

алюминия – оксидокерамика – карбид хрома» в 1,7-3 раза превышала долговечность 2,3 имели аналогичных образцов из материала основы, выполненных без покрытий.

В целом проведенные в ИНДМАШ НАН Беларуси исследования в области создания и использования многослойных композиционных покрытий на основе металло-керамических систем на деталях, работающих в условиях многоциклового нагружения с созданием растягивающе-сжимающих изгибных напряжений и интенсивного изнашивания, показали перспективность использования разработанных подходов для значительного повышения ресурса их работоспособности и улучшения служебных характеристик узлов и изделий в целом.

**Литература.** 1. Мардосевич Е.И. Создание и использование металлокерамических покрытий на деталях приводов зацеплением.// Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов. / Под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Мн.: Технопринт, ПГУ, 2001. – 736с. 2. Басинюк В.Л., Белоцерковский М.А., Г.В.Макаревич. Новые композиционные материалы и покрытия для трущихся сопряжений вибромашин.//Периодический сборник научных трудов «Обработка дисперсных материалов и сред. Теория, исследования, материалы, оборудование». Выпуск №10.- Одесса: НПО «ВОТУМ», 2000.- с.43-46.

УДК 624.793:621.797

М.А. Белоцерковский, А.В. Федаравичус, В.Л. Басинюк

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ И ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ

*Институт надёжности машин НАН Беларуси  
Минск, Беларусь*

### **Введение**

Для снижения материалоемкости, веса конструкций и уменьшения шума при работе исполнительных механизмов в промышленности широко используют полимерные материалы, обладающие малой удельной массой и высокой способностью гасить виброакустические колебания [1,2]. Однако, низкие механические свойства не позволяют их широко применять при изготовлении опор скольжения и виброизолирующих элементов. Очевидно, что наиболее эффективным путем повышения механических свойств поверхности лобного материала является формирование на ней покрытий с требуемым уровнем служебных характеристик.

Среди методов нанесения защитных покрытий в последнее время широкое распространение получили газотермические [1]. Их основные достоинства: нанесения различных материалов (полимеров, металлов, сплавов, керамики) и их сочетаний на поверхности различной формы и размеров, а также получение покрытий с заданными функциональными эксплуатационными характеристиками.

### **Состояние вопроса**

В настоящее время параллельно с технологией нанесения покрытий развивается технология создания композиционных материалов, формируемых из дисперсных полимеров [2]. В частности, ряд процессов получения слоистых композиций, например, металлополимерных систем, основывается на технических приемах, используемых в технологии покрытий. Наиболее экономичным и эффективным путем решения проблем,

связанных с необходимостью повышения механических свойств полимеров, является использование технологии газопламенного напыления (ГПН). Оборудование для ГПН универсально, имеет малый вес и габариты, может эксплуатироваться в нестационарных условиях.

Следует отметить, что формирование композиционных покрытий газотермическим напылением металлических частиц на полимерные подложки является относительно новым и недостаточно исследованным процессом. Изучение теплофизики ГПН металлов на полимерные подложки при создании комбинированных металлополимерных систем ранее не проводилось и представляет собой задачу, без решения которой невозможна разработка технологического процесса.

### Постановка задачи

Целью исследований явилась разработка технологических рекомендаций по созданию металлополимерных комбинированных систем газопламенным напылением. Для её достижения необходимо было решить следующие задачи:

- 1) Провести теоретическую оценку процесса накопления тепла при контакте расплавленных частиц легкоплавких металлов с полимерными подложками;
- 2) Исследовать влияние технологических факторов и разработать рекомендации по ГПН металлов на полимерные подложки.

### Теоретическое обоснование

Известно, что в формировании газотермических покрытий тепловые явления играют ведущую роль, а эксплуатационные параметры создаваемых композиций определяются теплофизическими процессами, сопровождающими взаимодействие компонентов. В данном случае основное внимание уделяли теплонагруженности полимерной подложки, поскольку специфика изучаемого процесса (локализованность температурной зоны, небольшие размеры частиц расплава и толщина покрытия, высокие скорости изменения температуры, возможность термодеструкции легкоплавкой подложки и т.д.) существенно затрудняет получение необходимой информации на основе проведения только натуральных опытов.

