

Е. А. Зеленина ¹, д-р техн. наук А. В. Ершов ¹, д-р физ.-мат. наук С. В. Лоскутов ¹,
С. Н. Мацюк ²

¹ Запорожский национальный технический университет, ² АО «Мотор Сич»; г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАЗМОТРОНА НА ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЯХ

Плазменное напыление сопровождается нагревом и возникновением температурной неравномерности в поверхностной зоне покрытия. При остывании детали указанная температурная неравномерность является причиной появления остаточных термических напряжений, которые могут привести к разрушению покрытия и к потере работоспособности детали и устройства в целом. Поэтому исследование термических напряжений является актуальной проблемой. На основании модели нестационарного теплообмена при осаждении плазменного покрытия разработана модель влияния скорости перемещения плазматрона на температуру поверхности, глубину зоны нагрева подложки, термическое напряжение и несущую способность плазменного покрытия. Использование предложенной модели расчета показало, что при увеличении скорости перемещения плазматрона вдоль поверхности происходит снижение температуры и термических напряжений, вследствие чего повышается несущая способность покрытия. Одновременно снижается и толщина температурного слоя в зоне нагрева. Полученные зависимости использованы для выбора технологических параметров режима плазменного напыления покрытий толщиной более 1 мм, что позволило снизить термические напряжения и устранить растрескивание покрытия на детали.

Ключевые слова: термическое напряжение, когезионная прочность, нестационарная теплопроводность, температуропроводность.

Осаждение плазменного покрытия на поверхность приводит к возникновению температурной неравномерности в поверхностной зоне подложки и в слое сформированного покрытия. На возрастание температурной неравномерности влияет увеличение толщины покрытий в условиях ограниченного осевого перемещения плазматрона. При остывании детали указанная температурная неравномерность приводит к появлению термических напряжений, величина которых может быть сопоставима с пределом прочности покрытия. В этом случае даже небольшое внешнее воздействие приводит к разрушению покрытия и к потере работоспособности детали и устройства в целом. Поэтому исследование термических напряжений является актуальной проблемой.

Исследованию этой проблемы посвящено большое количество работ [1–9]. Однако в этих работах, в основном, приводятся экспериментальные результаты без конкретных рекомендаций по изменению технологических режимов с целью снижения термических напряжений. Отсутствуют модели влияния скорости перемещения плазменного источника на величину термоупругих напряжений в покрытии.

Для разработки таких рекомендаций следует изучить механизмы влияния скорости перемещения плазматрона на неравномерность температурного поля в покрытии и подложке. Поэтому целью работы является разработка модели температурного поля в зависимости от скорости перемещения плазматрона и оценка термического напряжения, возникающего в покрытии.

Метод исследования

Процесс нанесения плазменного покрытия сопровождается перемещением поверхностного теплового источника. Схема плазменного напыления показана на рис. 1.

При распылении проволоки она служит анодом электрической дуги, а при распылении порошка анодом является сопло плазматрона.

Для расчета температурного поля, которое создается источником теплового потока постоянной плотности, на плоской поверхности однородной среды, можно воспользоваться решением уравнения нестационарной теплопроводности [10] в виде:

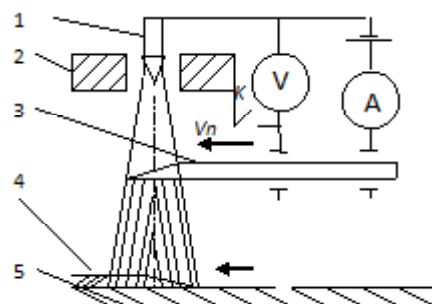


Рис. 1. Схема нанесения плазменного покрытия на поверхность детали: 1 и 2 – катод и сопло плазматрона, 3 – подача распыляемой проволоки-анода или порошка, 4 – покрытие, 5 – подложка

При распылении проволоки она служит анодом электрической дуги, а при распылении порошка анодом является сопло плазмотрона.

Для расчета температурного поля, которое создается источником теплового потока постоянной плотности на плоской поверхности однородной среды, можно воспользоваться решением уравнения нестационарной теплопроводности [10] в виде:

$$\Delta t = \frac{q}{2\lambda\delta}(\delta - x)^2, \quad (1)$$

где Δt – изменение температура среды, q – плотность поверхностного теплового потока, λ – теплопроводность, $\delta = \sqrt{6\alpha\tau}$ – глубина зоны нагрева металла, $\alpha = \lambda/\rho c$ – коэффициент температуропроводности, ρ – плотность, c – теплоемкость среды, τ – время нагрева.

