

УДК 621.793: 539.3: 004.942

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЯХ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА НАРАЩИВАНИЯ СЛОЕВ**

© 2020 В.И. Богданович, М.Г. Гиорбелидзе, И.А. Докукина, Н.В. Суркова

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 02.12.2020

Разработана математическая модель определения остаточных напряжений при наращивании плазменных покрытий, учитывающая напряжения, возникающие при охлаждении материала от окончательной температуры до температуры окружающей среды; напряжения, возникающие при снятии закрепляющего приспособления и напряжения, существовавшие в подложке до начала напыления. Разработанные математические модели адаптированы для наиболее часто встречаемых случаев закрепления основы, применяемых в практике нанесения покрытий. Проведены экспериментальные исследования остаточных напряжений, которые показали хорошую сходимость со значениями остаточных напряжений, полученными теоретическим путем.

Ключевые слова: плазменные покрытия, наращивание слоев, остаточные напряжения, математическое моделирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-6-14-20

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации*

ВВЕДЕНИЕ

Проблема остаточных напряжений весьма актуальна при нанесении плазменных покрытий [1-19], где их существенное накопление и концентрация способствует появлению трещин с последующим сколом покрытия с поверхности детали. По состоянию на сегодняшний день известно большое количество работ, нацеленных, как на изучение процессов возникновения остаточных напряжений в разных материалах от различных по своей природе внешних воздействий и видов обработки, так и на разработку самих методов определения остаточных напряжений. Ввиду большого количества факторов,

способствующих появлению остаточных напряжений, а также существенных сложностей при математическом описании и моделировании подобных явлений количество научных публикаций по этой теме неизменно растет. Помимо выделенных сложностей продолжают оставаться открытыми вопросы, связанные с возможностями прогнозирования, регулирования значений и знака этих напряжений.

В процессе плазменного газотермического напыления частицы порошка с разной степенью нагрева и проплавления [22] с высокими скоростями [21, 23] взаимодействуют с поверхностью основы, при этом происходит их существенная деформация и закрепление на детали в виде элементов микроструктуры покрытия [20]. В результате существенного термического воздействия с последующей кристаллизацией неизбежно возникают остаточные напряжения второго рода, уравновешенные в объеме материала отдельных частиц уже сформировавшейся структуры. Многочисленные исследования и практический опыт, в частности [1-2] показывают, что прочность наращиваемых слоев определяется не прочностью материала отдельно взятых частиц, а прочностью сцепления частиц структуры между собой.

При оценке физико-механических свойств выращенного слоя используют существенно усредненные параметры, такие как модуль

Богданович Валерий Иосифович, лауреат Государственной премии РФ в области науки и техники, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: bogdanovich@ssau.ru

Гиорбелидзе Михаил Георгиевич, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: m.giorbelidze@ssau.ru

Докукина Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: dokukina.ia@ssau.ru

Суркова Наталья Вадимовна, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

E-mail: surkova_natalya@mail.ru

упругости, предел прочности, коэффициент теплопроводности, которые могут существенно отличаться от значений этих параметров в объеме материала отдельной частицы. В связи с этим, процесс кристаллизации отдельных порошковых частиц можно представить в виде непрерывного модельного процесса и, опираясь на известные теории из физики сплошной среды, провести необходимые расчеты.

Рассмотрение выращенного слоя в качестве сплошной среды предполагает исследование остаточных напряжений первого рода. Остаточные напряжения этого типа уравниваются в пределах всего объема наращиваемого слоя, либо в его макрообъемах. В данном случае усреднение значений параметров происходит уже в гораздо большем объеме, чем отдельная частица, что благоприятно отражается на точности такого представления. Подобное замещение процесса кристаллизации отдельной частицы на непрерывный модельный процесс является вполне обоснованным. В ряде публикаций прослеживается способ определения температурной составляющей остаточных напряжений при рассмотрении готовой выращенной детали или полностью сформированного покрытия. Однако более детальный анализ показывает, что остаточные напряжения возникают в процессе всего наращивания слоя и при постепенном изменении внешних нагрузок от некоторых начальных до конечных значений, что не всегда находит отражение в большинстве работ на эту тему.

