

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.793.7:519.87

А. Н. СЕРЕНКО<sup>1</sup>, И. В. ЗАХАРОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Автоматизация и механизация сварочного производства», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 958 20 17, эл. почта zsv-73@i.ua, ORCID 0000-0002-8536-6313

<sup>2\*</sup>Каф. «Автоматизация и механизация сварочного производства», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 845 25 39, эл. почта zakharovaiv75@gmail.com, ORCID 0000-0002-3492-0134

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОКРЫТИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ РАСПЫЛЯЮЩИМ ПОТОКОМ

**Цель.** Авторы предусматривают разработать математическую модель расчетного определения остаточных напряжений в произвольном слое газотермического покрытия на основании величины изменения геометрии основы (прогиб образца) и закона изменения производной от толщины слоя, дальнейшего регулирования этих напряжений, изменяя технологические параметры напыления под каждый вид напыляемого покрытия. **Методика.** На основании известных работ по определению напряжений в сварных соединениях, наплавленных стальных слоях выработан подход для определения прогиба образцов после послойного напыления. Данные параметры прогиба положены в разработанную математическую модель влияния на напряженное состояние. Систематизированы сведения по изучению основных видов остаточных (внутренних) напряжений как I рода, которые распределены в объеме всей детали (образца) с покрытием, так и II рода, локализованные в объеме напыляемых частиц. **Результаты.** Представлены исследования остаточных напряжений, возникающих в нанесенном слое, величина и характер распределения которых зависит от типа, основного и напыляемого материалов, способов и параметров напыления, жесткости детали и других факторов. Показана важная роль оценки остаточных напряжений в газотермическом покрытии расчетным методом в связи со сложностью экспериментального определения кинетики развития напряжений в композите покрытие – основа. **Научная новизна.** Авторы этой работы на основании впервые созданной математической модели и программного продукта Mathcad–Prime 6 2020 провели исследование уровня и принципов образования остаточных напряжений в покрытии при газотермическом послойном напылении различными материалами, в том числе с возможностью использования пульсирующего распыляющего воздушного потока. Аналитические исследования показали, что внимание в литературе за последние пять – семь лет было уделено изучению остаточных напряжений и деформаций в сварных соединениях, и только рост интереса к технологии напыления открывает широкие возможности изучения формирования полей напряжений в газотермическом покрытии. **Практическая значимость.** Результаты, полученные в рамках данной работы, подтверждают образование остаточных напряжений в покрытиях и могут быть использованы в качестве расчетных программ при решении конструкторских задач, а также в образовательных целях при подготовке профильных специалистов.

*Ключевые слова:* работоспособность; остаточные напряжения; покрытие; основа; математическая модель

### Введение

Работоспособность газотермического покрытия и его технологические свойства зависят от ряда факторов, которые закладывают в него на различных этапах формирования, начиная от выбора наносимого материала и заканчивая технологиями финальной обработки.

Остаточные напряжения, всегда возникающие при послойном газотермическом нанесении, являются одним из основных факторов,

определяющих прочность сцепления с основой покрытия, нанесенного практически любым способом напыления. Наиболее широко изучена и представлена в литературе проблематика образования напряжений в сварных конструкциях и их влияние на качество сварного узла [2, 3, 9], которые принимают за основу при разработке последующих инженерных методик оценки величины и характера внутренних напряжений, в том числе и в однослойных упрочняющих покрытиях [5, 11].

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Исследования показывают, что с ростом востребованности технологии газотермического нанесения продолжают работы по повышению надежности и прочности сцепления покрытий. Промышленное использование газотермических покрытий нашло применение в качестве подслоев (основа) перед нанесением покрытий со специализированными свойствами, например, лакокрасочными [12], к которым предъявляют особые требования по прочности сцепления и напряженности. Прочность сцепления покрытий с поверхностью рассматривают как основной фактор [1, 3, 4] при разработке сортамента наносимых материалов, для различных условий эксплуатации поверхности в условиях промышленного трения, нанесения защитных покрытий на стальные и бетонные конструкции, а также коррозионной стойкости в морских условиях [6, 7, 8].

## Цель

Учитывая тенденции развития технологий напыления металлов, авторы ставят целью разработать математическую модель расчетного определения остаточных напряжений в произвольном слое газотермического покрытия для оперативного прогнозирования и управления остаточными напряжениями в композите, а как следствие – для дальнейшего регулирования их

значения с учетом различных технологических параметров напыления для различных видов покрытия.