Обычно теплопроводность покрытия значительно ниже теплопроводности подложки. Поэтому разность температур в подложке при нанесении первых слоев меньше, чем в покрытии. Однако для коротких цилиндрических деталей увеличение толщины покрытия при отсутствии осевого перемещения плазмотрона сопровождается более интенсивным ростом температуры подложки, чем для длинных деталей. Поскольку допустимая температура покрытия ограничена условием растрескивания при термических напряжениях, то возникает необходимость снижения разности температур в покрытии. Анализ формулы (1) показывает, что для снижения температуры в зоне нагрева следует уменьшить время нагрева поверхности, например, за счет повышения скорости перемещения плазмотрона. При напылении на поверхность вращения время нагрева отдельной точки покрытия определится отношением диаметра пятна нагрева – D к скорости перемещения плазмотрона относительно подложки – v или $\tau = D/v$. Вычислим глубину зоны нагрева и сопоставим ее с толщиной покрытия. Принимая значения коэффициентов для хромоникелевого покрытия ПРНХ15СР2 $\lambda = 10$ Вт/м·К, [11] $\rho = 8 \cdot 10^3$ кг/м³, $c = 420$ Дж/кг·К [12], находим коэффициент температуропроводности $\alpha = 3 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Глубина зоны нагрева покрытия в зависимости от скорости плазмотрона имеет вид

$$\delta = \sqrt{6\alpha D/v}, \text{ град.} \quad (2)$$

При $D = 0,015$ м $v = 0,57$ м/с, время нагрева $\tau = D/v = 0,026$ с, а $\delta = 0,68 \cdot 10^{-3}$ м, что сопоставимо с толщиной покрытия. Из (1) и (2) видно, что температура покрытия в зоне нагрева снижается при увеличении скорости перемещения плазмотрона.

При нанесении следующих слоев покрытия происходит повышение температуры поверхности покрытия пропорционально толщине уже нанесенных слоев покрытия. При непрерывном нанесении покрытия до тол-

щины 0,3 мм, без осевого перемещения плазмотрона, температура поверхности покрытия, перед нанесением следующего слоя, повышалась до $t_2 = 120$ °С. Для охлаждения покрытия и подложки делались перерывы на 15–20 минут. Таким образом, максимальную температуру в зоне осаждения покрытия можно представить как сумму повышения температуры в зоне плазменного нагрева согласно (1), и температуру поверхности покрытия перед нанесением слоя – $t_2 = 120$ °С

$$t = \frac{q}{2\lambda} \sqrt{6\alpha D/v} + t_2, \text{ град.} \quad (3)$$

Регулируемым технологическим параметром является скорость плазмотрона относительно подложки v , которая вместе с температурой t_2 определяет температуру поверхности покрытия в зоне нагрева при $x = 0$ в соответствии с (3).

При осаждении покрытия на нагретой поверхности можно пренебречь макронапряжениями в поверхностном слое, поскольку сцепление частиц покрытия происходит при отсутствии существенных механических воздействий. Однако при остывании покрытия на жесткой подложке в нем возникают растягивающие термические напряжения, которые пропорциональны температуре поверхности в момент осаждения покрытия. Величину окружных разрывающих термонапряжений для кольцевого покрытия можно определить аналогично случаю жестко закрепленного стержня:

$$\sigma_t = E\alpha t = E\alpha \left(\frac{q}{2\lambda} \delta + 120 \right), \text{ Па} \quad (4)$$

где $E = 0,6 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости покрытия, $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹ [3] – коэффициент термического расширения.

Предварительно проведенные эксперименты показали, что прочность покрытия на разрыв равна $\sigma_B = PL/W = 192$ МПа, где P – поперечная изгибающая сила, L – длина консольного образца, W – момент сопротивления поперечного сечения. Термическое напряжение, при котором происходит разрушение образца, равно напряжению разрыва $\sigma_B = \sigma_{t\max}$ и возникает при параметрах напыления: напряжении 50 В токе дуги 450 А, и скорости плазмотрона $v = 0,58$ м/с. Тогда зависимость термического напряжения от напряжения разрыва и скорости плазмотрона определится в соответствии с (4):

$$\sigma_t = (\sigma_B - 94 \text{ МПа}) \sqrt{\frac{0,58}{v}} + 94 \text{ МПа.} \quad (5)$$

Несущая способность покрытия при растяжении определится как разность между прочностью покрытия σ_B и величиной разрывающего термического напряжения $\sigma = \sigma_B - \sigma_t$.

Анализ результатов

Расчет температуры, термического напряжения, несущей способности при растяжении покрытия на подложке и толщины температурного поля в покрытии приведены в табл. 1, в зависимости от скорости плазматрона.

