

---

УДК 621.789:621.7.073.004

А.Я. Мовшович<sup>1</sup>, А.В. Ряховский<sup>2</sup>, В.В. Косенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

<sup>3</sup> ГП «Харьковский НИИ технологии машиностроения», Харьков

## К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВ

*Рассмотрены различные способы нанесения упрочняющих покрытий на рабочие элементы штампов (ионно-плазменный метод, ионная имплантация, плазмохимическая имплантация, детонационно-газовый метод) и оценено влияние этих способов на повышение стойкости штампов. Установлены необходимые характеристики упрочняющих детонационных покрытий и определены наиболее перспективные покрытия.*

**Ключевые слова:** упрочняющие покрытия, ионно-плазменный метод, ионная имплантация, плазмохимическая имплантация, детонационно-газовый метод.

### Введение

Рабочие элементы штампов обычно изготавливаются из инструментальных сталей (У8, У10, ХВГ, Х12, Х12М, Х12Ф1). Основные недостатки этих сталей – обезуглероживание поверхностного слоя при термической обработке, анизотропия свойств по сечению деталей, повышенная чувствительность к флокенообразованию, склонность к отпускной хрупкости, сравнительно высокая стоимость. Перспективным направлением повышения стойкости штам-

пов является нанесение на их рабочие элементы упрочняющих покрытий вакуумно-плазменным и детонационно-газовым методами [1, 2].

В последнее время развивается новое направление вакуумно-плазменной технологии – ионная имплантация. Это процесс, при котором практически любой элемент может быть внедрен в приповерхностный слой твердого тела посредством пучка высокоэнергетических ионов (энергия ионов составляет от нескольких КэВ до десятков МэВ). Наиболее часто ионная имплантация используется

для повышения износостойкости и коррозионной стойкости материалов за счет образования упрочненного слоя, имеющего диффузионное сцепление с основой без ярко выраженной поверхности раздела. Толщина этого слоя может значительно превышать глубину пробега ионов (при энергии ионов 0,1 МэВ толщина составляет 0,1 мкм).

### Основной раздел

В свою очередь, ионно-плазменное нанесение покрытий в вакууме – наиболее эффективный процесс, так как позволяет получить слой, толщина которого измеряется в микрометрах и который является принципиально новым материалом с высокой прочностью, износостойкостью, твердостью и в то же время эластичностью. Однако полученный материал (покрытие) имеет адгезионное сцепление с основой, а не диффузионное.

Таким образом, наиболее перспективным способом является сочетание технологий ионной имплантации и ионно-плазменного нанесения покрытий заданного газового состава и толщины. С этой целью вакуумный ионно-плазменный метод нанесения покрытий трансформируется в метод плазмохимической имплантации, имеющий следующие основные преимущества:

- глубокая газовая диффузия (от 0,05 до 0,3 мм в зависимости от температуры подложки);
- диффузия испаряемого металла в поверхностные слои основы (от 0,05 до 0,3 мм в зависимости от температуры подложки);
- получение переходного по структуре слоя в основном материале, на который затем наносится покрытие с заданными, в том числе особыми свойствами.

Предпосылкой для разработки метода плазмохимической имплантации служат следующие положения. При использовании вакуумного ионно-плазменного способа нанесения покрытий при постоянной площади «активной зоны» мощность теплового потока определяется выражением

$$M=U_{on} I, \quad (1)$$

где  $U_{on}$  – опорное напряжение;  $I$  – ионный ток.

Наибольшее влияние на состояние поверхности оказывает кинетическая энергия ионного потока

$$W=I/Z \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где  $Z$  – средняя кратность заряда;  $\varepsilon$  – средняя энергия ионного потока.

В табл. 1 приведены параметры ионной составляющей плазменного потока материалов, наиболее часто используемых в вакуумно-плазменных технологиях.