Постановка математической модели определения остаточных напряжений с учетом процесса наращивания слоев

На основу в форме пластины некоторой толщины h из однородного материала наносится

покрытие из материала с другими механическими и теплофизическими свойствами, не зависящими от температуры (рис. 1). Для удобства дальнейших расчетов будем считать, что коэффициенты Пуассона μ материала покрытия и основы одинаковы, а геометрические параметры пластины такие, что реализуется плоское напряженное состояние и могут применяться гипотезы Кирхгофа. Значит, что компоненты тензора напряжений $\sigma_i, \tau_{x,y}$, где $i = x, y$ будут отличны от нуля.

Пусть к данному моменту времени нанесено покрытие толщиной η . Распределение температуры по толщине материала z в зависимости от подвижной границы η предполагается заданным по [1-2]. При наращивании последующего тонкого слоя $d\eta$ из-за изменения температуры $T(z, \eta)$ всей системы покрытие-основа, изменения граничных усилий и моментов, появления кристаллизационных напряжений $\sigma_i^{(k)}, \tau_{xy}^{(k)}$ в слое $d\eta$, напряжения, которые уже сформировались в объеме материала, изменятся на величину $\Delta\sigma_i, \Delta\tau_{xy}$. Под кристаллизационными напряжениями будем понимать напряжения, которые по своей природе возникновения отличны от термоупругих, т.е. некоторые начальные напряжения, возникающие при формировании слоя $d\eta$ из-за несоответствия кристаллических решеток, фазовых и структурных превращений и т.д. Будем считать, что зависимости $\sigma_i^{(k)}, \tau_{xy}^{(k)}$ заданы. Так как при плазменном напылении слой $d\eta$ формируется из жидкой фазы в нем существуют только кристаллизационные напряжения, а термоупругие напряжения равны нулю.

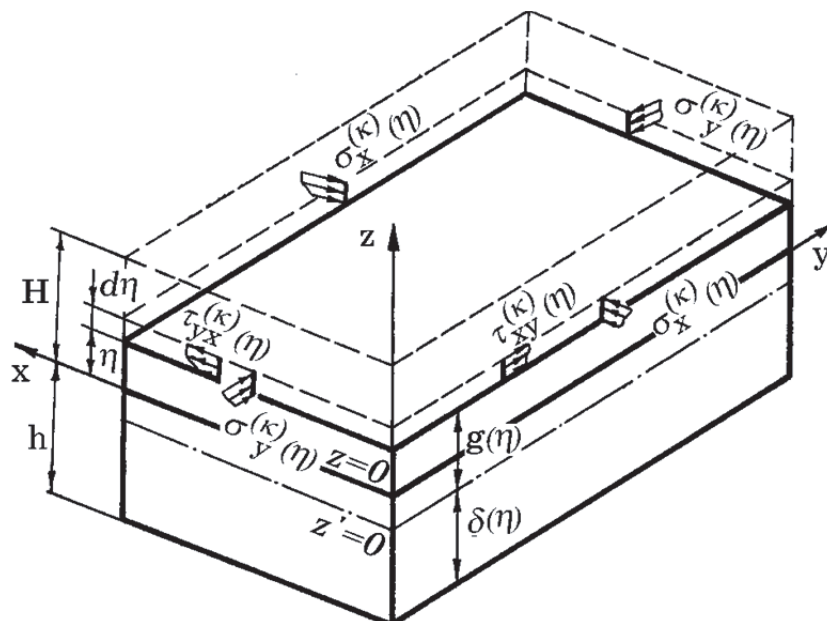


Рис. 1. Схема для расчета остаточных напряжений

Зная величины $\Delta\sigma_i$ и $\Delta\tau_{xy}$, при непрерывном и последовательном наращивании слоя конечной толщины H , напряжения в этом слое можно найти путем интегрирования по $d\eta$. Если после процесса нанесения за счет условий теплообмена охладить покрытие до температуры окружающей среды и освободить основу из фиксирующего приспособления, то то напряжения, которые останутся в материале, а они и являются по определению остаточными, будут определяться следующими выражениями:

для покрытия

$$\sigma_i(z) = \sigma_i^{(k)}(z) + \int_z^H \Delta\sigma_i(z, \eta) - \sigma_i^{(T)}(z) + \sigma_i^{(b)}(z); \quad (1)$$

$$\tau_{xy}(z) = \tau_{xy}^{(k)}(z) + \int_z^H \Delta\tau_{xy}(z, \eta) + \tau_{xy}^{(b)}(z); \quad (2)$$

для основы

$$\sigma_i(z) = \sigma_i^{(H)}(z) + \int_0^H \Delta\sigma_i(z, \eta) - \sigma_i^{(T)}(z) + \sigma_i^{(b)}z, \quad (3)$$

где $\sigma_i^{(T)}(z)$ – напряжения, возникающие при охлаждении материала от окончательной температуры до температуры окружающей среды; $\sigma_i^{(b)}$, $\tau_{xy}^{(b)}$ – напряжения, возникающие при снятии закрепляющего приспособления; $\sigma_i^{(H)}$, $\tau_{xy}^{(H)}$ – напряжения, существовавшие в подложке до начала напыления. Напряжения $\sigma_i^{(T)}(z)$ могут быть найдены из решения задачи термоупругости [1].

Применим гипотезы Кирхгофа для пластин с целью определения $\Delta\sigma_i(z, \eta)$ и $\Delta\tau_{xy}(z, \eta)$. Тогда изменение перемещений $\Delta u_i^{(z')}$ на расстоянии z' от основной плоскости в зависимости от изменения перемещений в основной плоскости Δu_i из-за нанесения слоя $d\eta$ будет после соответствующих преобразований и учета перемещений основной плоскости будут следующими:

$$\Delta u_i^{(z')} = \Delta u_i - z' \frac{\partial \Delta u_z}{\partial i}; \quad \Delta u_z^{(z')} = \Delta u_z,$$

где $i = x, y$,

а изменение тензора деформаций будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_i^{(z')} &= \Delta \varepsilon_i - z' \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial i^2}; \\ \Delta \gamma_{xy}^{(z')} &= \Delta \gamma_{x,y} - 2z' \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \quad (4)$$

Используя обобщенный закон Гука, получаем для изменения тензора напряжений соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_i &= \frac{E(z')}{1-\mu^2} (\Delta \varepsilon_i + \mu \Delta \varepsilon_j) - \frac{E(z')}{1-\mu^2} z' \left(\frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial i^2} + \mu \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial j^2} \right) - \\ &\quad - \frac{E(z') \alpha_T(z')}{1-\mu} \frac{\partial \eta}{\partial \eta} d\eta, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta \tau_{xy} = \frac{E(z')}{2(1+\mu)} \Delta \gamma_{xy} - \frac{E(z')}{1+\mu} z' \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial x \partial y}, \quad (6)$$

где $\alpha_T(z')$ – коэффициент теплового расширения; $E(z')$ – модуль Юнга.

Введем эквивалентные усилия и моменты, отнесенные к единице длины. Изменение эквивалентных усилий ΔN_i , $\Delta N_{x,y}$ и моментов ΔM_i , $\Delta M_{x,y}$ с увеличением толщины пластины на величину $d\eta$ и кристаллизационных напряжений в слое будут задаваться соотношениями:

$$\begin{aligned} \Delta N_i &= \int_{-\delta(\eta)}^{g(\eta)} \Delta \sigma_i dz' + \sigma_i^{(k)}(\eta) d\eta; \\ \Delta M_i &= \int_{-\delta(\eta)}^{g(\eta)} \Delta \sigma_i z' dz' + \sigma_i^{(k)}(\eta) g(\eta) d\eta, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\delta(\eta)$ – расстояния от основной плоскости до нижней плоскости напыляемой пластины; $g(\eta)$ – расстояния от основной плоскости до верхней плоскости напыляемой пластины.