Таблица 1 – Зависимость характеристик покрытия от скорости плазматрона при температуре поверхности покрытия перед нанесением слоя – $t_2 = 120^\circ\text{C}$

v , м/с	0,58	1,16	1,74	2,32	2,90
δ , 10^{-3} м	0,68	0,49	0,39	0,34	0,30
t_s , $^\circ\text{C}$	244	208	192	182	175
σ_t , МПа	192	164	151	143	137
σ , МПа	0	28	41	49	55

Как видно из табл. 1, увеличение скорости плазматрона приводит к снижению термического напряжения и повышению несущей способности покрытия. Эксперимент показал, что при повышении скорости перемещения плазматрона с 0,58 до 1,16 м/с термические напряжения уменьшаются на 15 % и уже не приводят к разрыву покрытия.

Графики зависимости расчетных величин от скорости перемещения плазматрона приведены на рис. 2–4. Как показано на рис. 2, температура поверхности снижается при увеличении скорости перемещения плазматрона, что связано с уменьшением времени прохождения плазматрона через площадку нагрева.

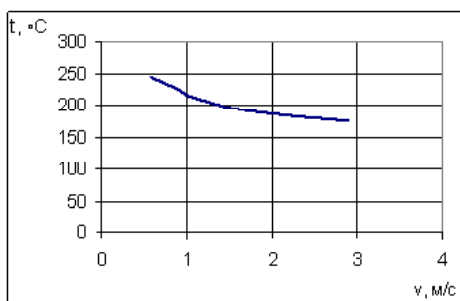


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности покрытия от скорости перемещения плазматрона

Влияние скорости плазматрона на толщину температурного слоя в зоне нагрева покрытия показано на рис. 3.

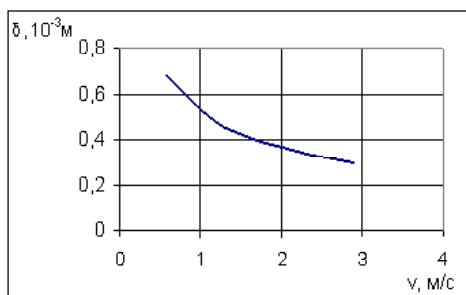


Рис. 3. Зависимость толщины температурного слоя в зоне нагрева покрытия от скорости перемещения плазматрона

Графическое выражение формул (5) и (6) и (7) для оценки термоупругого напряжения и несущей способности при растяжении покрытия представлено на рис. 4. Снижение термоупругого напряжения при возрастании скорости плазматрона связано со снижением температуры поверхности покрытия. Предполагается, что температура 250°C недостаточна для релаксации термических напряжений. Поскольку покрытие на подложке находится в напряженном состоянии, то несущая способность при растяжении оказывается меньше когезионной прочности на величину термического напряжения, что и представлено на рис. 4. Поэтому при возрастании скорости плазматрона несущая способность покрытия возрастает.

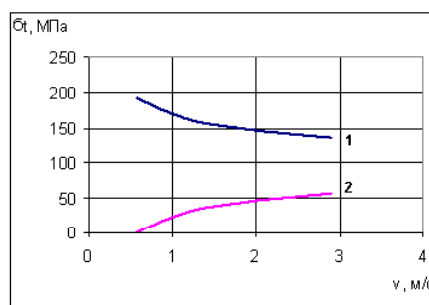


Рис. 4. Влияние скорости перемещения плазматрона на термическое напряжение в покрытии 1 и на несущую способность при растяжении покрытия на подложке 2

Полученные зависимости позволили снизить термические напряжения и устранить растрескивание покрытия при нанесении покрытия на опорную поверхность соплового аппарата двигателя Д-36.

Выводы

1. При увеличении толщины покрытий в условиях ограниченного осевого перемещения плазматрона происходит их разрушение под действием термических напряжений. Для оценки термических напряжений определена температура поверхности в зоне осаждения покрытия как сумма температуры подложки и температуры нагрева поверхности покрытия в этой зоне. Показано, что термические напряжения в покрытии можно ограничить за счет перерывов на охлаждение и путем увеличения скорости перемещения плазматрона относительно детали.

2. Проведенные расчеты показали, что при температуре нагрева поверхности подложки 120°C , увеличение скорости перемещения плазматрона с 0,58 до 1,16 м/с снижает термические напряжения с 192 до 164 МПа и повышает несущую способность покрытия на подложке на 28 МПа. Экспериментально показано, что полученные рекомендации позволили снизить термические напряжения и устранить растрескивание покрытий.

Список литературы

1. Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления /А.Ф. Пузряков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 360 с.

