

УДК 621.793

**ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ ТЕМПЕРАТУР НАГРЕВА  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ НАПЫЛЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ  
МЕТОДОМ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗА МАФ**

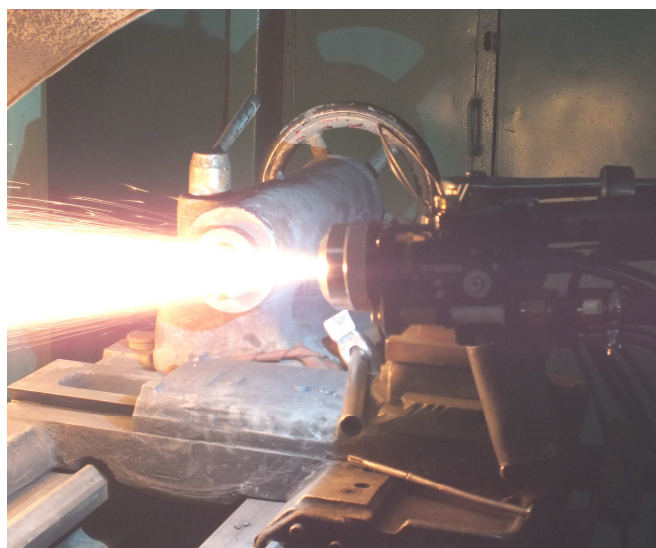
*д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ; канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ*  
*(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);*  
**Д.И. ТРУСОВ**  
*(Белорусский национальный технический университет, Минск);*  
**А.П. ЯЛОВИК**  
*(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк)*

*Демонстрируются результаты исследования, показывающие перспективы использования газа МАФ взамен пропана при нанесении металлических покрытий методом гиперзвуковой металлизации при формировании распыляющей высокотемпературной струи. Предложена методика расчета допустимой температуры нагрева цилиндрических деталей при гиперзвуковой металлизации.*

**Ключевые слова:** *стальные покрытия, гиперзвуковая металлизация, термическое расширение, прочность сцепления, газ МАФ.*

**Введение.** В различных отраслях промышленности существует множество проблем, связанных с защитой изделий от воздействия высоких температур, коррозии, с повышением износостойкости элементов конструкций, ремонтом и восстановлением в течение всего срока их эксплуатации. Применение технологий формирования защитных покрытий, среди которых газотермические процессы сегодня занимают лидирующее место, является одним из кардинальных путей решения данных вопросов. Используя существующие в настоящее время оборудование, материалы и технологии газотермического напыления, возможно уменьшить или исключить полностью влияние таких процессов, как изнашивание при трении, эрозия, коррозия (в том числе высокотемпературная), абразивное изнашивание, кавитация и др. Кроме чисто защитных функций, рассматриваемые покрытия могут иметь и другое предназначение – создание термобарьера, обеспечение электроизоляционных свойств, поглощение излучения продуктов радиоактивного распада, обеспечение определенных оптических свойств, реализация селективного смачивания, создание биологически активных поверхностных свойств для различных искусственных органов и многое другое.

Одним из наиболее экономичных и эффективных способов нанесения высокоплотных металлических покрытий является гиперзвуковая металлизация [1]. Формирование покрытий данным способом (рис. 1) осуществляется путем распыления материала расплавленных в электрической дуге проволок высокоскоростной струей продуктов сгорания воздушно-пропановой смеси.



**Рисунок 1 – Установка гиперзвуковой металлизации в процессе напыления покрытий стальными проволоками**

Главная отличительная особенность гиперзвуковой металлизации – наличие малогабаритной высокоэффективной камеры сгорания воздушно-пропановой смеси, сверхзвуковая струя которой на выходе из камеры имеет скорость до 1500 м/с при температуре 1850 °С, что позволяет частицам расплавленного металла разогнаться в потоке до 500 м/с и формировать покрытие, имеющее плотность и прочность сцепления в 2...3 раза выше, чем при традиционной электродуговой металлизации. Такие особенности процесса гиперзвуковой металлизации позволяют получать высокоплотные покрытия с пористостью 1...4% и прочностью сцепления 45...60 МПа [2].