Процесс взаимодействия расплавленной частицы с подложкой можно представить в виде кратковременного воздействия точечного теплового источника с плоскостью. Одним из методов решения подобных линейных задач теплопроводности является метод источников (метод функций Грина), широко используемый в теории сварочных процессов при расчёте распространения тепла при нагреве. Однако метод функций Грина до настоящего времени не применялся при решении задач о контактной температуре в процессе напыления покрытий.

Допустим, что теплопроводящее тело (полимерная подложка) находится при постоянной температуре  $T_0$ , которую можно принять за нулевую. В начальный момент времени в элементарный объём тела вносится определённое количество тепла  $Q$  (расплавленная частица), которое повышает температуру элементарного объёма над постоянной температурой тела. В момент контакта расплавленной частицы с подложкой происходит нагрев и расплавление последней. Затем расплавленная частица перемещается вглубь на некоторое расстояние  $L$ . Следовательно, полимерный слой должен иметь определённую допустимую толщину  $[\delta] \geq L$ . Необходимая глубина полимерного слоя, на которую распространяется тепловой поток от капли, определится следующим образом [3]:

$$\delta \geq [\delta] = N \sqrt{at \cdot \ln \left[ K \frac{R^3 \rho_1}{6c_p} (c_1 T + \lambda_1) \right]}; \quad (1)$$

где  $\delta$  - необходимая толщина слоя, м;  $N$  - коэффициент, равный  $4,2 \div 4,5$ ;  $t$  - время, прошедшее с момента контакта капли с температурой  $T$  распрыскаемого металла с полимерным слоем до распространения теплоты вглубь него, с;  $R$  - радиус капли распрыска-

жге металла,  $m$ ;  $\rho_1$ ,  $c_1$ ,  $\lambda_1$  - удельная масса ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), удельная теплоемкость ( $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{град}$ ) и удельная теплота плавления ( $\text{Дж}/\text{кг}$ ) металла соответственно;  $a$ ,  $c$ ,  $\rho$  - температуропроводность ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), удельная теплоемкость ( $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{град}$ ) и удельная масса ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) полимерного слоя соответственно;  $K$  - коэффициент, равный  $1,15 \cdot 10^{11} (\text{м}^3 \cdot \text{град})^{-1}$ .

Разработка технологических рекомендаций

Цель технологического процесса ГПН - создание на поверхности детали слоя с заданными параметрами и свойствами, необходимыми для длительной и надёжной работы изделия при определённых условиях его эксплуатации. Как уже было отмечено, при ГПН металлов на полимерные подложки следует учитывать ряд технологических особенностей, связанных со спецификой данного процесса.

1) Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что повышенная температура плавления напыляемого металла ( $T_m$ ) и пониженная температура плавления легкоплавкой подложки ( $T_n$ ) ограничивают применение материалов для создания комбинированных металлополимерных (рис.1, а). Из графика, представленного на рис. 1. а видно, что при напылении металлических частиц на полимерную подложку должно соблюдаться следующее условие:

$$T_m / T_n \leq 2,5; \quad (2)$$

2) Температура напыляемой поверхности - основной параметр, определяющим свойства покрытия. Так как возникает опасность перегрева и деструкции полимерной подложки, то при напылении металлов на легкоплавкую основу необходимо использовать принудительное периодическое охлаждение покрытия. На рис. 1, б представлена последовательность напыления, заключающаяся в периодическом принудительном охлаждении полимерной подложки ( $T_{\text{подл}}$ ).