2. Возникновение и перераспределение внутренних напряжений в электродуговых покрытиях во время их формирования. / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгунук и др. // Автомат. сварка. – 2006. – №10. – С. 15–19.
3. Лузан С. А. Газотермическое напыление покрытий : Монография / Лузан С. А. – Харьков : Издательство «НТМТ», 2009. – 134 с.
4. Лузан С. А. Повышение технологических свойств покрытий / С. А. Лузан, Е. С. Дерябкина // Тезисы на Международный научно-технический Конгресс ОТ-ТОМ-9, Харьков-2008. – С. 334–336.
5. Дерябкина Е. С. Влияние щеточной обработки на уровень остаточных напряжений в газопламенных покрытиях/ Е. С. Дерябкина // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2013. – № 59. – 178 с.
6. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий / В. А. Барвинок. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
7. Скворцов Б. П. Расчет остаточных напряжений в газотермическом напыленном слое / Скворцов Б. П., Сидоренко Ю. А. // Сб. на- уч. тр. Белорус. сельскохозяй. акад. – Минск, 1984. – С. 28–35.
8. Студент М. М. Залежність рівня залишкових напружень від складу покриття і режимів електродугової металізації / Студент М. М., Піх В. С. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1993. – № 5. – С. 46–52.
9. Похмурський В. І. Виникнення та перерозподіл внутрішніх напружень в покриттях в процесі їх нанесення / Похмурський В. І., Студент М. М. // Мат. методи та фізико-механічні поля. – 1998. – № 2. – С. 105–108.
10. Урюков Б. А. Теория эрозии электродов в нестационарных пятнах электрической дуги / Б. А. Урюков // Экспериментальное исследование плазмотронов. – Новосибирск : Наука, 1977. – С. 371–383.
11. Хасуй А. Наплавка и напыление / А. Хасуй, О. Моригаки. – М. : Машиностроение. 1985. – 239 с.
12. Кухлинг Х. Справочник по физике / Кухлинг Х. – М. : Мир, 1982. – 519 с.

Одержано 24.03.2017

Зеленіна О.А., Єршов А.В., Лоскутов С.В., Мацюк С.М. Вплив швидкості переміщення плазмотрона на термопружні напруження в плазмових покриттях

Плазмове напилення супроводжується нагріванням і виникненням температурної нерівномірності в поверхневій зоні покриття. При охолодженні деталі зазначена температурна нерівномірність є причиною появи залишкових термічних напружень, які можуть призвести до руйнування покриття і до втрати працездатності деталі і пристрою в цілому. Тому дослідження термічних напружень є актуальною проблемою. На підставі моделі нестационарного теплообміну при осадженні плазмового покриття розроблена модель впливу швидкості переміщення плазмотрона на температуру поверхні, глибину зони нагріву підкладки, термічне напруження і несучу здатність плазмового покриття. Використання запропонованої моделі розрахунку показало, що при збільшенні швидкості переміщення плазмотрона уздовж поверхні відбувається зниження температури і термічних напружень, внаслідок чого підвищується несуча здатність покриття. Одночасно знижується і товщина температурного шару в зоні нагріву. Отримані залежності використані для вибору технологічних параметрів режиму плазмового напилення покриттів товщиною понад 1 мм, що дозволило знизити термічні напруження і усунути розтріскування покриття на деталі.

Ключові слова: термічна напруга, когезійна міцність, нестационарна теплопровідність, температуропровідність.

Zelenina Ye., Ershov A., Loskutov S., Matsyuk S. The influence of the speed of movement of the plasmatron for thermoelastic stresses in plasma coatings

Plasma spraying is accompanied by heat and the occurrence of temperature unevenness in a surface area coverage. During cooling of the part specified temperature unevenness is the cause of residual thermal stresses, which can lead to failure of the coating and loss of efficiency parts and devices in General. Therefore the research of thermal stresses is an important issue. Based on the model of unsteady heat transfer during the deposition of the plasma coating a model of influence of speed of movement of the plasma torch on the surface temperature, the depth of the zone of heating of the substrate, thermal stress and load carrying ability to plasma coat was developed. Using the proposed calculation model it was shown that increasing the speed of movement of the torch along the surface reduces the temperature and thermal stresses, thereby increasing the bearing capacity of the coating. At the same time and the thickness of the temperature layer in the heating zone are reduced. The dependences were used for selection of technological parameters of plasma spraying of coatings of a thickness of > 1 mm, which allowed to reduce thermal stresses and eliminate cracking of the coatings on the parts.

Key words: thermal stress, cohesive strength, non-stationary thermal conductivity, thermal diffusivity.