## Методика

На основании работ по определению напряжений в сварных соединениях выработан подход определения прогиба образцов после послойного напыления. Данные параметры прогиба положены в основу разработки математической модели влияния на напряженное состояние. Систематизированы сведения по изучению основных видов остаточных (внутренних) напряжений как I рода, которые распределены в объеме всей детали (образца) с покрытием, так и II рода, локализованных в объеме напыляемых частиц.

Используя общий метод определения напряжений, рассмотренный в [3, 10], авторы поставили задачу получить расчетные зависимости, связывающие величину остаточных напряжений в нанесенном слое  $\sigma_a$  с измеряемыми деформациями ( $\varepsilon$ ) или перемещениями ( $f$ - прогиб) стержня.

Рассмотрим призматический стержень высотой  $h_2$  (рис. 1) с модулем упругости  $E_2$ , на который нанесено покрытие  $a$  с модулем упругости  $E_1$ . Предположим, что осевые остаточные напряжения постоянны по длине стержня  $l$  (за исключением зоны краевого эффекта по концам стержня  $l_1 \approx h_2 + a$ ).

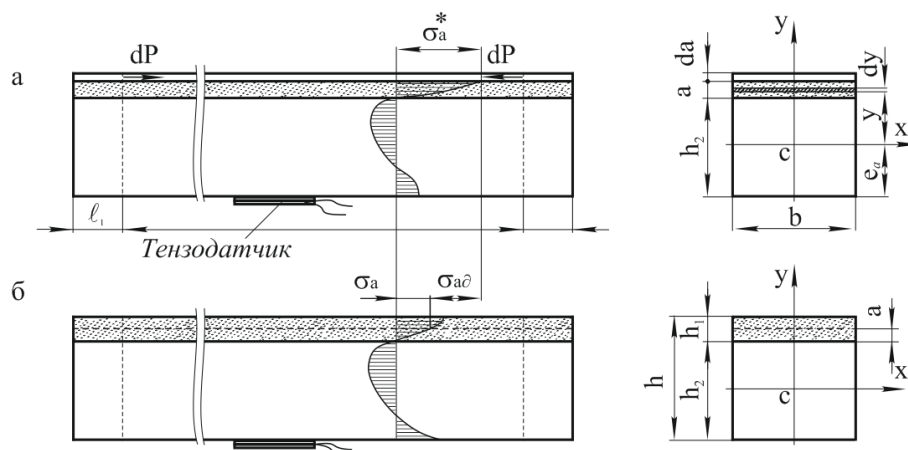


Рис. 1. Остаточные напряжения:

$a$  – в слое;  $b$  – в биметаллическом стержне прямоугольного сечения

Fig 1. Residual stresses:

$a$  – in the layer;  $b$  – in a bimetallic rod of rectangular section

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

После нанесения элементарного слоя толщиной  $da$  возникающие в нем напряжения  $\sigma_a^*$  вызовут сжатие и изгиб стержня элементарной силой  $dP_a = \sigma_a^* b da$ , под действием которой в крайнем нижнем волокне стержня возникнут напряжения сжатия

$$d\sigma_{сж} = -\frac{E_2 \sigma_a^* b da}{A_a} \quad (1)$$

и напряжения изгиба

$$d\sigma_{из} = -\frac{E_2 \sigma_a^* b (h_2 + a - e_a) e_a}{B_a}, \quad (2)$$

где  $A_a$ ,  $B_a$  – жесткость биметаллического стержня на сжатие и изгиб соответственно;  $e_a$  – расстояние от нижней грани стержня до приведенного центра тяжести сечения после нанесения слоя толщиной  $a$  (рис. 1,  $a$ ).

Жесткость стержня на сжатие определим из соотношения:

$$A_a = \int F_2 E_2 dF + \int F_1 E_1 dF = \int_{-e_a}^{h_2 - e_a} E_2 b dy + \int_{h_2 - e_a}^{h_2 + a - e_a} E_1 b dy. \quad (3)$$

После интегрирования и некоторых преобразований выражение (3) можно представить в следующем виде:

$$A_a = b E_1 D_a, \quad (4)$$

где  $D_a = \beta h_2 + a$ ;  $\beta = E_2 / E_1$ .

Жесткость сечения стержня на изгиб определим из соотношения:

$$B_a = \int F_2 E_2 y^2 dF + \int F_1 E_1 y^2 dF = E_2 b \int_{-e_a}^{h_2 - e_a} y^2 dy + E_1 b \int_{h_2 - e_a}^{h_2 + a - e_a} y^2 dy. \quad (5)$$

Проинтегрировав (5) и сделав некоторые преобразования, получим:

$$B_a = \frac{1}{3} b E_1 R_a, \quad (6)$$

где  $R_a = (h_2 - e_a + a)^3 + \beta e_a^3 + (\beta - 1)(h_2 - e_a)^3$ .