Таблица 1

Параметры ионной составляющей плазменного потока материалов

Материал	Атомная масса	Средняя кратность заряда	Степень ионизации	Средняя энергия ионов, эВ	Ионный ток, А
		%			
Титан	47,9	2,05	50	75,93	2
Цирконий	91,92	2,33	50	93,24	2,3
Молибден	95,24	2,35	90	151,56	4,5

В результате подстановки указанных величин в формулы и расчета по этим формулам установлено, что кинетическая энергия и мощность теплового потока ионов молибдена больше, чем, например, у титана, в 4 и 2 раза соответственно. Чем выше степень ионизации испаряемого материала, тем больше плотность ионного потока.

Сравнительные испытания на статический изгиб образцов из термообработанной стали X12M и таких же образцов, подвергнутых бомбардировке ионами титана и хрома (энергия активации 113,13 и 129,89 кДж/моль соответственно) показали, что во втором случае прочность образцов повышается на 27 и 13% соответственно. После имплантации, не прерывая вакуумного процесса, наносят покрытие.

Технологический процесс нанесения ионно-плазменных покрытий является многопараметрическим. Каждый из параметров (или их сочетание) мо-

жет оказать влияние на базовый состав, структуру и свойства покрытия. Выделение количественной связи между параметрами ионно-плазменного процесса, с одной стороны, и базовым составом и структурой покрытия, с другой стороны, позволяет направленно изменять их свойства и, в конечном счете, управлять работоспособностью упрочняемого изделия. Так, изменение только одного параметра – давления в вакуумной камере – при осаждении многослойного и монослойного покрытий на основе нитрида титана изменяет фазовый состав по количеству нитридов следующим образом: в монослойном покрытии среднее содержание титана и нитрида титана составляет 15 и 85%, в многослойном – 47 и 54% соответственно.

Монослойное покрытие из-за большой толщины и твердости отличается значительной хрупкостью и может разрушиться в результате вибрации и ударов при работе. Многослойное покрытие по прочностным

характеристикам соответствует условиям обработки металлов штамповкой, однако стойкость инструмента с таким покрытием может быть ниже стойкости инструмента с монослойным покрытием, так как единичные твердые слои многослойного покрытия всегда тоньше износостойкого слоя монослойного покрытия и располагаются на мягкой фазе.

В связи с этим возникает необходимость разработки процесса получения многослойных покрытий большей плотности, близких по фазовому составу к монослойным покрытиям. С этой целью исследовали изменение толщины покрытия в зависимости от величины опорного напряжения  $U_{op}$  при различных давлениях  $p$  в вакуумной камере. Установлено, что вначале при повышении опорного напряжения толщина покрытия увеличивается при любом рабочем давлении в вакуумной камере и достигает своего максимума, когда  $U_{op} = 100 \div 150$  В. При дальнейшем повышении опорного напряжения толщина покрытия уменьшается и будет тем меньше, чем ниже  $p$ . Так, при  $p = 10^{-3}$  Па уже при  $U_{op} = 400$  В покрытие не образуется, а при  $U_{op} > 400$  В происходит распыление поверхности. Аналогично протекает процесс и при  $p = 10^{-2}$  и  $p = 10^{-1}$  Па, однако распыление поверхности происходит при  $U_{op} = 670 \div 700$  В и при  $U_{op} > 1600$  В.

Полученные зависимости толщины покрытия от опорного напряжения и давления в вакуумной камере позволили разработать принципиально новый технологический процесс нанесения многослойных покрытий, обладающий стабильными особыми свойствами. Полученное новым способом покрытие на основе нитрида титана представляет собой конструкцию, состоящую из сотен тончайших, чередующихся по твердости слоев. Химический состав покрытия, определенный путем сравнения интегральных интенсивностей интерференционных линий титана и нитрида титана, состоит из 7–9%  $\alpha$  Ti и 93–91%  $\gamma$  Ti, имеет плотность 6,18 г/см<sup>3</sup> и микротвердость порядка 37 ГПа. Нанесение такого покрытия на формообразующие элементы штампов увеличило их износостойкость в 2,1–2,4 раза.

Таким образом, сочетание ионной имплантации и вакуумного ионно-плазменного покрытия трансформировано в процесс плазмохимической имплантации, позволяющей повысить износостойкость, прочность и коррозионную стойкость формообразующих элементов штампов.

