

Расчет остаточных напряжений в плазменных покрытиях с учетом процесса наращивания

В.И. Богданович¹, М.Г. Гиорбелидзе¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Предложен метод определения остаточных напряжений в многослойных покрытиях, полученных плазменным газотермическим напылением. Определены остаточные напряжения в трехслойном плазменном покрытии. Проведена оценка влияния мощности плазменной дуги на характер распределения остаточных напряжений в покрытии, подслое и подложке.

1. Введение

Остаточные напряжения являются одной из основных причин разрушения плазменных газотермических покрытий. В связи с этим данному вопросу посвящено достаточное количество публикаций, среди которых следует выделить [1-18]. Природа возникновения остаточных напряжений наряду с рядом причин, вызывающих их, представляет собой сложности при моделировании этих процессов.

В процессе формирования плазменных покрытий нагретые до температуры плавления и ускоренные потоком частицы порошкового материала ударяются о поверхность детали и деформируются на ней. После кристаллизации расплавленных частиц на поверхности возникают остаточные напряжения второго рода, уравновешенные в микрообъеме всего материала частицы. Опыт показывает [1-3], что адгезионная и когезионная прочность определяется не прочностью материала частицы, а прочностью связей между соседними частицами. С учетом того, что покрытие может состоять из разных слоев с различными материалами, наибольший интерес представляют остаточные напряжения первого рода. Они уравновешены в объеме, существенно большем отдельной частицы и соизмеримым с толщиной всего покрытия или отдельных наращиваемых слоев. Данный факт позволяет заменить моделирование процесса возникновения остаточных напряжений второго рода на моделирование процесса остаточных напряжений первого рода и рассматривать их в процессе наращивания каждого из слоёв покрытия.

2. Метод расчета остаточных напряжений в плазменных газотермических покрытиях

Во многих практических случаях возникает необходимость определения остаточных напряжений в многослойных покрытиях. Применение известных методов расчета при определении остаточных напряжений в многослойных покрытиях для ряда конкретных случаев вызывает определенные трудности, связанные с громоздкими вычислениями. В данной работе предложен метод определения остаточных напряжений в многослойных покрытиях, полученных плазменным газотермическим напылением.

Рассмотрим N -слойное тонкое покрытие толщиной α_N , модули упругости слоев которого E_i различны, а коэффициенты Пуассона μ_i одинаковы. Пусть стравлен слой толщиной η и дальнейшее травление происходит в слое m . Прикладываем к освободившейся поверхности напряжения σ (рисунок 1), которые существовали в стравленном слое толщиной η до его удаления. Под действием этих напряжений возникает изгибающий момент, определяемый из выражения:

$$M(\eta) = - \int_{k-\eta-\delta(\eta)}^{h-\delta(\eta)} \sigma(z) z dz = \int_0^{\eta} \sigma(\xi) [\xi + \delta(\xi) - h] d\xi, \tag{1}$$

в котором совершен переход к переменной ξ по формуле

$$\xi = h - \delta(\eta) - z;$$

$$\delta(\eta) = \frac{\int_0^{h-\eta} E(z_z) z_1 dz_1}{\int_0^{h-\eta} E(z_z) dz_1}.$$

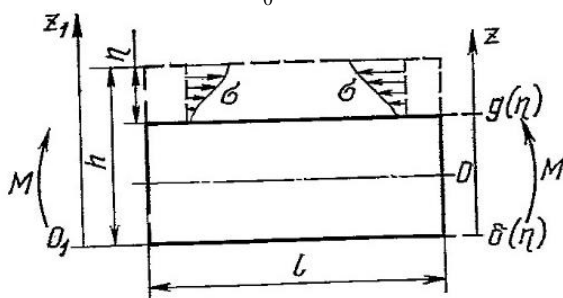


Рисунок 1. Схема определения остаточных напряжений после снятия материала толщиной η .

Изгибающий момент $M(\eta)$ приводит к прогибу (рисунок 2), определяемому из соотношения:

$$f(\eta) = \frac{l^2 M(\eta)}{2I_E(\eta)}; \tag{2}$$

$$I_E(\eta) = \int_0^{h-\eta} E(z_1) [z_1 - \delta(\mu)]^2 dz_1,$$

где $I_E(\eta)$ – момент инерции сечения пластины, отнесенный к ее ширине.