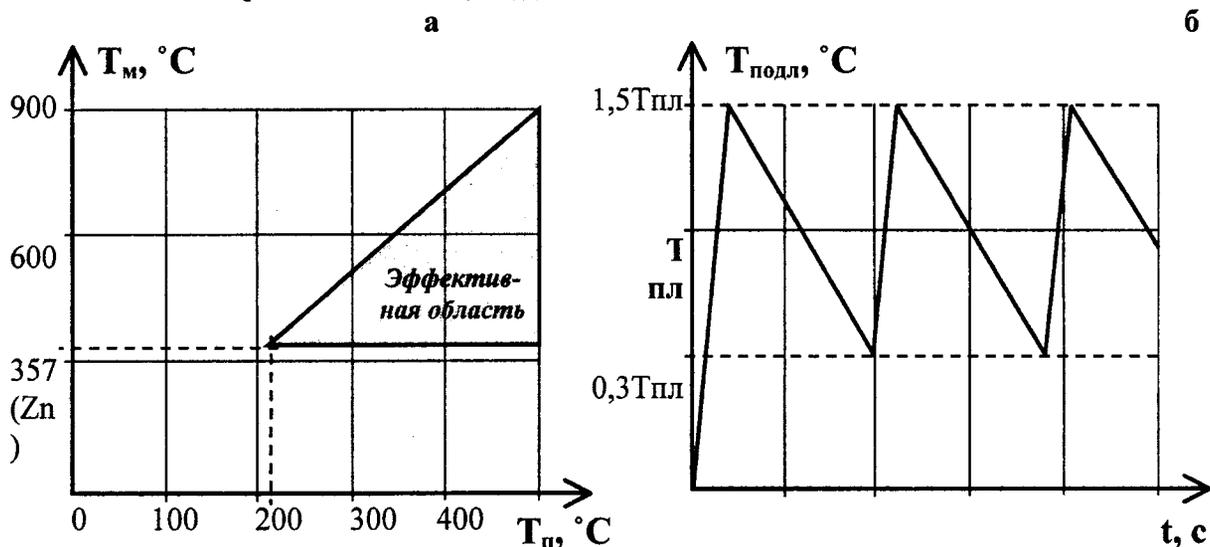


Рис.1. Эффективная температурная область (а) и последовательность напыления (б)

3) Основными технологическими параметрами, позволяющими управлять свойствами газопламенных покрытий, являются режимы напыления. Известно, что расход распыляющего воздуха ( $G$ ,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ) влияет на фракционный состав напыляемых частиц, а значит в соответствии с (1) и на толщину подложки (рис.2).

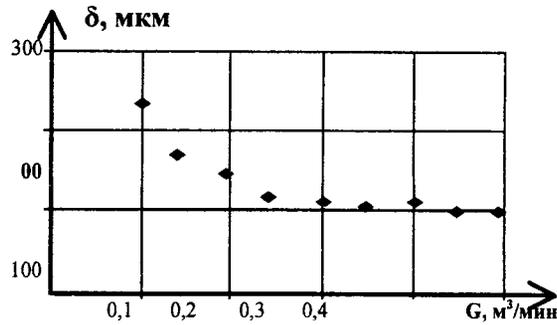


Рис.2. Зависимость толщины полимерной подложки от расхода воздуха, распыляющего алюминиевую проволоку

### Результаты экспериментов и обсуждение

Используя полученные результаты, разработана технология формирования металлокерамических покрытий на поверхностях деталей из термопластичных полимеров [3], в основу которой положены процессы газопламенного напыления легкоплавких металлов и последующей микроплазменной обработки. На основе предложенной технологии в Институте надежности машин НАН Беларуси созданы опоры скольжения и виброизолирующие элементы с повышенными эксплуатационными характеристиками [4,5,6].

В указанных технических решениях комбинированная металлополимерная композиция содержит последовательно расположенные слои: стальную основу, слой термопластичного полимера, слой легкоплавкого металла и слой оксидокерамики. Толщины слоев определяются из эмпирически полученных зависимостей, учитывающих особенности теплофизических, технологических и химических параметров слоев и технологий их формирования.

В результате комплекса экспериментальных испытаний и теоретических исследований установлено следующее:

1) Вибрации опор скольжения и виброизолирующих элементов снижены на 4-6 дБ в диапазоне частот 500-6000 Гц. При этом детали устойчивы к воздействию касательных напряжений, приводящих к сдвигу.

