

## Влияние щеточной обработки на уровень остаточных напряжений в газопламенных покрытиях

*Украинская инженерно-педагогическая академия*

Представлены результаты экспериментальных исследований характера распределения и величины остаточных напряжений в газопламенных покрытиях, напыленных по традиционной технологии и с применением механической обработки щеточным инструментом слоев покрытия. Показано, что такая обработка обеспечивает возможность формирования покрытия с низким уровнем остаточных напряжений и высокой прочностью.

**Ключевые слова:** прочность напыленного слоя, интегрированное газопламенное напыление, остаточные напряжения.

**Введение.** Остаточные напряжения оказывают решающее влияние на прочность напыленного покрытия и его сцепление с подложкой, на сопротивление усталости и долговечность восстановленных и упрочненных деталей. Остаточные напряжения являются следствием термических условий напыления, различия теплофизических свойств материалов подложки и покрытия, фазовых превращений и др. Особенно опасны растягивающие напряжения, поскольку под их воздействием сдвиги начинаются при меньших усилиях, чем в случае напряжений сжатия. При этом напыленные покрытия преимущественно разрушаются под действием напряжений первого рода, которые уравниваются в их объеме. Уравнение [1], определяющее прочность соединения твердого упругого покрытия с основой, включает член в виде сложной функции от величины остаточных напряжений  $p$  в слое покрытия:

$$F_{\text{тт}} = W_{\text{тт}}(n-1)/r \pm f(p), \quad (1)$$

где  $F_{\text{тт}}$  – сила соединения отвердевшего покрытия с основой;

$W_{\text{тт}}$  – работа адгезии для границы раздела двух твердых тел;

$n$  – показатель, определяющий убыль граничных сил с расстоянием ( $n \approx 4$ )

$r$  – дальность действия электромагнитного поля притяжения между разрываемыми поверхностями.

Функция  $f(p)$  в свою очередь зависит от толщины покрытия  $h$ , радиуса  $R$  и знака закругления поверхности. Кроме того, подразумевается, что когезионная прочность самих материалов – покрытия и металла – превышает силу соединения на границе раздела (адгезионную прочность). В противном случае прочность конструкционной системы покрытие-основа сводится к механической когезионной прочности на разрыв более слабого материала. При высоких значениях  $f(p)$  величина  $F_{\text{тт}}$  может снизиться до нуля или даже оказаться отрицательной. Тогда покрытие самопроизвольно откалывается под действием внутренних срезающих и отрывающих сил.

При газопламенном напылении в покрытиях возникают остаточные напряжения растяжения, которые могут стать причиной появления трещин и разрушений, особенно при финишных операциях. На границе отвердевшего покрытия с металлом под действием остаточных напряжения сжатия или

растяжения всегда появляются силы, которые действуют касательно к поверхности (срезающие усилия) и ослабляют прочность соединения, т. к. частицы при этом стремятся сдвинуться относительно друг друга. Режимы нанесения покрытий существенно влияют как на кинетику формирования внутренних напряжений, так и на их остаточный уровень. Используя различные технологические приемы, можно получать покрытия с заданными характеристиками по напряжениям.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Одним из способов повышения прочностных свойств напыляемых газопламенных покрытий является разработка интегрированных технологий, объединяющих различные принципы воздействия на материал покрытия.

Использование известных технологических приемов, позволяющих регулировать остаточные напряжения в покрытиях, а следовательно, прочность сцепления, не всегда обеспечивает получение требуемых результатов. Дальнейшее повышение эксплуатационных свойств напыляемых покрытий, в частности для снижения уровня остаточных напряжений, возможно применением физико-механических способов воздействия – наложением колебаний, воздействием электрических разрядов и т.п. [2].

В последние годы для снижения остаточных напряжений II и III рода используют методы наложения различных колебаний на заготовку. При этом деталь подвергают вибрационному нагружению на частотах, равных или близких к собственной частоте системы «деталь — вибратор». Анализ работ по применению виброобработки [3] показал перспективность ее использования при нанесении плазменных покрытий и возможность рассматривать как один из физико-механических способов воздействия на внешний контур. Применительно к плазменному нанесению покрытий, при котором время кристаллизации напыляемых частиц  $10^{-7} \dots 10^{-4}$  с, влияние вибрации следует рассматривать с учетом ее воздействия на структуру напыленного материала. Приложение переменных напряжений, не превышающих предела усталости, позволяют обеспечить релаксацию напряжений. Следует отметить, что с использованием виброобработки предел выносливости стали 45 и угол наклона кривой разрушения к оси абсцисс увеличиваются, причем с ростом амплитуды и частоты обработки интенсивность этого процесса возрастает.