Перспективными материалами для изготовления рабочих элементов штампов являются углеродистая качественная сталь 45 и низкоуглеродистая конструкционная сталь 40X. Следует отметить, что сталь 40X обладает чувствительностью к флокенообразованию и имеет склонность к отпускной хрупкости, однако этот недостаток проявляется у нее в значительно меньшей степени, чем у высоколегированных штам-

повых сталей. Кроме того, благодаря хорошей прокаливаемости стали 40X обеспечиваются достаточно высокие механические характеристики практически по всему сечению детали. Износостойкость сталей 45 и 40X довольно низкая, однако ее можно повысить путем применения детонационно-газового упрочнения.

Наиболее опасным местом в матрице вытяжного (гибочного, формовочного) штампа является так называемая перетяжная кромка вследствие действия высоких контактных напряжений – до 300 МПа (для стали с 0,06% С) и перемещения (скольжения) металла по поверхности матрицы под этой нагрузкой.

Нагрузки, возникающие на режущих кромках рабочих элементов разделительных штампов, напрямую зависят от прочности вырубемого материала и его толщины. Расчеты показывают, что примерно на каждые 0,25 мм увеличения толщины вырубемого материала напряжение на кромке пуансона увеличивается на 0,03–0,05  $\sigma_s$ . Это обстоятельство существенно ограничивает применение детонационных покрытий для упрочнения режущих кромок разделительных штампов.

Исходя из действующих нагрузок на рабочих поверхностях деталей штампов, определяем необходимые характеристики упрочняющих детонационных покрытий:

*для вытяжных, гибочных и формовочных штампов:* твердость покрытий не менее 500 Н; адгезионная прочность – не ниже 100 МПа, при этом прочность покрытия на сдвиг составит примерно 250 МПа, что более чем в 3 раза превышает тангенциальные напряжения; толщина покрытия – 150 – 250 мкм; покрытие должно быть износостойким, хорошо противостоять контактной усталости, иметь низкий (до 0,15) коэффициент трения скольжения;

*для разделительных штампов:* твердость покрытий не менее 800 Н; адгезионная прочность – не ниже 200 МПа, при этом прочность на срез –  $\tau \cdot p = 500$  МПа; толщина покрытия – 200 – 300 мкм; покрытие должно обладать высокой износостойкостью и стойкостью к механическим ударам.

На основании требуемых рабочих характеристик определены наиболее перспективные упрочняющие детонационные покрытия:

*для вытяжных, гибочных и формовочных штампов – материалы на основе Ni, Cr, В, Nti, (ПТ-19Н-01, ПГ-10Н-01), стеллиты (ВЗК), а также интерметаллиды типа NiAl (ПН701-030);*

*для разделительных штампов – материалы на основе тугоплавких карбидов типа WC и Cr3C2 с металлическими связующими (ВК-10, ВК-20, КХН-30, КХНХ-30).*

Эти материалы обеспечивают максимальные значения твердости, адгезионной прочности, а также минимальный уровень остаточных напряжений, преимущественно сжимающих, являющихся предпочтитель-

ними. При отработке режимов детонационно-газового упрочнения для отобранных порошковых материалов предварительно была проведена оптимизация режимов стрельбы по разработанной математической модели, а также экспериментально подобраны режимы нанесения покрытий. В качестве критериев оптимизации принимали адгезионную прочность, твердость покрытия, его толщину, напыляемую за единичный выстрел, коэффициент исполнения порошка.

Служебные характеристики опытных упрочняющих покрытий определяли при испытании специально изготовленных образцов, которые подвергали детонационно-газовому упрочнению по оптимальным режимам с использованием установки «АДУ-Обь».

Адгезионную прочность определяли по штифтовой методике с использованием конических штифтов, твердость – по методу Виккерса, усталостную прочность – по схеме «пульсирующего контакта» на специальном испытательном стенде, коэффициент трения скольжения – на разрывной машине усилием  $P = 5$  кН по схеме, приведенной в работе [3].