Расстояние  $e_a$  будем определять из условия:

$$\int F_2 E_2 y dF + \int F_1 E_1 y dF = E_2 b \int_{-e_a}^{h_2 - e_a} y dy + E_1 b \int_{h_2 - e_a}^{h_2 + a - e_a} y dy = 0; \quad (7)$$

по уравнению:

$$e_a = \frac{\frac{1}{2} E_2 b h_2^2 + E_1 b a \left( h_2 + \frac{a}{2} \right)}{E_2 b h_2 + E_1 b a}. \quad (8)$$

Тогда после преобразований получим:

$$e_a = \frac{\beta h_2^2 + 2 a h_2 + a^2}{2(\beta h_2 + a)}. \quad (9)$$

При равенстве модулей упругости стержня и покрытия ( $\beta = 1$ )

$$e_a = \frac{1}{2} (h_2 + a), \quad (10)$$

т. е. совпадает с центром тяжести прямоугольного сечения однородного металла.

Деформация в крайнем нижнем волокне стержня от действия элементарной силы  $dP_a$ :

$$d\varepsilon = \frac{d\sigma_{сж}}{E_2} + \frac{d\sigma_{из}}{E_2} = -\frac{\sigma_a^* b da}{A_a} + \frac{\sigma_a^* b (h_2 - e_a + a) da}{B_a} e_a. \quad (11)$$

После подстановки в (11) выражений (4), (6), (9) и преобразований будем иметь:

$$d\varepsilon = \frac{\sigma_a^*}{E_1} S_a da, \quad (12)$$

$$\text{где: } S_a = \left[ \frac{(3h_2 - e_a + a)e_a}{R_a} - \frac{1}{D_a} \right].$$

Из выражения (12)

$$\sigma_a^* = \frac{E_1 d\varepsilon}{S_a da}. \quad (13)$$

Нанесение последующих (после слоя  $a$ ) слоев покрытия до окончательной его толщины  $h_1$  (рис. 1,  $b$ ) приведет к возникновению в слое  $a$  добавочных напряжений  $\sigma_{ад}$ , которые вместе

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

с напряжениями (13) позволят определить полные остаточные напряжения в рассматриваемом слое:

$$\sigma_a = \sigma_a^* - \sigma_{ad}. \quad (14)$$

Для определения величины  $\sigma_{ad}$  нужно рассмотреть, что произойдет, если нанести добавочный слой  $d\xi$  (рис. 2). В этом случае на стерж-

жень начинают действовать усилия  $dN = \sigma_\xi^* b d\xi$  и момент  $dM = \sigma_\xi^* b (h_2 - e_a + \xi) d\xi$ , создающие в слое  $a$  напряжения:

$$d\sigma_{ad} = \frac{dNE_1}{A_\xi} + \frac{dME_1}{B_\xi} (h_2 - e_a + a). \quad (15)$$

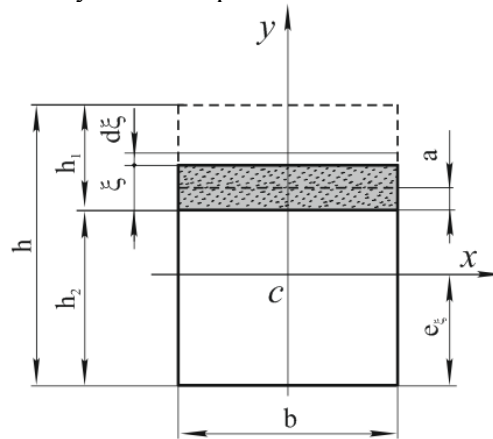


Рис. 2. Дополнительное напряжение при выполнении последующих (после  $a$ ) слоев

Fig. 2. Additional stress when performing subsequent (after  $a$ ) layers

Далее, если учесть, что добавочные напряжения в слое  $\xi$ , возникающие при его нанесении  $\sigma_\xi^*$  определяют по формуле (13), заменив  $a$  на  $\xi$ , получим:

$$d\sigma_{ad} = \frac{E_1}{S_\xi} \times \left[ \frac{1}{D_\xi} + \frac{3(h_2 - e_\xi + \xi)(h_2 - e_\xi + a)}{R_\xi} \right] \frac{d\varepsilon}{d\xi} d\xi. \quad (16)$$

Интегрируя, получим:

$$\sigma_{ad} = E_1 \int_a^{h_1} \frac{1}{S_\xi} \times \left[ \frac{1}{D_\xi} + \frac{3(h_2 - e_\xi + \xi)(h_2 - e_\xi + a)}{R_\xi} \right] \frac{d\varepsilon}{d\xi} d\xi, \quad (17)$$

Величины  $S_\xi$ ,  $D_\xi$ ,  $R_\xi$ ,  $e_\xi$  определяют из формул (4), (6), (9), (12), заменяя  $a$  на  $\xi$ .