Аналогичные результаты релаксации остаточных напряжений растяжения и сжатия в напыленном покрытии были получены при его последующей дробеструйной обработке корундом [4]. Анализ результатов исследования остаточных напряжений в покрытиях после обкатки роликом, показал, что относительная степень деформации поверхностного слоя до 16,6 и 20 % приведёт к почти полному снятию растягивающих и росту сжимающих остаточных напряжений. При относительной степени деформации порядка 30% сжимающие остаточные напряжения уменьшаются, что объясняется частичным разрушением слоя и релаксацией напряжений.

**Целью исследований** является изучения возможностей и рационального применения механической обработки щеточным инструментом слоев газопламенного покрытия в процессе его формирования для снижения уровня остаточных напряжений, рассмотрения механизма их образования в уплотненных слоях и установление рациональных параметров щеточной обработки.

**Результаты исследований.** Для снижения уровня остаточных напряжений предлагается применить механический способ воздействия на внешний контур формирования газопламенных покрытий вращающейся металлической щеткой [5].

Щеточная обработка применена для обработки поверхности под напыление с целью получения требуемой шероховатости и напыляемых слоев покрытия в процессе их формирования для снятия частиц с низкой когезионной прочностью и окисных пленок, релаксации напряжений в напыленных покрытиях. Способ отличается универсальностью и небольшой стоимостью оборудования.

Эксперименты проводились на образцах стали 45 с покрытием из порошкового сплава ПГ-10Н-01, нанесенного традиционным газопламенным напылением и газопламенным напылением, совмещенным с обработкой вращающейся металлической щеткой. Изучалось влияние режимов щеточной обработки ( скорости вращения –  $n$ , об/мин, натяга  $N$ , мм, диаметра и длины игл –  $d_i$ , мм и  $l_i$ , мм) на величину и характер распределения остаточных напряжений в покрытии и на границе покрытие – основа.

Величину остаточных напряжений в напыленном слое и подложке определяли экспериментально по деформации образца в процессе постепенного удаления слоев. Для исследования остаточных напряжений в газопламенных покрытиях производили напыление призматических образцов размером 140×10×2 мм. Ширину  $b=10$  мм выбирали из условия постоянства напряжений по ширине образца ( $b \leq 15$  мм). Снятие напряженных слоев осуществлялось электрохимическим травлением. Состав электролита до 500 г NaCl на 1 л H<sub>2</sub>O, плотность тока при травлении 0,4-0,5 а/см<sup>2</sup>. поверхности образца, не подлежащие травлению, защищались лаком ХВЛ-21. Глубина травления определялась с помощью микрометра, как средняя величина 10-ти замеров по длине стержня. Деформация  $f$  призматических прямоугольных образцов в процессе травления определялись по метрологической схеме, изображенной на рис. 1, которая рекомендуется для длинных образцов ( $\ell/h \geq 30, \ell_k \approx h$ ) [6].

Расчет остаточных напряжений  $\sigma(a_i)$  в точке, относящей от поверхности покрытия на расстоянии  $(a_i)$ , производили по формуле

$$\sigma(a_i) = \frac{8E_1}{\ell^2} \left\{ f_1 [h - e(a_i) - a_i] + N(a_i) \frac{df}{da}(a_i) - (h - a_i) f(a_i) - \int_0^{a_i} M(\varepsilon) d\varepsilon \right\}, \quad (2)$$

где  $f_1$  - прогиб, вызванный раскреплением образца;

$e(a_i)$  - расстояние от приведенного центра тяжести сечения до поверхности, противоположной удаляемым слоям;

$h$  - высота напыленного образца;

$a_i$  - толщина удаленного слоя;

$f(a_i)$  - прогиб, вызванный удалением слоя;

$\ell$  - расстояние между точками опоры образца при замере прогибов.

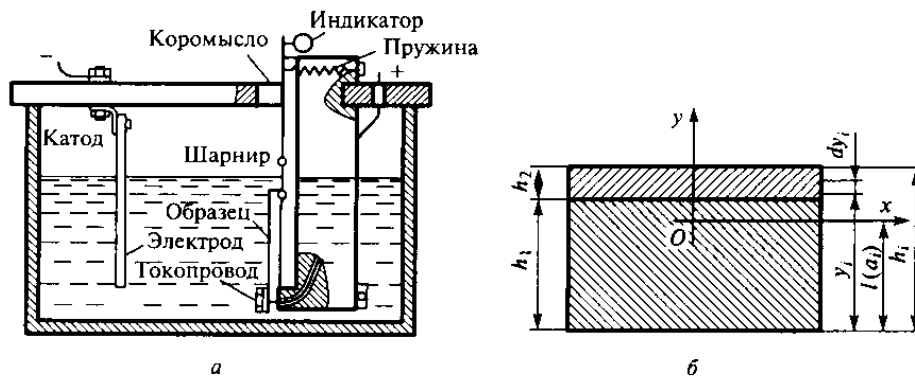


Рис. 1. Схема определения остаточных напряжений методом стравливания (а), сечение образца (б).