Аналогично записываются соотношения для $\Delta N_{x,y}$ и $\Delta M_{x,y}$. Подставив (5) и (6) в (7) и используя определение основной плоскости, получим:

$$\begin{aligned} \Delta N_i &= \frac{A(\eta)}{1-\mu^2} [\Delta \varepsilon_i + \mu \Delta \varepsilon_j - (1+\mu) \Delta \varepsilon_T] + \Delta \sigma_i^{(k)}(\eta) d\eta; \\ \Delta N_{xy} &= \frac{A(\eta)}{2(1+\mu)} \Delta \gamma_{xy} + \tau_{xy}^{(k)}(\eta) d\eta \end{aligned} \quad ; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta M_i &= \frac{D(\eta)}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial i^2} + \mu \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial j^2} + (1+\mu) \Delta \chi_T \right] + \sigma_i^{(k)}(\eta) g(\eta) d\eta; \\ \Delta M_{xy} &= -\frac{D(\eta)}{1+\mu} \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial x \partial y} + \tau_{xy}^{(k)}(\eta) g(\eta) d\eta \end{aligned} \quad (9)$$

$$A(\eta) = \int_{-\delta(\eta)}^{g(\eta)} E(z') dz'; \quad D(\eta) = \int_{-\delta(\eta)}^{g(\eta)} E(z') (z')^2 dz',$$

где $A(\eta)$, $D(\eta)$ – жесткость пластины на растяжение и изгиб.

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_T &= \frac{1}{A(\eta)} \left[\int_{-\delta(\eta)}^{g(\eta)} E(z') \alpha_T(z') \frac{\partial T}{\partial \eta} dz' \right] d\eta; \\ \Delta \chi_T &= \frac{1}{D(\eta)} \left[\int_{-\delta(\eta)}^{g(\eta)} E(z') \alpha_T(z') z' \frac{\partial T}{\partial \eta} dz' \right] d\eta; \end{aligned} \quad (10)$$

Используя соотношения (5), (6), (8) и (9), получаем

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_i &= \frac{E(z')}{A(\eta)} \left[\Delta N_i - \sigma_i^{(k)}(\eta) d\eta \right] + \\ & z' \frac{E(z')}{D(\eta)} \left[\Delta M_i - \sigma_i^{(k)}(\eta) g(\eta) d\eta \right] + \\ & + \frac{E(z')}{1-\mu} \left[\Delta\varepsilon_T + z' \Delta\chi_T + \alpha_T(z') \frac{\partial T}{\partial \mu} d\eta \right]; \quad (11) \\ \Delta\tau_{xy} &= \frac{E(z')}{A(\eta)} \left[\Delta N_{xy} - \tau_{xy}^{(k)}(\eta) d\eta \right] + \\ & z' \frac{E(z')}{D(\eta)} \left[\Delta M_{xy} - \tau_{xy}^{(k)}(\eta) g(\eta) d\eta \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

Рассмотрим наиболее часто встречаемые случаи закрепления основы, применяемые в практике нанесения покрытий, исходя из известных допущений о постоянстве по длине покрытия величины остаточных напряжений за исключением областей, где проявляется влияние краевого эффекта. Размеры краевого эффекта сопоставимы с высотой основы и покрытия.

Остаточные напряжения в пластине свободной от контурных сил и моментов

Учитывая, что $\Delta N_i = \Delta N_{xy} = 0$; $\Delta M_i = \Delta M_{xy} = 0$, получаем

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_i &= -E(z') \left[\frac{1}{A(\eta)} + z' \frac{g(\eta)}{D(\eta)} \right] \sigma_i^{(k)}(\eta) d\eta + \\ & + \frac{E(z')}{1-\mu} \left[\Delta\varepsilon_T + z' \Delta\chi_T - \alpha_T(z') \frac{\partial T}{\partial \eta} d\eta \right]; \quad (13) \end{aligned}$$

$$\Delta\tau_{xy} = -E(z') \left[\frac{1}{A(\eta)} + z' \frac{g(\eta)}{D(\eta)} \right] \tau_{xy}^{(k)}(\eta) d\eta. \quad (14)$$

Температурные напряжения при охлаждении уже сформированной пластины будут [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_i^T &= \frac{E(z')}{1-\mu} \left[\frac{1}{A(H)} \int_{-\delta(H)}^{g(H)} \alpha_T(z') E(z') T(z', H) dz' + \right. \\ & \left. + \frac{z'}{D(H)} \int_{-\delta(H)}^{g(H)} \alpha_T(z') E(z') z' T(z', H) dz' - \alpha_T(z') T(z', H) \right]. \quad (15) \end{aligned}$$

Подставив (14), (13) и (15) в (1-4), получим формулу для расчета остаточных напряжений в системе после напыления.