2) Толщина полимерного слоя зависит от технологических режимов нанесения последующего металлического слоя. Чем больше размер частиц напыляемого металла и их температура, тем большую толщину должен иметь полимерный слой, чтобы не разрушиться от теплового воздействия частиц, падающих на его поверхность.

3) Для формирования слоев выбран метод газопламенного напыления, поскольку именно этим способом с наибольшей эффективностью на поверхностях различных конфигураций можно формировать покрытия из легкоплавких металлов толщиной от двух десятков микрон до нескольких миллиметров, не перегревая при этом материал подложки и повторяя ее профиль. Нанесение слоя металла с помощью газопламенного напыления при заданных соотношениях толщин слоев не разрушает слой полимера, поскольку полимер не нагревается выше  $1,5T_{пл}$ . При этом формируется композиция с высокой прочностью сцепления между слоями.

4) Жесткость полимерного и металлического слоев достаточна для упругопластической деформации без разрушения поверхностного оксидокерамического слоя при нормальном, по отношению к наружной поверхности, локализованном нагружении.

5) Исследования прочности на сдвиг в окружном направлении и виброизолирующих свойств показали высокие надежность, износостойкость и виброизолирующие свойства, в комплексе превышающие свойства известных аналогов.

*Проведён теоретический анализ и выполнены экспериментальные исследования, на основе которых разработаны технологические рекомендации по созданию опор скольжения и виброизолирующих элементов на основе комбинированных металлополимерных систем с повышенными эксплуатационными характеристикам.*

**Литература.** 1. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс: Пер. с немецкого. – М.: Машиностроение, 1966. – 432 с. 2. Довгяло В.А., Юркевич О.Р. Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров. Технологические процессы. – Мн.: Наука и техника, 1992. – 256 с. 3. Положительное решение по заявке № 2000111045/28(011673) кл. МПК 7 F 16 C 33/00, 33/12. Композиционная опора скольжения и способ её изготовления / Берестнев О.В., Басинюк В.Л., Кирейцев М.В., Белоцерковский М.А., Федаравичус А.В. 4. Патент РБ на полезную модель № 424 по заявке № и 20010142, кл. МПК 7 F 16 H 1/48. Редуктор / Белоцерковский М.А., Басинюк В.Л., Федаравичус А.В., Кирейцев М.В. 5. Патент РБ на полезную модель № 425 по заявке № и 20010143, кл. МПК 7 F 16 C 33/26. Композиционная опора скольжения / Белоцерковский М.А., Басинюк В.Л., Федаравичус А.В., Кирейцев М.В. 6. Положительное решение по заявке № и 20020022, кл. МПК 7 F 16 H 1/48. Редуктор / Белоцерковский М.А., Федаравичус А.В., Сухоцкий П.Г.

УДК 621.9.048

**В.И. Шпорт, А.М. Злыгостев, В.И. Якимов**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ПОЛУЧЕНИЯ ИСХОДНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Комсомольское-на-Амуре  
авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина»  
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Процесс получения большого количества однотипных сквозных отверстий в листовых деталях электроэрозионным способом (электроэрозионное перфорирование) широко распространен в различных отраслях машиностроения при производстве решеток, сит, фильтров и т.д. [1]. Как правило, обработка этих деталей ведется сборными многоэлементными электродами, каждый отдельный элемент которых в сечении повторяет профиль обрабатываемого отверстия с корректировкой размеров на величину рабочего бокового зазора и бокового износа. В зависимости от требований предъявляемых к геометрии отверстий и перемычек между ними, а также материала обрабатываемой детали, выбирается и материал электрода – инструмента (ЭИ).

При изготовлении панели защитного устройства (ПЗУ), применяемого в конструкции современных летательных аппаратов, для получения большого количества квадратных отверстий размером 2,5×2,5 мм и перемычкой между соседними 0,55 мм использован метод электроэрозионного перфорирования (ЭЭП) [2]. Деталь – сварная конструкция из продольных и поперечных ребер. Материал – титановый сплав ВТ20; толщина перфорируемого листа 1,8 мм. Ось отверстий наклонена к плоскости панели на угол 60°. Рабочий ЭИ представляет собой сборную конструкцию, состоящую из 28