$$N(a_i) = \left\{ \frac{E_2}{E_1} \left[ (h_1 - e(a_i))^3 - e^3(a_i) \right] + [h - a_i - e(a_i)]^3 - [h_1 - e(a_i)]^3 \right\} / [h - e(a_i) - a_i], \quad (3)$$

где  $E_1, h_1$  - модуль упругости и толщина подложки;

$E_2, h_2$  - соответствующие значения для покрытия.

$$M(\varepsilon) = \left[ \frac{N(\varepsilon)}{h_1 \left( \frac{E_2}{E_1} - 1 \right) - (h - \varepsilon)} - e(\varepsilon) \right] \frac{df}{d\varepsilon}, \quad (4)$$

Для вычисления производной применяли параболическую аппроксимацию

$$\begin{aligned} \frac{df}{da}(a_i) &= f_{a_{i-1}} \left( \frac{-\Delta_i + 1}{\Delta_i (\Delta_i + \Delta_{i+1})} \right) + f_{a_i} \left( \frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{\Delta_i \cdot \Delta_{i+1}} \right) + \\ &+ f_{a_{i+1}} \left( \frac{-\Delta_i + 1}{-\Delta_{i+1} (\Delta_i + \Delta_{i+1})} \right) = f_{a_{i+1}} K_i^{(1)} + f_{a_i} K_i^{(2)} + f_{a_{i-1}} K_i^{(3)} \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta_i = a_i - a_{i-1}$  - толщина снятого слоя.

Эта формула справедлива для всех значений  $a_i$ , кроме двух крайних. Для начального значения  $i = 0, a_0 = 0, f_0 = 0$ .

$$\frac{df}{da}(0) = f_{a_1} \left( \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta_1 \Delta_2} \right) + f_{a_2} \left( \frac{-\Delta_1}{\Delta_2 (\Delta_1 + \Delta_2)} \right) = f_{a_1} K_0^{(2)} + f_{a_2} K_0^{(3)} \quad (6)$$

Для последнего слоя  $i = n$

$$\begin{aligned} \frac{df}{da}(a_n) &= f_{a_{n-2}} \left( \frac{\Delta_n}{\Delta_{n-1} (\Delta_{n-1} + \Delta_n)} \right) + f_{a_{n-1}} \left( \frac{-(\Delta_{n-1} + \Delta_n)}{\Delta_{n-1} \cdot \Delta_n} \right) + \\ &+ f_{a_n} \left( \frac{\Delta_n + (\Delta_{n-1} + \Delta_n)}{\Delta_n (\Delta_{n-1} + \Delta_n)} \right) = f_{a_{n-2}} K_n^{(1)} + f_{a_{n-1}} K_n^{(2)} + f_{a_n} K_n^{(3)} \end{aligned} \quad (7)$$

Интеграл вычисляем по правилу трапеции

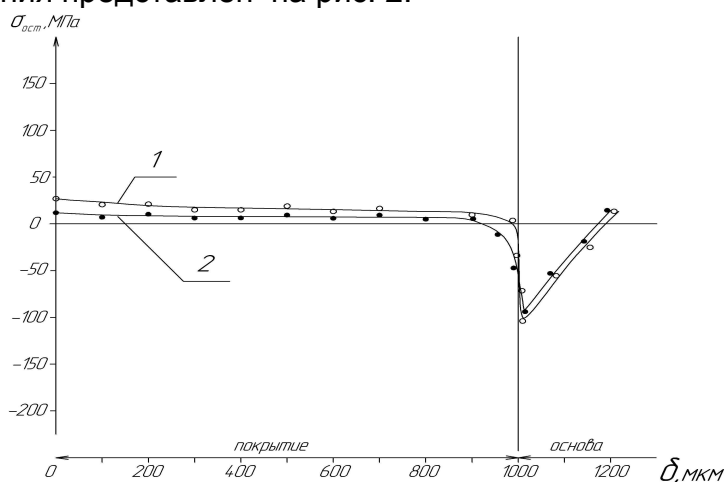
$$\int_0^{a_i} M(\varepsilon) d\varepsilon = \sum_{i=1}^n \Delta_i \cdot \frac{1}{2} [M(\varepsilon_{i-1}) + M(\varepsilon_i)] \quad (8)$$