**Исследование возможности использования газа МАФ.** Требования современного производства к ремонтно-восстановительным технологиям постоянно возрастают, особенно в плане повышения качества покрытий и производительности нанесения при сохранении экономической эффективности. В связи с этим были проведены исследования по повышению динамических и теплофизических параметров распыляющей струи при гиперзвуковой металлизации.

Основным критерием, определяющим качество напыляемых покрытий, является скорость потока распыляющего расплавленного металла. Чем выше скорость потока, тем выше скорость распыляемых частиц металла и, соответственно, выше плотность, твердость покрытия, а также его прочность сцепления с основой. Максимальная скорость струи газа на срезе сопла при гиперзвуковой металлизации определяется по следующей формуле [3]:

$$w_1 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ 1 - \beta_2^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура в камере сгорания, К;  $k$  – показатель адиабаты;  $R$  – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $\beta_2 = \frac{P_2}{P_1}$ ,  $P_2$  и  $P_1$  – давление в среде (атмосфере) и камере сгорания соответственно.

Анализ расчетов, выполненных с использованием выражения (1) и данных о влиянии начальных параметров состояния распыляющего газа на термодинамические характеристики двухфазной струи [4], свидетельствует о том, что основными параметрами, влияющими на степень диспергирования материала проволочных электродов и скорость частиц, являются давление  $P_1$  и температура  $T$  газа в камере сгорания металлизатора. Таким образом, наиболее рациональным путем повышения скорости распыляющей струи является увеличение ее температуры.

Для повышения температуры предложено использовать в качестве горючего газа МАФ (метилацетиленалленовая фракция), который представляет собой смесь метилацетилена и аллена (пропадиена). Характеристики газа МАФ в сравнении с пропаном представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Сравнительные характеристики газов МАФ и пропана**

| Газ    | Тепло-содержание, ккал/м <sup>3</sup> | Удельный вес, кг/м <sup>3</sup> | Предельная температура пламени, °С, в смеси с: |          | Термический КПД относительно |      | Отношение кислорода к горючему газу при нормальном пламени |                            | Теплота разложения молекул, ккал/кг |
|--------|---------------------------------------|---------------------------------|--|----------|------------------------------|------|--|----------------------------|-------------------------------------|
|        |                                       |                                 | кислородом                                     | воздухом | стали                        | меди | м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>                             | м <sup>3</sup> /10000 ккал |                                     |
| Пропан | 22 160                                | 2,01                            | 2 500  | 1 925    | 0,46                         | 0,57 | 3,5  | 1,68                       | -560                                |
| МАФ    | 21 200                                | 1,70                            | 3 020  | 2 165    | 0,54                         | 0,63 | 2,2  | 1,04                       | +290                                |

Как видно из таблицы 1, газ МАФ имеет температуру горения с воздухом на 240 градусов выше, чем у пропана. В то же время для горения газа МАФ необходимо на 30% меньше кислорода, чем при горении пропана, что способствует снижению окисления распыляемого металла.

Для проведения исследования был разработан аппарат гиперзвуковой металлизации АДМ-12, использующий МАФ в качестве горючего газа для создания распыляющей струи.

Опытные образцы покрытий напыляли проволокой из стали 30ХГСА. В качестве подложки использовали пластинки, изготовленные из стали 20 с размерами 20×30×4 мм. Толщина напыляемого покрытия составляла 1,7...2,0 мм. Давление воздуха в процессе напыления – 0,4 МПа; давление МАФ – 0,5 МПа; величина тока – 210 А; дистанция напыления – 100...120 мм. Для сравнения на этих режимах напыляли образцы с использованием пропана в качестве горючего газа.

ДюрOMETрические исследования образцов обнаружили, что твердость покрытий при использовании пропана составляет 280...300 HV, твердость покрытий с использованием газа МАФ – 350...385 HV.