Остаточные напряжения в полностью стесненной пластине

Под полным стеснением будем понимать такое закрепление, которое исключает любую деформацию подложки. В этом случае из (8) и (9) получим, что при напылении изменение контурных усилий и моментов будет следующим:

$$\Delta M_i = -\frac{D(\eta)}{1-\mu} \Delta\chi_T + \sigma_i^{(k)}(\eta) g(\eta) d\eta;$$

$$\Delta M_{xy} = \tau_{xy}^{(k)}(\eta) g(\eta) d\eta; \quad (16)$$

$$\Delta N_i = -\frac{A(\eta)}{1-\mu} \Delta\varepsilon_T + \sigma_i^{(k)}(\eta) d\eta;$$

$$\Delta N_{xy} = \tau_{xy}^{(k)}(\eta) d\eta; \quad (17)$$

$$\Delta\sigma_i = -\frac{E(z') \alpha_T(z')}{1-\mu} \frac{\partial T}{\partial \eta} d\eta; \quad \Delta\tau_{xy} = 0; \quad (18)$$

После окончания процесса формирования напыленного слоя и снятия закрепления с пластины, к границе пластины приложатся усилия и моменты, определяемые из (16) и (17) с обратным знаком:

$$M_i = \int_0^H \left[\frac{D(\eta)}{1-\mu} \Delta\chi_T - \sigma_i^{(k)}(\eta) g(\eta) d\eta \right];$$

$$M_{xy} = -\int_0^H \tau_{xy}^{(k)}(\eta) g(\eta) d\eta; \quad (19)$$

$$N_i = \int_0^H \left[\frac{A(\eta)}{1-\mu} \Delta\varepsilon_T - \sigma_i^{(k)}(\eta) d\eta \right];$$

$$N_{xy} = -\int_0^H \tau_{xy}^{(k)}(\eta) d\eta. \quad (20)$$

Напряжения, возникающие в результате приложения усилий и моментов в пластине, примут вид:

$$\sigma_i^{(b)} = \frac{E(z') N_i}{A(H)} + z' \frac{E(z') M_i}{D(H)};$$

$$\tau_{xy}^{(b)} = \frac{E(z') N_{xy}}{A(H)} + z' \frac{E(z') M_{xy}}{D(H)}. \quad (21)$$

Подставив (18), (21) и (14) в (1-4), получим расчетную формулу для остаточных напряжений в полностью стесненной пластине.

Остаточные напряжения в частично стесненной пластине

Пластина с частично стесненным закреплением подвергается растяжению и сжатию, но ограничена в изгибе, т.е. $\Delta N_i = \Delta N_{xy} = 0$; $\Delta u_z = 0$. Изменение контурного момента при напылении будет определяться выражением (16), а изменение напряжений примет вид:

$$\Delta\sigma_i = -\frac{E(z')}{A(\eta)} \sigma_i^{(k)}(\eta) d\eta + \frac{E(z')}{1-\mu} \left[\Delta\varepsilon_T - \alpha_T(z') \frac{\partial T}{\partial \eta} d\eta \right];$$

$$\Delta\tau_{xy} = -\frac{E(z')}{A(\eta)} \tau_{xy}^{(k)}(\eta) d\eta. \quad (22)$$

После освобождения пластины от закрепления возникнут следующие напряжения:

$$\sigma_i^{(b)} = z' \frac{E(z') M_i}{D(H)};$$

$$\tau_{xy}^{(b)} = z' \frac{E(z') M_{xy}}{D(H)}, \quad (23)$$

где M_i и M_{xy} определяются в соответствии с (19).

Подставив (22), (23) и (14) в (1-4), получим расчетную формулу для остаточных напряжений в частично стесненной пластине.

ВЫВОДЫ

С целью апробации разработанной математической модели были проведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования остаточных напряжений в образцах при одинаковых условиях напыления (рис. 2).

Образцами для исследования служили тонкие пластины из стали размерами 100x10x2,5 мм с напыленным слоем 70 % Al+30% VN. Деформация образцов измерялась в процессе непрерывного электрополирования. В качестве электролита для травления слоя 70 % Al+30 % VN использовался 15 % раствор KOH. Для обеспечения постоянной скорости электрополирования образцов производилась их пропитка специальным маслом и применялась стабилизация тока. Результаты показывают, что эпюры остаточных

напряжений, полученные теоретическим путем, имеют хорошую сходимость с экспериментом.

