

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОДЛОЖКИ ПРИ НАНЕСЕНИИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПРЕЦИЗИОННЫЕ ДЕТАЛИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Лойко В.А., к.т.н.

Белорусский государственный аграрный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

Ивашко В.С., д.т.н., профессор

Гродненский государственный аграрный университет, г. Гродно, Республика Беларусь

Вакуумно-плазменные технологии нанесения покрытия выгодно отличаются от методов наплавки и газотермического напыления экологичностью, относительно низкой температурой процесса, малой толщиной слоя порядка нескольких десятков микрометров и равномерностью его нанесения на поверхности, сохранением исходной шероховатости.

Эти технологии позволяют наносить для упрочнения деталей машин и металлорежущего инструмента в одном технологическом цикле как твердые износостойкие слои на основе твердых карбидов и нитридов переходных металлов Yа-YIa группы Периодической системы элементов и их композиций, так и тонкие слои твердых смазок типа MoS₂, улучшающие триботехнические характеристики контактирующих пар трения [1].

Вакуумно-плазменная технология достаточно широко применяется для упрочнения режущего инструмента и технологической штамповой и прессовой оснастки основного производства. Учитывая сказанное, следует предполагать, что данная технология перспективна для упрочнения и восстановления прецизионных деталей сельхозмашин и автотракторной техники. Эти детали, как правило, из качественных конструкционных углеродистых или легированных цементированных сталей, термообработаны на твердость 42-56 HRC. Учитывая то, что нанесение вакуумно-плазменного покрытия является финишной операцией восстановления или упрочнения прецизионных деталей, предельная температура этих объектов не должна превышать критическую температуру фазовых превращений, приводящих к потере поверхностной твердости или короблению, т. е. 200-300 °С в зависимости от марки стали.

По существу происходящих на поверхности инструмента процессов ионную бомбардировку можно условно разделить на два этапа: ионную очистку бомбардировкой ионами металла и собственно нанесение покрытия.

Первый этап характеризуется разрушением поверхностных адсорбированных и окисных пленок, причем эффективность этого процесса определяется энергией ионов (зависящей от заряженности иона и его массы), временем воздействия, массой нейтральных частиц, углом атаки ионного потока по отношению к бомбардируемой поверхности, скоростью относительного перемещения бомбардируемой поверхности и потока. Эффективность процесса разрушения зависит также от состояния адсорбционных и окисных пленок, характеризуемого их плотностью и коэффициентом распыления.

Затем следует непосредственный (физический) контакт ионного потока с поверхностью детали и передача кинетической энергии бомбардирующих частиц.

Воздействие заряженных ионов на поверхность носит «избирательный» характер. При энергиях ионов, достаточных для разрушения поверхности (режим распыления), вначале разрушаются наиболее слабые поверхностные структуры (пики микронеровностей, границы зерен, цементитная фаза, микропоры и т. д.), затем идет разрушение мартенситных

зерен или карбидной фазы. При малом времени воздействия (до 1 минуты) наблюдается выравнивание рельефа, его сглаживание. Кроме того, поверхности микровыступов подвергаются стохастическому воздействию дуговых электрических разрядов и эрозионно разрушаются. Особенно сильному воздействию подвергаются границы зерен, цементирующая фаза и микропоры. Воздействие на карбидную фазу (твердые сплавы) и мартенситные зерна (быстрорежущая сталь) менее выражено. Расчет глубины воздействия ионов титана, хрома, церия, тантала, молибдена, гафния, ниобия и вольфрама, имеющих атомный вес от 47,90 (титан) до 180,9-183,85 (тантал, вольфрам), показал, что глубина воздействия указанных ионов не превышает $10\text{-}100 \text{ \AA}$. Причем нарушения в виде зон смещения наиболее характерны для бомбардирования ионами тяжелых металлов; бомбардировка ионами легких металлов приводит к нарушениям тепловой природы.