Исследования плотности покрытий с использованием системы Stereo Scan показали, что усредненные значения пористости при напылении с пропаном составляют 2,9%, а при напылении с МАФ – 2,2%. В то же время химический анализ полученных покрытий указывает на то, что при использовании газа МАФ в проволочном материале на 15...35% меньше выгорает углерод, марганец и хром (табл. 2).

**Таблица 2 – Результаты химического анализа покрытий, полученных методом гиперзвуковой металлизации при использовании различных горючих газов, образующих распыляющей факел**

| Горючий газ | Марка распыляемой стали | Содержание элементов в покрытии, % |     |     |     |     |        |                |
|-------------|-------------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------|----------------|
|             |                         | C                                  | Mn  | Cr  | Ni  | Si  | Fe     | другие примеси |
| Пропан      | 30ХГСА                  | 0,07                               | 0,4 | 0,7 | 0,1 | 0,8 | основа | 0,3            |
| МАФ         | 30ХГСА                  | 0,11                               | 0,5 | 0,8 | 0,1 | 0,8 | основа | 0,3            |

На основании полученных данных можно предположить, что благодаря увеличению плотности, снижению количества кислорода в продуктах сгорания, а также более мелкому распылу присадочного материала происходит возрастание твердости покрытий.

**Расчет допустимой температуры разогрева напыляемой цилиндрической детали.** Несмотря на высокие технические показатели технологии гиперзвуковой металлизации, в процессе напыления при несоблюдении необходимых режимов может произойти отслоение наносимых покрытий. Наиболее часто данная проблема возникает при напылении толстослойных стальных покрытий на тела вращения. Это связано с тем, что в процессе напыления происходит нагрев напыляемой детали, приводящий к ее термическому расширению. В то же время из-за разницы термического расширения материала детали и покрытия возникают напряжения, способствующие растрескиванию и отрыву покрытия от поверхности детали. Одна из основных причин данных дефектов – недостаточная прочность сцепления покрытия с основой. Учитывая этот фактор, возникла необходимость в аналитическом определении допустимой температуры разогрева детали в процессе ее напыления, исключающей отслоение покрытия.

В приведенном ниже расчете рассматривали напыляемую деталь с покрытием как двухслойный цилиндр (рис. 2).

В рассматриваемом покрытии происходит термическое расширение с увеличением диаметра внутреннего цилиндра на величину  $\Delta$ . При этом внутренний цилиндр давит на наружный с силой  $p$ , которая определяется по формуле (2) [5]:

$$p = \frac{\frac{\Delta}{2r_2}}{\frac{1}{E_1} \left( \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \left( \frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - \mu_2 \right)}, \quad (2)$$

где  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – модули упругости и коэффициенты Пуансона материалов внутреннего и наружного цилиндров соответственно;  $r_1$  и  $r_2$  – внутренний и наружный радиусы детали, мм;  $r_3$  – наружный радиус покрытия, мм;  $\Delta$  – величина линейного расширения на границе «деталь – покрытие», мм.

Величина линейного расширения на границе «деталь – покрытие» определяется как

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2, \quad (3)$$

где  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – температурное расширение материала детали и материала покрытия соответственно.

Температурное расширение материала детали и покрытия рассчитывается по формулам (4) и (5) [6]:

$$\Delta_1 = d_{o1}(1 + \alpha_1 \Delta T), \quad (4)$$

$$\Delta_2 = d_{o2}(1 + \alpha_2 \Delta T), \quad (5)$$

где  $d_{o1}$  – наружный диаметр детали;  $d_{o2}$  – внутренний диаметр покрытия, мм;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициент линейного теплового расширения материала детали и материала покрытия соответственно,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\Delta T = T_2 - T_1$  ( $T_2$  – температура нагрева детали с покрытием в процессе напыления;  $T_1$  – температура окружающей среды).

Зная силу, с которой подложка давит на покрытие, можно определить напряжения, стремящиеся оторвать покрытие от подложки [5]:

$$\sigma = \frac{p r_3^2}{r_1^2 - r_3^2} + \frac{p r_1^2 r_3^2}{r^2 (r_1^2 - r_3^2)}. \quad (6)$$

Таким образом, зная температуру нагрева напыляемой детали, можно определить напряжения отрыва покрытия от основы.