Разработана математическая модель определения остаточных напряжений в напыленных покрытиях для основных условий закрепления подложки, наиболее часто встречающихся в практике напыления. На примере определения остаточных напряжений в напыленном слое 70% Al+30% VN показана реализация данного метода. Представлены результаты определения остаточных напряжений, полученные в результате теоретических расчетов и экспериментальных исследований. Результаты показывают, что значения остаточных напряжений, полученные теоретическим путем, имеют хорошую сходимость с экспериментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барвинок В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс. – М.: Наука и технологии, 2005. – 456 с.
2. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М: Машиностроение, 1990. – 384 с.
3. Бобров Г.В., Ильин А.А., Спектор В.С. Теория и технология формирования неорганических покрытий. – М.: Альфа-М, 2014. - 925 с.
4. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
5. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. – Минск: Беларус. Навука, 2011. – 357 с.
6. Пузыряков А.Ф. Теоретические основы техноло-

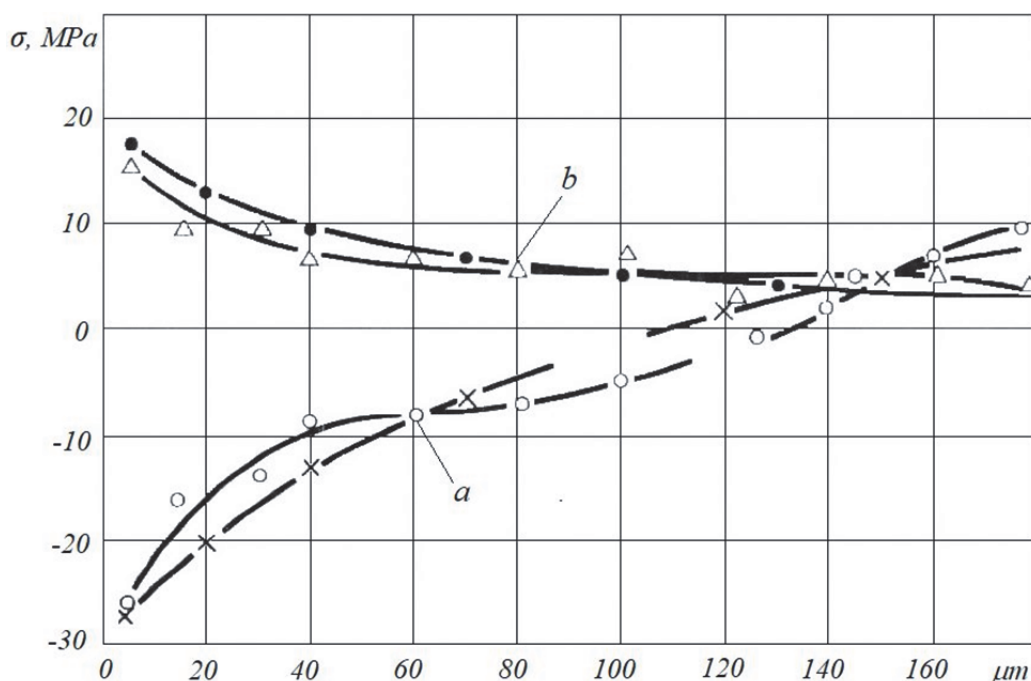


Рис. 2. Эпюра остаточных напряжений в зависимости от условий закрепления подложки (напыление 70% Al+30% VN на сталь):
 а – жесткое закрепление: ○ – экспериментальные данные, × – аналитический расчет;
 б – свободное крепление: Δ – экспериментальные данные, ● – аналитический расчет