Одновременно за счет передачи импульсов кинетической энергии бомбардирующих частиц возрастает температура детали (рисунок 1)

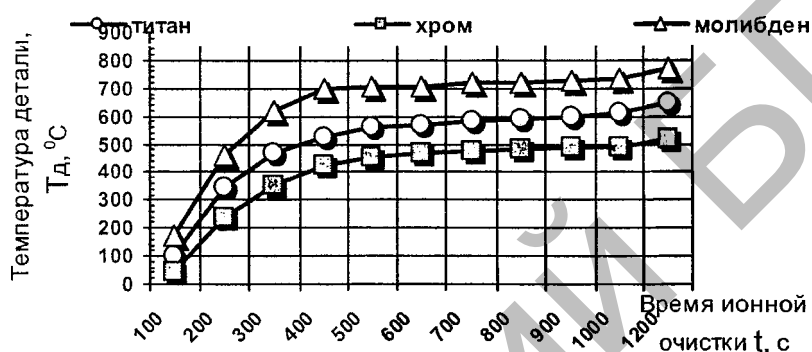


Рисунок 1 – Типичные зависимости температуры поверхности детали от времени обработки ускоренными ионами Ti, Cr, Mo при потенциале на подложке -1700 В

Из рисунка следует, что с течением времени ионной очистки температура образцов возрастает, достигая насыщения при некоторой температуре, причем интенсивность повышения температуры определяется массой образца, площадью поверхности и сортом бомбардирующих ионов. Из этого следует, что бомбардировка ионами металла жесткий процесс, сопровождающийся трудноконтролируемым ростом температуры деталей. Опыт упрочнения режущего инструмента показывает, что на стадии ионной очистки инструмент мог быть опущен на низкую твердость несмотря на то, что контролируемая интегральная температура не превышала $0,5 T_{omn}$. Следовательно, из процесса упрочнения или восстановления прецизионных деталей следует исключить очистку бомбардировкой ионами металла и заменить более «мягко» и контролируемой обработкой ускоренными в специальных источниках до энергии 4-10 кЭВ ионами нейтрального газа Ar [2].

В технологических плазменных устройствах наряду с ионной компонентной генерируются также капли металла с размерами от 0,1 до 3 мкм, причем их содержание зависит от теплофизических характеристик испаряемого металла и может достигать десятков %. Микрокапельные частицы приносят на поверхность энергию кристаллизации, выделение которой на поверхности детали приводит к неконтролируемому росту температуры. Присутствие конденсированных микрокапельных частиц на поверхности прецизионных деталей недопустимо, поэтому целесообразно использовать тугоплавкие металлы (Mo) или применять специальные плазмосепарирующие устройства [1].

На стадии нанесения покрытия характер взаимодействия потока заряженных частиц с поверхностью и протекание физико-химических процессов изменяются. При этом существенно влияние относительной атомной массы ионов и атомов твердого тела, теплофизи-

ческих констант материала восстанавливаемой детали, дозы ионов, угла падения потока, заряда ионов и от энергии ионов. Ионизация исходных компонентов обеспечивает высокую эффективность протекания химических реакций при достаточно низкой температуре поверхности конденсации, свойства покрытий определяются при этом в значительной степени параметрами ионного компонента плазмы. Проведенные исследования показали, что в диапазоне энергий $8 \times 10^{-2} < E < 10^{+2}$ эВ реализуется термическая активация поверхности, в диапазоне $10^{-1} > E > 10^{+3}$ эВ, наблюдается десорбция атомов примесей. наблюдается два одновременно протекающих на поверхности твердого тела и конкурирующих между собой физико-химических процессов распыления и конденсации [3]. Одновременно изменяется начальная температура образца (рисунок 2).

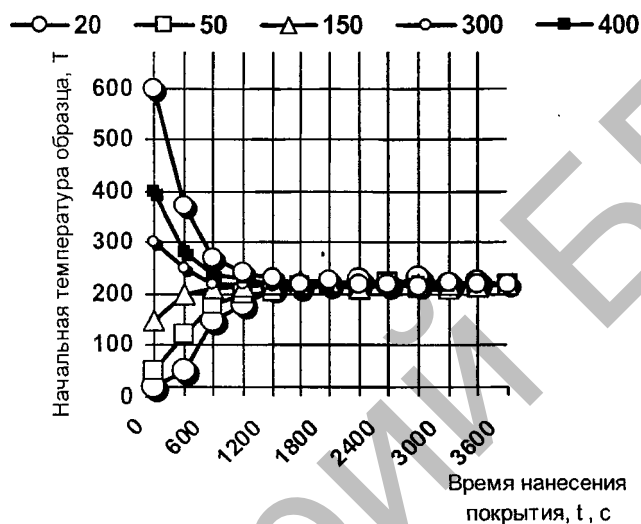


Рисунок 2 – Характер изменения температуры образца в течение процесса нанесения покрытия на основе молибдена в зависимости от начальной температуры

Характер изменения температуры в процессе осаждения покрытия определяется начальной температурой, массой и поверхностью образца и условиями конденсации. При этом температура может как уменьшаться, так и возрастать, ее изменение во времени носит монотонный характер, может быть легко проконтролирована и скорректирована с учетом предельно допустимой температуры детали.