$e(a_i)$  определяем из условия  $\int E y dF = 0$ , заменяя величину  $y$  из равенства (см. рис. 1)

$$y = y_1 - e(a_i) \quad (9)$$

$$e(a_i) = \frac{\int_F E y_1 dF}{\int_F E dF} = \frac{\frac{1}{2} E_1 (h_i^2 - h_1^2) + \frac{1}{2} E_2 h_1^2}{E_2 h_1 + E_1 h_2} \quad (10)$$

Режимы нанесения покрытий существенно влияют как на кинетику формирования внутренних напряжений, так и на их остаточный уровень. Характер возникновения и распределения внутренних напряжений в покрытиях при двух технологиях напыления представлен на рис. 2.



1- по традиционной технологии; 2- по интегрированной технологии.

Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в покрытии из ПГ-10Н-01 и основе (сталь45).

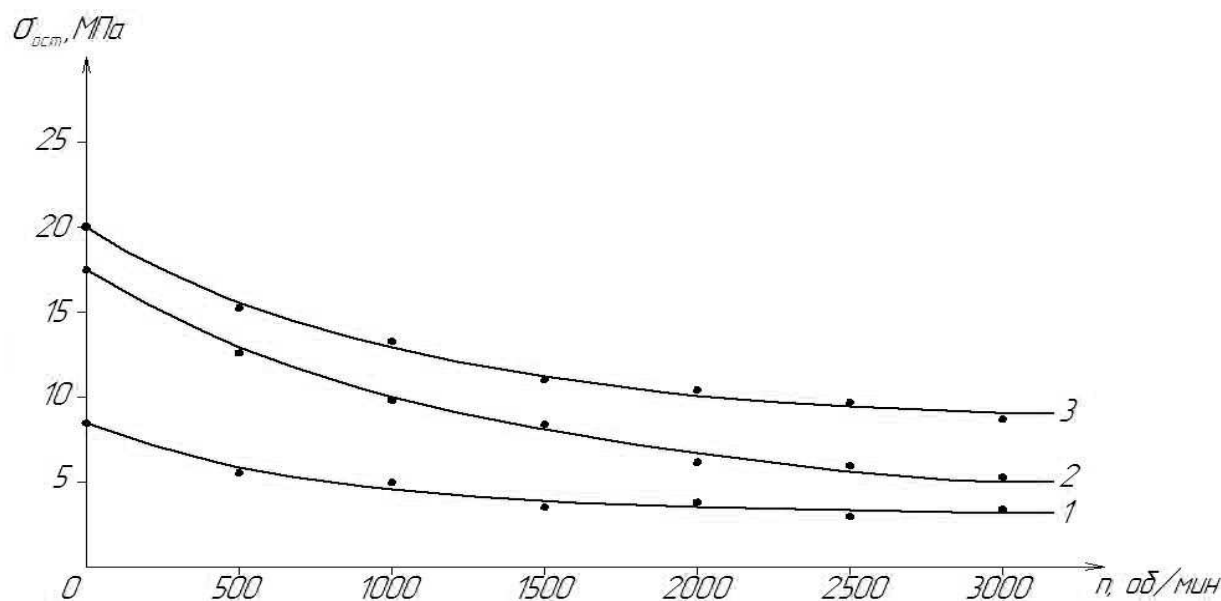
Исследования показали, что при нанесении покрытий традиционным газопламенным напылением (рис. 2, кривая 1), включающем предварительную абразивоструйную обработку поверхности основы, в её слоях формируются напряжения сжатия, максимальные значения которых достигают 110 МПа на поверхности основы, а глубина их распространения - до 60 мкм. При последующем напылении под действием теплового фактора сжимающие остаточные напряжения частично снимаются. После напыления и остывания в напыленном слое под действием внутренних сил наводятся растягивающие остаточные напряжения, уровень которых зависит от теплонапряженности процесса напыления (до 20,2 МПа). Напыленный материал имеет меньшую теплопроводность по сравнению со стальной подложкой и при формировании покрытий каждый последующий слой имеет более высокую температуру чем предыдущий. Эти две причины определяют, что с увеличением толщины контактная температура возрастает в момент удара частицы о поверхность.

Следовательно, последующие напыленные слои покрытия охлаждаются медленнее и в нем формируются меньшие растягивающие напряжения, полнее проходит и релаксация напряжений.