- гии плазменного напыления. – М.: Издательство МГТУ, 2003. – 458 с.
7. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е. и др. Нанесение покрытий плазмой. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
 8. Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Гладков В.Ю., Панкратова Е.В., Глинский М.А. Метод управления остаточными напряжениями в плазменных покрытиях // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2011. – № 10. – С. 6-11.
 9. Бондарева Г.И. Обоснование перераспределения остаточных напряжений в плазменно-напыленных покрытиях // Вестник машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 32-35.
 10. Карцев С.В., Ширишов В.С. Исследование остаточных напряжений в покрытиях, нанесенных плазменным методом // Технология машиностроения. – 2012. – № 5. – С. 37-38.
 11. Кравченко И.Н., Москаль О.Я., Панкратова Е.В., Шиян А.В. Формирование остаточных напряжений в системе деталь-покрытие с использованием методов численного анализа // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 10. – С. 44-50.
 12. Панкратова Е.В., Кравченко И.Н., Москаль О.Я. Ремонт. Теплофизическая модель определения остаточных напряжений в плазменных покрытиях // Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 11. – С. 34-40.
 13. Kravchenko I.N., Kolomeychenko A.V., Pupavtsev I.E., Puzryakov A.A., Solovov R.Y. A Model for determination of residual stresses in plasma coatings // Welding International. – 2017. – Vol.31(10). – P.809-813.
 14. Mutter M., Mauer G., Mücke R., Guillon O., Vaßen R. Correlation of splat morphologies with porosity and residual stress in plasma-sprayed YSZ coatings // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol.318. – P.157-169.
 15. Nayebpashae N., Seyedein S.H., Aboutalebi M.R., Sarpoolaky H., Hadavi S.M.M. Finite element simulation of residual stress and failure mechanism in plasma sprayed thermal barrier coatings using actual microstructure as the representative volume // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Vol.291. – P.103-114.
 16. Croom B.P., Bumgardner C., Li X. Unveiling residual stresses in air plasma spray coatings by digital image correlation // Extreme Mechanics Letters. – 2016. – Vol.7. – P. 126-135.
 17. Capek J., Pala Z., Kovarik O. Residual stresses determination in textured substrates for plasma sprayed coatings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol.82(1). – article number 012112.
 18. Yang L., Yang F., Long Y., Zhao X., Xiao P. Evolution of residual stress in air plasma sprayed yttria stabilised zirconia thermal barrier coatings after isothermal treatment // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol.251. – P.98-105.
 19. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Determination of residual stresses in multi-layer plasma coatings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019 – Vol. 511, Issue 1. – article number 12005
 20. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical simulation of particle impact on a fixed surface in the formation of powder coatings // Journal of Physics: Conference Series. 2019 – Vol. 1368(4). – article number 042078.
 21. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Development of mathematical model of disperse particle motion in the plasma flow in the field of boundary layer during plasma spraying // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096(1). – article number 012190.
 22. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical Model of Powder Material Particles Heating in Thermal Spraying // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol. 769. – P. 336-345.
 23. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical modelling of powder material motion and transportation in high-temperature flow core during plasma coatings application // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327, Issue 1. – article number 022036.

MATHEMATICAL MODELING OF RESIDUAL STRESSES IN PLASMA COATINGS TAKING INTO ACCOUNT THE PROCESS OF INCREASING LAYERS

© 2020 V.I. Bogdanovich, M.G. Giorbelidze, I.A. Dokukina, N.V. Surkova

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

Developed a mathematical model for determining residual stresses with increasing plasma coatings, taking into account the stresses arising upon cooling of the material from the final temperature to ambient temperature; tension that arises when removing the fastening devices and tension that existed in the substrate before spraying. The developed mathematical models are adapted for the most common cases of fixing the base used in the practice of coating. Experimental studies of residual stresses were carried out, which showed good convergence with the values of residual stresses obtained theoretically. Keywords: plasma coatings, increasing layers, residual stresses, mathematical modeling.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-6-14-20

The reported study was funded by the Ministry of science and higher education of the Russian Federation.