Экспериментальными исследованиями установлено, что гиперзвуковая металлизация позволяет нанести металлические покрытия с прочностью сцепления 45...50 МПа. Эти данные и результаты полученных расчетов позволяют определить допустимую температуру нагрева цилиндрической детали (рис. 2) в процессе напыления покрытия.

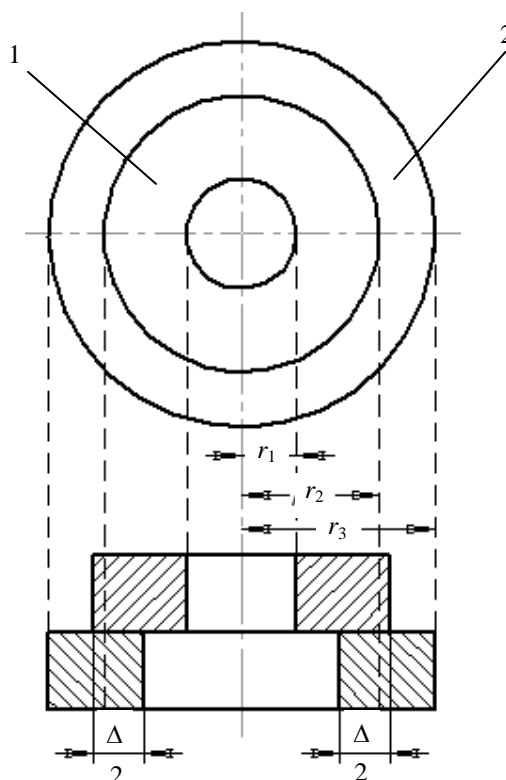


Рисунок 2 – Схема взаимодействия детали 1 и напыляемого слоя 2 в результате термического расширения

Анализируя практические результаты напыления металлических покрытий методом гиперзвуковой металлизации, в формулу (2) введен поправочный коэффициент  $k$ :

$$p = \frac{k \frac{\Delta}{2r_2}}{\frac{1}{E_1} \left( \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \left( \frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - \mu_2 \right)}, \quad (7)$$

при этом коэффициент  $k$  выбирается в диапазоне значений от 0,65 до 0,9.

Расчет допустимой температуры разогрева проверялся при восстановлении пиноли задней бабки станка 1А670 путем напыления покрытия из проволоки 30ХГСА методом гиперзвуковой металлизации, показанной на рисунке 3.

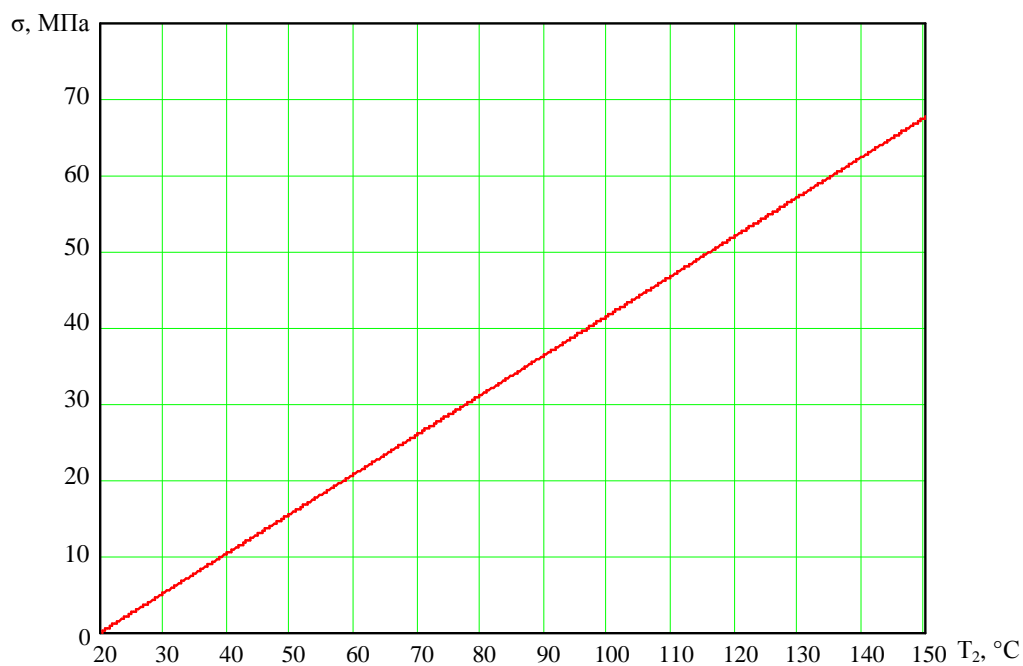
Диаметр пиноли составлял 360 мм; длина – 1,7 м; толщина наносимого покрытия – 3 мм.