Характер формирования и распределения остаточных напряжений в покрытии и подложке при интегрированном способе нанесения газопламенных покрытий представлен на рис.2 кривая 2. При совмещении процесса напыления газопламенных покрытий со щеточной обработкой ( $n=2100$  об/мин,  $N=3$  мм,  $d_i=0,8$  мм и  $l_i=40$  мм – параметры установлены согласно серии предварительно проведенных экспериментов) установлено, что в покрытии снизился уровень растягивающих остаточных напряжений до 10 МПа. Кроме того, влияние такой обработки распространяется и на переходную зону покрытие - подложка. В покрытии со стороны подложки величина напряжений сжатия снижаются до 80 МПа.

Такой характер формирования остаточных напряжений в слоях и подложке и их релаксацию можно объяснить наклепом при щеточно-напылительной обработке. Снижение уровня растягивающих напряжений происходит за счет пластической деформации, что согласуется с литературными данными. Перераспределение и снижение напряжений приводит к существенному повышению когезии покрытия, причем прочность последнего на разрыв возрастает с 50 до 75 МПа.

Исследовано влияние скорости вращения щетки на уровень остаточных напряжений (рис. 3), повышение оборотов до 2100 об/мин способствует снижению максимальных напряжений растяжения на 20... 40 % [7].



1-0,7 мм; 2-0,4 мм; 3-0,1мм расстояние от поверхности основы

Рис. 3. Изменение остаточных напряжений растяжения от частоты вращения щетки при натяге 3мм в слое напыленного газопламенного покрытия.

На примере формирования газопламенных покрытий из ПГ-10Н-01, нанесенных по интегрированной технологии, можно сделать вывод, что изучение закономерностей возникновения и перераспределения внутренних напряжений в покрытиях при их формировании является важным для понимания природы

процессов, которые определяют последующую работоспособность напыленных покрытий, так как с уменьшением остаточных напряжений в газопламенных покрытиях качество восстановленных деталей повышается.

### **Заключение**

Прочность сцепления покрытия с основой в значительной степени зависит от величины и знака остаточных напряжений. Проведенные эксперименты показали, что использование механической обработки вращающейся металлической щеткой в процессе нанесения газопламенного покрытия позволяет повысить прочность сцепления покрытия с подложкой, что обусловлено снижением уровня остаточных напряжений вследствие обработки щеточной обработки напыляемых слоев покрытия при их формировании. Причем с увеличением оборотов до 2100 об/мин прочность сцепления повысилась на 33%.

### **Список литературы**

1. Аппен А.А. Температурные неорганические покрытия / А.А. Аппен. – Ленинград: Химия, 1976. - 245с.
2. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий/В.А. Барвинок.- М.: Машиностроение, 1990.-272с.
3. Пузряков А.Ф Теоретические основы технологии плазменного напыления /А.Ф. Пузряков. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. - 360 с.
4. Лузан С.А. Применение иглофрезерования для повышения качества газопламенных покрытий/ С.А.Лузан, Е.С.Дерябкина // Всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Зварювання та споріднені процеси і технології», Николаев, 2008р.-с.102-103.
5. Возникновение и перераспределение внутренних напряжений в электродуговых покрытиях во время их формирования. / В.И. Похмурский, М.М.Студент, В.М.Довгунык, И.И.Сидорак, Ю.В.Дзюба, И.А.Рябцев.// Автомат. сварка.-2006, №10.-с. 15-19.
6. Лузан С.А. Газотермическое напыление покрытий [Текст]: Монография. - Харьков: Издательство "НТМТ", 2009. - 134 с.
7. Лузан С.А. Повышение технологических свойств покрытий / С.А. Лузан, Е.С. Дерябкина // Тезисы на Международный научно-технический Конгресс ОТТОМ-9, Харьков 2008.-с.334-336.

**Рецензент:** проф., д.т.н. А.Я. Мовшович, Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

Поступила в редакцию 15.05.2013

## **Вплив щіткової обробки на рівень залишкових напружень в газополум'яних покриттях**

Представлено результати експериментальних досліджень характеру розподілу і величини залишкових напружень в газополум'яних покриттях, напилених за традиційною технологією та з застосуванням механічної обробки щітковим інструментом шарів покриття. Показано, що така обробка забезпечує можливість формування покриття з низьким рівнем залишкових напружень і високою міцністю.

**Ключові слова:** міцність напиленого шару, інтегроване газополум'яне напилення, залишкові напруги.

## **The influence of the brush handle on the level of residual stresses in the gas-flame coatings**

The results of experimental studies of the distribution and magnitude of residual stresses in the gas-flame coatings deposited on traditional technology and the application of machining tool brush coating layers. It is shown that such a treatment that can produce coatings with low residual stress and high strength.

**Keywords:** strength of the sprayed layer, integrated flame spraying, residual stresses.