Вероятность формирования слоя химического соединения термодинамически зависит от баланса энергии на поверхности, следовательно, от температуры детали в процессе нанесения покрытий. Поэтому целесообразно оценить возможность получения нитридов при низких температурах 200-300 °C.

Энергия конденсируемых ионов определяется начальной энергией ионов в генерируемом потоке и их дополнительным ускорением, при подключении подложки к источнику отрицательного смещения. Проанализируем условия синтеза нитридов и карбидов путем рассмотрения баланса энергии [4] с учетом того, что в основном свойства соединений определяются содержанием в них неметалла:

В стационарном режиме удельный поток энергии содержит следующие слагаемые:

а) кинетическая энергия потока ионов:

$$W_k = \frac{j}{Z_e} (\epsilon_0 + Z_e U) = \frac{j}{Z_e} \epsilon_i,$$

где j – плотность ионного тока, Z – средний заряд ионов в плазменном потоке, ε_0 – средняя энергия ионов в плазменном потоке, U – потенциал подложки, ε_i – средняя энергия конденсируемых ионов;

б) потенциальная энергия ионов:

$$W_{in} = \frac{j}{Z_e} (Uz - Ze\varphi),$$

где $uz = \sum_1^{\varphi} U_z n_z / \sum_1^{z_{\max}} n_z$ – средний потенциал ионизации (U_z – потенциал Z -кратной ионизации, n_z – плотность ионов с зарядом $e \cdot Z$), φ – работа выхода электронов;

в) энергия конденсации нейтрализованных атомов:

$$W_c = \frac{j}{Z_e} \cdot \frac{\Delta H_{Me}}{N},$$

где ΔH_{Me} – энергия сублимации одного грамм-атома металла, N – число Авогадро;

г) энергия экзотермической химической реакции образования соединений:

$$W_x = n_E \frac{\Delta H_{Mex}}{N},$$

где n_E – скорость образования молекул соединения на единичной площади подложки, ΔH_{Mex} – теплота образования одного моля соединения.

Потери подводимой энергии включают:

а) излучение подложки:

$$E_0 = \varepsilon(T) \sigma T^4,$$

где $\varepsilon(T)$ – коэффициент излучения, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T – абсолютная температура поверхности конденсации;

б) теплопроводность контакта между деталью и подложкодержателем:

$$E_r = L \cdot \frac{T \Delta T}{R_r},$$

где L – постоянная Видемана-Франца, ΔT – разность температур образца и подложкодержателя, R_r – переходное сопротивление контакта;

в) распыление слоя покрытия потоком ионов с высокой энергией:

$$E_p = \frac{j}{Z_i} K(U) E_a,$$

г) нагрев реакционного газа:

$$E_g = \alpha \frac{P}{\sqrt{MT_0}} (T - T_0),$$

где P – давление легирующего газа, M – молекулярный вес газа, T_0 – температура газа.

Необходимым условием образования соединения является превышение потока энергии на подложку по отношению к ее расходу на величину энергии активации Q . Энергию активации можно представить в первом приближении в виде энергии ионизации исходных компонентов [4]:

$$Q = \frac{j}{Z_i} \frac{\Delta H_{Mi}}{N} + n_k \frac{\Delta H_x}{N}$$

где n_k – скорость поступления недиссоциированных атомов молекул неметалла, ΔH_x – энергия диссоциации одного моля реактивного газа.

Следовательно, при конденсации в вакууме потока металлической плазмы для стационарного случая условие образования химического соединения будет описываться следующим выражением:

$$\frac{j}{Z_e} \left[\varepsilon_0 + Z_e U + U_z - Z_e \varphi - K(U) E \alpha \right] + n_E \frac{\Delta H_{Mex}}{N} + W$$

$$\varepsilon(T) \sigma T^4 - L \frac{T \Delta T}{R_r} - \alpha \frac{P}{\sqrt{M T_0}} (T - T_0) = n_k \frac{\Delta H_x}{N}.$$

Таблица 1 – Экспериментальные значения для расчета условий синтеза тугоплавких материалов системы $Ti+N_2$, $Cr+N_2$ и $Mo+N_2$