В конце процесса напыления максимальная температура детали достигала 125 °С, в результате чего произошло отслоение покрытия от детали.



**Рисунок 3 – Процесс напыления покрытия методом гиперзвуковой металлизации на пиноль задней бабки станка 1А670**

При повторном напылении в соответствии с расчетами по указанным выше формулам температуру нагрева детали поддерживали не выше 100 °С, при этом отслоения покрытия не происходило, о чем свидетельствуют данные рисунка 4.



**Рисунок 4 – Результаты расчета величины напряжений отрыва покрытия ( $\sigma$ ) в зависимости от температуры нагрева детали ( $T_2$ ) в процесс напыления покрытия методом гиперзвуковой металлизации на пиноль задней бабки станка 1А670**

**Заключение.** Проведенные эксперименты показали, что использование МАФ в качестве горючего газа взамен пропана при формировании распыляющей высокотемпературной струи позволяет повысить твердость и плотность покрытий и является перспективным направлением в дальнейшем совершенствовании процесса напыления методом гиперзвуковой металлизации.

Предложена методика расчета допустимой температуры нагрева цилиндрических деталей при гиперзвуковой металлизации. Использование данной методики позволяет предотвратить отрыв покрытия в результате термического расширения детали при ее нагреве в процессе напыления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, М.А. Особенности и применение гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский // Белорусская инновационная неделя «Состояние и перспективы совместных белорусско-польских исследований в области упрочняющих и биотехнологий»: науч.-практ. семинар. – 2011. – 16–17 ноября. – Минск, 2011.
2. Витязь, П.А. Замена гальванического хромирования на технологию гиперзвуковой металлизации при ремонте деталей узлов трения скольжения / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Ремонт, восстановление, модернизация (Рос. Федерация). – 2010. – № 10. – С. 2–5.
3. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники / В.И. Ляшков. – М.: Машиностроение, 2008. – 319 с.
4. Белоцерковский, М.А. Методы и оборудование для формирования высокоэнергетических двухфазных потоков / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Физика плазмы и плазменные технологии (ФППТ-2): материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–19 сент. 1997 г.: в 4 т. / редкол.: В.С. Бураков (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 1997. – Т. 4. – С. 670–673.
5. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 590 с.
6. Миролюбов, И.Н. Пособие к решению задач по сопротивлению материалов / И.Н. Миролюбов, И.Н. Миролюбов, С.А. Енгальчев, Н.Д. Сергиевский. – М.: Высш. школа, 1967. – 483 с.

Поступила 29.01.2016

**ASSESSMENT OF ALLOWED HEATING TEMPERATURES  
OF CYLINDRICAL PARTS DURING DEPOSITION OF THE METAL COATING  
BY HYPERSONIC METALLIZATION USING MAF GAS**

***M. BELOTSERKOVSKY, A. SOSNOVSKY, D. TRUSSOVA, YALOVIK***

*The results of studies showing the prospects of using MFA gas instead of propane for applying metallic coatings by Hypersonic metallization in the formation of high-temperature spray jet are shown. The method of calculating the permissible temperature of heating cylindrical parts at hypersonic metallization is suggested.*

**Keywords:** *steel coating, hypersonic metallization, thermal expansion, adhesion strength, MFA gas.*