REFERENCES

1. Barvinok V.A. Plasma in Technology, Reliability and Resource. Moscow: Science and technology Publishers. 2005, 456 p.
2. Barvinok V.A. Control of stress state and properties of plasma coatings. Moscow: Mechanical Publishers. 1990, 384 p.
3. Bobrov G.V., Ilyin A.A., Spektor V.S. Theory and technology of inorganic coatings formation. – Moscow: Alfa-M Publishers. 2014, 925 p.
4. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Thermal spray coating. Theory, technology and equipment. – Moscow: Metallurgy. 1992, 432 p.
5. Ilyushchenko A.F., Shevtsov A.I., Okovity V.A. The processes and modeling of thermal spray coatings formation. – Minsk: Belarus Science. 2011, 357 p.
6. Puzryakov A.F. Theoretical bases of plasma spraying technology. – Moscow: Bauman University Publishers. 2003, 458 p.
7. Kudinov V.V., Pekshev P.Yu., Belashchenko V.E. Plasma coating application. – Moscow: Science. 1990, 408 p.
8. Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Gladkov V.Yu., Pankratova E.V., Glinskih M.A. Method for controlling residual stresses in plasma coatings // *Repair. Recovery. Modernization*. 2011, №10, P. 6-11.
9. Bondareva G.I. Justification of redistribution of residual stresses in plasma-sprayed coatings // *Bulletin of mechanical engineering*. 2011, № 9, P. 32-35.
10. Kartsev S.V., Shirshov V.S. Investigation of residual stresses in coatings deposited by the plasma method // *Engineering technology*. 2012, № 5, P. 37-38.
11. Kravchenko I.N., Moskal O.Ya., Pankratova E.V., Shiyar A.V. Formation of residual stresses in the part-coating system using numerical analysis methods // *Repair. Recovery. Modernization*. 2012, № 10, P. 44-50.
12. Pankratova E.V., Kravchenko I.N., Moskal O.Ya. Thermophysical model for determining residual stresses in plasma coatings // *Repair. Recovery. Modernization*. 2012, № 11, P. 34-40.
13. Kravchenko I.N., Kolomeychenko A.V., Pupavtsev I.E., Puzryakov A.A., Solovov R.Y. A Model for determination of residual stresses in plasma coatings // *Welding International*. – 2017. – Vol.31(10). – P.809-813.
14. Mutter M., Mauer G., Mücke R., Guillon O., Vaßen R. Correlation of splat morphologies with porosity and residual stress in plasma-sprayed YSZ coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol.318. – P.157-169.
15. Nayeypashae N., Seyedein S.H., Aboutalebi M.R., Sarpoolaky H., Hadavi S.M.M. Finite element simulation of residual stress and failure mechanism in plasma sprayed thermal barrier coatings using actual microstructure as the representative volume // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol.291. – P.103-114.
16. Croom B.P., Bumgardner C., Li X. Unveiling residual stresses in air plasma spray coatings by digital image correlation // *Extreme Mechanics Letters*. – 2016. – Vol.7. – P. 126-135
17. Capek J., Pala Z., Kovarik O. Residual stresses determination in textured substrates for plasma sprayed coatings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol.82(1). – article number 012112.
18. Yang L., Yang F., Long Y., Zhao X., Xiao P. Evolution of residual stress in air plasma sprayed yttria stabilised zirconia thermal barrier coatings after isothermal treatment // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol.251. – P.98-105.
19. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Determination of residual stresses in multi-layer plasma coatings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019 – Vol. 511, Issue 1. – article number 12005
20. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical simulation of particle impact on a fixed surface in the formation of powder coatings // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019 – Vol. 1368(4). – article number 042078.
21. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Development of mathematical model of disperse particle motion in the plasma flow in the field of boundary layer during plasma spraying // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1096(1). – article number 012190.
22. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical Model of Powder Material Particles Heating in Thermal Spraying // *Key Engineering Materials*. – 2018. – Vol. 769. – P. 336-345.
23. Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G. Mathematical modelling of powder material motion and transportation in high-temperature flow core during plasma coatings application // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 327, Issue 1. – article number 022036.

Valery Bogdanovich, Laureate of the State Prize of the Russian Federation in the Field of Science and Technology, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Aircraft Manufacturing and Quality Management in Engineering Department. E-mail: bogdanovich@ssau.ru

Mikhail Giorbelidze, Assistant Lecturer of the Aircraft Manufacturing and Quality Management in Engineering Department. E-mail: m.giorbelidze@ssau.ru

Irina Dokukina, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Aircraft manufacturing and Quality Management in Engineering Department. E-mail: dokukina.ia@ssau.ru

Natalya Surkova, Postgraduate of the Aircraft Manufacturing and Quality Management in Engineering Department. E-mail: surkova_natalya@mail.ru