Условия конденсации	Наименование компоненты		
	Ti + N ₂	Cr + N ₂	Mo + N ₂
φ	6	6	6
P , Па	$6,65 \times 10^{-1}$	$3,39 \times 10^{-1}$	1,064
T , °C	180	150	180
ΔT , °C	50	100	150
R_r , Ом	2×10^{-3}	2×10^{-3}	6×10^{-3}
ε_0 , эВ	60 (10)	80 (10)	140 (10)
Z	2,86 (10)	2,57	1,79 (10)

Используя экспериментальные данные таблицы и сведения [5], целесообразно некоторые члены выражения опустить и представить его в виде:

$$n_r = \frac{N}{\Delta H_x} \left[\frac{j}{Z_r} (\varepsilon_0 + Z_r U) - \varepsilon(T) \alpha T^4 - L \frac{T \Delta T}{R_r} \right].$$

Из данного выражения следует, что содержание неметалла в конденсате является линейной функцией энергии ионов металла и растет до тех пор, пока поступающий на подложку поток молекул неметалла не будет связан в конденсате полностью. Следовательно, существует определенное значение ε (и соответственно U), при величинах которых происходит полное взаимодействие потока неметалла. Подставив экспериментальные данные (таблица 1) рассчитываем энергетические границы образования тугоплавкого покрытия для систем $Ti + N_2$, $Cr + N_2$ и $Mo + N_2$, которые равны соответственно 150, 159 и 187 эВ. Результаты этих вычислений хорошо согласуются с экспериментальными значениями, равными 150, 160 и 190 эВ.

Следовательно, согласно расчетным и экспериментальным данным, в целесообразном диапазоне 200-300⁰C для нанесения вакуумно-плазменных покрытий на прецизионные детали при восстановлении или упрочнении поверхностей нет термодинамических ограничений формированию покрытий из нитридов титана, хрома и молибдена.

Для реализации процесса рекомендуется модернизированная установка «Булат-6» (рисунок 3). Устройство включает (рисунок 3) электродуговой испаритель 1, установленный на входе в тороидальный плазмод 2, который присоединен к вакуумной камере установки «Булат-6» по оси поворотного приспособления планетарного типа 5 с закрепленными прецизионными деталями типа «вал», «ось». По оси системы с противоположной стороны камеры расположен источник 7 ионов «Аида-2», контроль температуры реализует пирометрический индикатор 8 с обратной связью. Предварительная очистка в камере установки осуществляется при помощи ионного источника «Аида-2». После прохождения между электродами источника в условиях намагниченности электронов, атомы нейтрального газа аргона ионизируются, ускоряются до энергии 2-6 кэВ и, бомбардируя поверхность де-

тали, вызывают эффекты десорбции физически и химически адсорбированных примесей, активацию и очистку от различного рода загрязнений. При ионной очистке происходит не только активирование и нагрев изделия, но и начинается формирование зоны с переходной от подложки к покрытию структурой, обеспечивающей высокую адгезионную прочность покрытия.

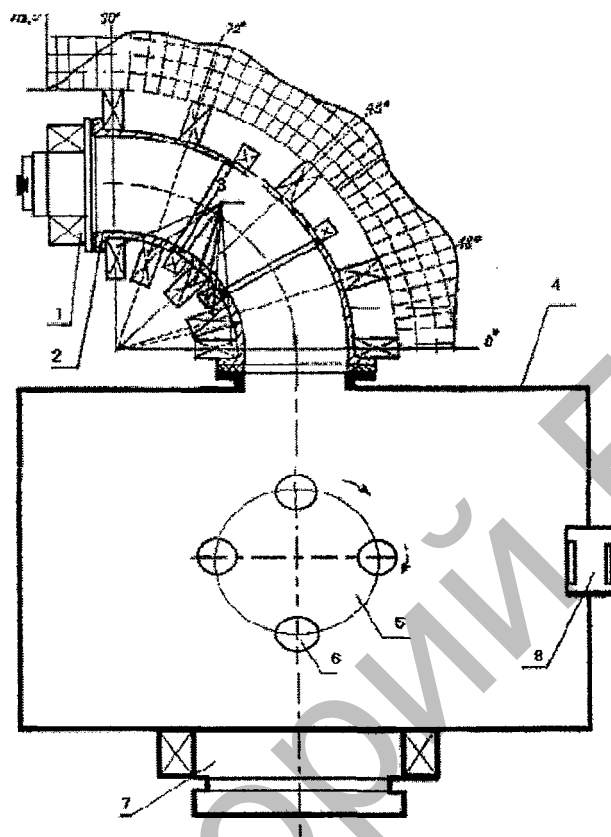


Рисунок 3 – Схема оснащения вакуумной камеры модернизированной установки «Булат-6»: 1 – электродуговой испаритель; 2 – плазмовод; 3 – электромагнитные линзы; 4 – камера установки «Булат-6»; 5 – технологическая оснастка; 6 – обрабатываемые детали типа «вал», «ось»; 7 – ионный источник «Аида-2»; 8 – индикатор температуры

