумная техника и технология». — 1999. — С. 51–57.
3. Надтока В. Н. Эрозия орудийных стволов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2006. — № 4. — С. 16–22.
4. Yee F., Wotzak M., Cipollo M. L., Traszowska K. Cylindrical magnetron sputtering in a ferromagnetic cylinder // Fall News Bulletin SVC. — 2004. — P. 28–34.
5. Parker A. P. Autofrettage of open-end tubes — pressures, stresses, strains and code comparisons, ASME // J. Pressure Vessel Technol. — 2001. — 123, № 3. — P. 271–281.
6. Garrett W., Sherman A. J., Stiglich J. B. Rhenium as a hard chrome replacement for gun tubes // Materials and Manufacturing Proc. — 2006. — 21, № 6. — P. 618–620.
7. Coatings for extended gun barrel life / Alameda applied sciences / <http://www.dawnbreaker.com/vasQ5/docs/Alameda-Brief.pdf>.
8. Відпрацювання технологій зміцнення каналу ствола із застосуванням іонно-плазмового осаджування хрому: (Науково-технічний звіт) // ДПКБ «Південне». — № 21.15919.077. — Дніпропетровськ, 2007. — 60 с.
9. Тушинский Л. И., Плохов А. В. Методы исследования материалов. — М.: Мир, 2004. — 383 с.
10. Кристал М. А. Исследование дефектов, возникающих при образовании покрытий, поверхностном упрочнении и эксплуатации деталей машин большого ресурса // Пробл. прочности. — 1981. — № 3. — С. 84–90.
11. Долматов А. И., Богуслаев А. В. Повышение жизненного цикла оснастки на основе защитных технологий. — Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2001. — 296 с.
12. Ройх И. Л., Колтунова Л. Н., Федоров С. Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. — М.: Машиностроение, 1976. — 367 с.