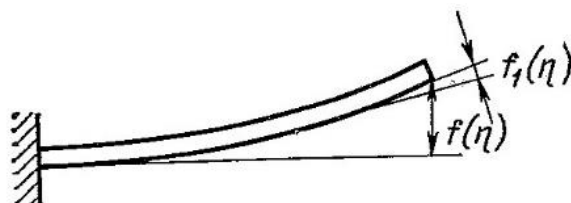


Рисунок 2. Схема замера деформации.

Используя (1-2), получим интегральное уравнение:

$$\frac{2f(\eta) I_E(\eta)}{l^2} = \int_0^{\eta} \sigma(\xi) [\xi + \delta(\eta) - h] d\xi. \tag{3}$$

Дифференцируя дважды выражение (3) и учитывая, что $\left[\frac{\eta + \delta(\eta) - h}{\delta'(\eta)} \right]'_{\eta} = -1$, получим

$$\frac{d\sigma}{d\eta} = \frac{2}{l^2} \frac{\left[\frac{[f(\eta)I(\eta)]'_{\eta}}{\delta'(\eta)} \right]'_{\eta}}{\frac{\eta + \delta(\eta) - h}{\delta'(\eta)}}. \tag{4}$$

Пусть травление происходит в слое m , т.е. $h - a_m < \eta < h - a_{m-1}$. Интегрируя (4), будем иметь

$$\sigma(\eta) = \sigma(h - a_m) + \frac{2}{l^2} \int_{h-a_m}^{\eta} \frac{\left[\frac{[f(\xi)I_E(\xi)]'_{\xi}}{\delta'(\xi)} \right]'_{\xi}}{\frac{\xi + \delta(\xi) - h}{\delta'(\xi)}} d\xi. \tag{5}$$

Дважды беря по частям интеграл в равенстве (5) и находя $\sigma(h - a_m)$ после однократного дифференцирования (3), получим

$$\begin{aligned} \sigma(\eta) = & -\frac{2}{l^2} \left\{ \frac{[f(\eta)I_E(\eta)]'_{\eta}}{\eta + \delta(\eta) - h} - f(\eta)I_E(\eta) \frac{\delta'(\eta)}{[\eta + \delta(\eta) - h]^2} - \right. \\ & \left. - \int_{h-a_m}^{\eta} f(\xi)I_E(\xi) \frac{\delta'(\xi)}{[\xi + \delta(\xi) - h]^3} d\xi \right\} - \\ & - \left[\frac{2}{l^2} f(\eta)I_E(\eta) \frac{\delta'(\eta)}{[\eta + \delta(\eta) - h]^2} + \frac{\delta'(\eta)}{\eta + \delta(\eta) - h} \int_0^{\eta} \sigma(\xi) d\xi \right]_{\eta=h-a_m}. \end{aligned} \tag{6}$$

Формула (6) справедлива для тонкого стержня $\sigma = \sigma_x \gg \sigma_y$. Для изотропной пластины или тонкого слоя покрытия вывод остается тем же, только с первого по четвертый член в правой части уравнения (6) необходимо разделить на $1 - \mu$.

3. Заключение

Данная методика использовалась для определения остаточных напряжений в напыленном слое X20H80 + CaF₂ и подслое H20H80. В качестве образца-подложки использовались полоски из жаропрочного сплава размером 80 x 10 x 3 мм. Напыление производилось аргоно-водородной плазмой на модернизированной установке УПУ-8М малогабаритным плазматроном собственного производства. Расход аргона составлял 3 м³/ч, водорода 0,45 м³/ч, дистанция напыления 100 мм, скорость перемещения горелки 0,1 м/с, шаг сканирования 7,5 мм. Перед напылением образцы подвергали пескоструйной обработке.

При определении остаточных напряжений прогиб образцов измерялся в процессе непрерывного электрополирования. Для равномерного электрополирования применяли специальный травитель, катод из нержавеющей стали, баретер для поддержания постоянного тока, автоматическую мешалку для выравнивания температуры травления и специальное масло для пропитки пористых образцов.