Анализируя результаты испытаний упрочняющих детонационно-газовых покрытий, можно сделать следующие выводы:

твердость всех испытанных покрытий соответствует требованиям, предъявляемым к штампам; наибольшей твердостью в 1-й группе покрытий обладает ПР-К60Х30ВС, во 2-й группе – ВК-10;

адгезионная прочность находится на уровне, обеспечивающем требуемую работоспособность штампа; лучшую адгезию обеспечивают покрытия ПТ-19Н-01, ПГ-10Н-01 (в 1-й группе) и ВК-20 (во 2-й группе);

наибольшей усталостной прочностью обладают покрытия ПР-К60Х30ВС и ПГ-10Н-01;

наименьший коэффициент трения скольжения при нагрузке  $P = 0,75P_{max}$  имеет покрытие ПН701-030, а при  $P = P_{max} = 300$  МПа – покрытие ПГ-10Н-01.

Таким образом, по совокупной оценке служебных характеристик оптимальным упрочняющим

покрытием в группе металлических покрытий следует считать ПГ-10Н-01, а в группе металлокерамики – ВК-20.

Применение детонационно-газового метода для упрочнения рабочих элементов штампов позволяет увеличить в 1,5 – 2 раза износостойкость их рабочих поверхностей, снизить на 10 – 15% усилие вытяжки, заменить дорогостоящую инструментальную сталь на более дешевую конструкционную.

В результате математической обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получена эмпирическая зависимость для определения оптимальной стойкости режущих элементов штампов с упрочненными рабочими поверхностями:

$$CT = 61,5 \cdot 10^3 \cdot K_c \cdot K_n / t^{0,32} \sigma^2 \text{в}, \quad (3)$$

где СТ – износостойкость, тыс.шт.;  $t$  – толщина металла, мм;  $\sigma \text{в}$  – предел прочности штампующего материала, Па;  $K_c$  – коэффициент, учитывающий уменьшение стойкости при изготовлении деталей сложной конфигурации,  $K_c = 0,7$ ;  $K_n$  – коэффициент, учитывающий повышение износостойкости при использовании упрочняющих покрытий,  $K_n = 1,5 \div 2,8$ .

## Список литературы

1. Буденный М.М. Повышение ресурса и надежности деталей машин методом детонационно-газового напыления упрочняющих покрытий / М.М. Буденный, В.И. Власенко, А.Я. Мовшович // Вестник национального технического университета «ХПИ»: Сборник научных трудов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2001. – №11. – С. 94-98.

2. Горелик Б.В. Современное состояние и перспективы развития вакуумно-плазменной обработки / Б.В. Горелик // Резание и инструмент в технологических системах: Международный научно-технический сборник. – Х.: ХГПУ, 2000. – № 58. – С. 81-85.

3. Тушинский Л.И. Исследование структуры и физико-химических свойств покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 322 с.

Поступила в редколлегию 21.07.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Чумаченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ШТАМПІВ

О.Я. Мовшовіч, О.В. Ряховський, В.В. Косенко

*Розглянуті різні способи нанесення зміцнюючих покриттів на робочі елементи штампів (іонно-плазмовий метод, іонна імплантація, плазмохімічна імплантація, детонаційно-газовий метод) і оцінений вплив цих способів на підвищення стійкості штампів. Встановлені необхідні характеристики зміцнюючих детонаційних покриттів і визначені найбільш перспективні покриття.*

**Ключові слова:** зміцнюючі покриття, іонно-плазмовий метод, іонна імплантація, плазмохімічна імплантація, детонаційно-газовий метод.

## TO QUESTION OF INCREASE OF WEARPROOFNESS OF WORKINGS ELEMENTS OF STAMPS

A. Ya. Movshovich, A. V. Ryakhovskiy, V. V. Kosenko

*The different ways of causing of consolidating coverages are considered on the workings elements of stamps (ion-plasma method, ionic імплантація, плазмохімічна імплантація, detonation-gas method) and influence of these methods is appraised on the increase of firmness of stamps. Necessary descriptions of consolidating detonation coverages are set and the most perspective coverages are certain.*

**Keywords:** consolidating coverages, ion-plasma method, ionic імплантація, плазмохімічна імплантація, detonation-gas method.