В электродуговом испарителе 1 возбуждается вакуумно-электродуговой разряд, развивающийся в парах материала катода. В процессе горения дуги поверхностные слои материала катода переводятся в ионное, плазменное состояние.

Формирующийся плазменный поток, содержащий при условии квазинейтральности положительные ионы материала катода с различным зарядом электроны и микрокапельную компоненту, ускоряется до энергии $50+80$ эВ после прохождения анода и попадает в корпус системы сепарации 2. Ионная компонента плазменного потока отклоняется в магнитном поле плазменных линз 3, движется вдоль оси системы и осаждается на детали 6, которые закреплены в технологической оснастке 5 на пути плазменного потока.

Вследствие высокой степени ионизации плазмы взаимодействие потока с поверхностью определяется энергией ионной компоненты, которую возможно регулировать в широких пределах путем изменения величины ускоряющего потенциала, подаваемого на изделие. Существенное преимущество метода конденсации с ионной бомбардировкой обуславливается, в первую очередь, высокой энергией плазменного потока, возбужденным состоянием его компонентов и заключается в том, что при низких температурах основы

изделия (200+250 °С) при подаче в вакуумную камеру реакционного газа азота или углеводорода наблюдается протекание на поверхности конденсации плазмохимических реакций прямого синтеза нитридов и карбидов тугоплавких металлов, что не требует высоких температур и длительного времени для их синтеза при использовании традиционных методов. Образующаяся тонкая (1...10 мкм) пленка нитрида или карбида металла прочно сцепленная с основой, полностью повторяет конфигурацию поверхности, на которую наносится покрытие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лойко, В. А. Вакуумно-плазменные технологии в ремонтном производстве. /В.А. Лойко [и др.]. – Минск: Издание УО «БГАТУ», 2007. – 191 с.
2. Низкотемпературные плазменно-вакуумные процессы и материалы для упрочнения инструмента и оснастки. Лойко В.А. В кн. «Материалы, технологии, инструмент». Ассоциация «НОМАТЕХ». – г. Гомель: «ИНФОТРИБО», 1996 г.
3. Численное моделирование температурного поля подложки при вакуумно-плазменном нанесении износостойких покрытий / Лойко В.А., Михалькевич А.И., Якубеня А.А. В кн. «Вакуумные покрытия-88». – Минск, 1988 г.
4. Кадыржанов, К.К. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов / К.К. Кадыржанов, [и др.] – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 640 с.
5. Tonshoff H.K., Denkena B. Performance of ceramic cutting tool materials independence on their specific properties // Int. J. Refract. Metals and Hard Mater. – 1990. – 9, N 4 – P. 216-222.

Аннотация

Исследование температурного режима подложки при нанесении вакуумно-плазменных покрытий на прецизионные детали сельскохозяйственной техники

В статье приведен анализ возможности вакуумно-плазменной технологии в восстановлении и упрочнении прецизионных деталей сельскохозяйственной техники. Приведены графические зависимости температуры от времени ионной бомбардировки и нанесения покрытия. Обоснована температура восстанавливаемых деталей в процессе нанесения покрытия. Расчетные и экспериментальные данные подтвердили возможность получения нитридных покрытий при низких температурах. Приведена конструкция и описана работа устройства для нанесения покрытий на прецизионные детали.

Abstract

Substantiation of a temperature mode of a substrate at drawing vacuum plasma coverings on precision details of agricultural machinery

In article the analysis of an opportunity of vacuum-plasma technology in restoration and hardening of precision details of agricultural machinery is brought. Graphic dependences of temperature on time of ionic bombardment and drawing of a covering are brought. The temperature of restored details during drawing a covering is proved. Settlement and experimental data have confirmed an opportunity of reception coverings at low temperatures. The design is brought and work of the device for drawing coverings on precision details is described.