Проведенная работа позволила разработать методику определения остаточных напряжений в многослойных пластинах, определить остаточные напряжения в трехслойных плазменных покрытиях, оценить влияние мощности плазменной дуги на характер распределения остаточных напряжений в покрытии, подслое и подложке.

4. Литература

- [1] Барвинок, В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. – М.: Наука и технологии, 2005. – 452 с.
- [2] Барвинок, В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В.А. Барвинок. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
- [3] Бобров, Г.В. Теория и технология формирования неорганических покрытий / Г.В. Бобров, А.А. Ильин, В.С. Спектор. – М.: Альфа-М, 2014. – 925 с.
- [4] Куудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Куудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
- [5] Ильющенко, А.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый. – Минск: Беларус. Навука, 2011. – 357 с.
- [6] Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Издательство МГТУ, 2003. – 458 с.
- [7] Куудинов, В.В. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Куудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
- [8] Кравченко, И.Н. Метод управления остаточными напряжениями в плазменных покрытиях / И.Н. Кравченко, А.Ф. Пузряков, В.Ю. Гладков, Е.В. Панкратова, М.А. Глинский // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2011. – № 10. – С. 6-11.
- [9] Бондарева, Г.И. Обоснование перераспределения остаточных напряжений в плазменно-напыленных покрытиях / Г.И. Бондарева // Вестник машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 32-35.
- [10] Карцев, С.В. Исследование остаточных напряжений в покрытиях, нанесенных плазменным методом / С.В. Карцев, В.С. Ширшов // Технология машиностроения. – 2012. – № 5. – С. 37-38.
- [11] Кравченко, И.Н. Формирование остаточных напряжений в системе деталь-покрытие с использованием методов численного анализа / И.Н. Кравченко, О.Я. Москаль, Е.В. Панкратова, А.В. Шиян // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 10. – С. 44-50.
- [12] Панкратова, Е.В. Ремонт. Теплофизическая модель определения остаточных напряжений в плазменных покрытиях / Е.В. Панкратова, И.Н. Кравченко, О.Я. Москаль // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 11. – С. 34-40.
- [13] Kravchenko, I.N. A Model for determination of residual stresses in plasma coatings / I.N. Kravchenko, A.V. Kolomeychenko, I.E. Pupavtsev, A.A. Puzryakov, R.Y. Solovev // Welding International. – 2017. – Vol. 31(10). – P. 809-813.
- [14] Mutter, M. Correlation of splat morphologies with porosity and residual stress in plasma-sprayed YSZ coatings / M. Mutter, G. Mauer, R. Mücke, O. Guillon, R. Vaßen // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 318. – P. 157-169.
- [15] Nayeypashae, N. Finite element simulation of residual stress and failure mechanism in plasma sprayed thermal barrier coatings using actual microstructure as the representative volume / N. Nayeypashae, S.H. Seyedein, M.R. Aboutalebi, H. Sarpoolaky, S.M.M. Hadavi // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol. 291. – P. 103-114.
- [16] Croom, B.P. Unveiling residual stresses in air plasma spray coatings by digital image correlation / B.P. Croom, C. Bumgardner, X. Li // Extreme Mechanics Letters. – 2016. – Vol. 7. – P. 126-135.
- [17] Capek, J. Residual stresses determination in textured substrates for plasma sprayed coatings / J. Capek, Z. Pala, O. Kovarik // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 82(1). – P. 012112.

- [18] Yang, L. Evolution of residual stress in air plasma sprayed yttria stabilised zirconia thermal barrier coatings after isothermal treatment / L. Yang, F. Yang, Y. Long, X. Zhao, P. Xiao // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 251. – P. 98-105.

Calculation of residual stresses in plasma spray coatings taking into account the build-up process

V.I. Bogdanovich¹, M.G. Giorbelidze¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. A method for determining the residual stresses in multilayer coatings obtained by plasma thermal spraying is proposed. Residual stresses in a three-layer plasma coating were determined. The influence of the plasma arc power on the distribution of residual stresses in the coating, sublayer and substrate are estimated.