Из соотношений (13), (14) и (17) вытекает основная расчетная формула для определения

остаточных напряжений в биметаллических стержнях прямоугольного сечения методом измерения продольной деформации:

$$\sigma_a = \frac{E_1}{S_a} \frac{d\varepsilon}{da} (a) - E_1 \int_0^{h_1} \frac{1}{S_\xi} \times \left[ \frac{1}{D_\xi} + \frac{3(h_2 - e_\xi + \xi)(h_2 - e_\xi + a)}{R_\xi} \right] \frac{d\varepsilon}{d\xi} d\xi. \quad (18)$$

Данная формула удовлетворяет общим условиям равновесия:

$$\int_0^h \sigma_a da = 0; \quad \int_0^h \sigma_a (h_2 - e_a + a) da = 0. \quad (19)$$

Проверка этих условий контролирует только правильность расчета.

После нанесения элементарного слоя толщиной  $da$  (рис. 1,  $a$ ) возникающая в нем элементарная сила  $dP$  вызывает изгиб стержня моментом  $dM = dP(h_2 - e_a + a)$ , приводящим к возрастанию прогиба стержня на величину:

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

$$df = \frac{l^2 dM}{8B_a} = \frac{\sigma_a^* bl^2 (h_2 - e_a + a)}{8B_a} da, \quad (20)$$

Откуда:

$$\sigma_a^* = \frac{8B_a}{bl^2 (h_2 - e_a + a)} \frac{df}{da}, \quad (21)$$

Добавочные напряжения в рассматриваемом слое  $a$  при выполнении последующих слоев будем определять по аналогии с формулами (15) и (16), из которых с учетом зависимости (14) вытекает основная расчетная формула для определения остаточных напряжений в покрытиях методом измерения прогиба стержня:

$$\sigma_a = \frac{8E_1}{l^2} \left\{ \frac{R_a}{3(h_2 - e_a + a)} \frac{df}{da}(a) - \int_a^{h_1} \left[ \frac{R_\xi}{3D_\xi (h_2 - e_\xi + \xi)} + (h_2 - e_a + a) \right] \frac{df}{d\xi} d\xi \right\}. \quad (22)$$

Получив в результате эксперимента зависимость величины деформации крайнего волокна (первый метод) или величины прогиба середины образца (второй метод) от толщины наносимого покрытия, можно по выражениям (18) и (22) рассчитать величину остаточных напряжений в любой точке по толщине напыленного слоя. Необходимые для этих расчетов значения производных  $d\varepsilon/da$  и  $df/da$  можно определить параболической аппроксимацией или любым другим способом.

Приближенное значение интеграла вычисляем любым численным методом.

Прогиб считается положительным, если он направлен в сторону от выполняемого слоя. Если при расчете по выражениям (18) или (22) величина  $\sigma_a$  оказывается положительной, то остаточные напряжения растягивающие.

В некоторых случаях напыления деталей необходимой толщины покрытия достигают за один проход. Поэтому определение величины и характера распределения остаточных напряжений в нем можно определить, используя послойное удаление покрытия путем механической обработки, например, шлифовкой. Такая задача решена в работе [10], и применительно к нашим обозначениям основная расчетная

формула для определения  $\sigma_{ост}$  в биметаллических стержнях прямоугольного сечения методом измерения прогиба будет иметь вид:

$$\sigma_a = \frac{8E_1}{l^2} \left[ R_a C_a \frac{df}{da}(a) - (h-a)f(a) + \int_0^{a_e} R_\xi \frac{df}{d\xi} d\xi - \int_0^a R_\xi \frac{df}{d\xi} d\xi \right]. \quad (23)$$

В этой формуле приняты следующие обозначения:

$$e_a = \frac{(h_1 - a)^2 + 2(h_1 - a)h_2 + \beta h_2^2}{2(h_1 - a + \beta h_2)};$$

$$D_a = (h - a + e_a)^3 + \beta e_a^3 + (1 - \beta)(e_a - h_2)^3;$$

$$C_a = h_1 - a + \beta h_2;$$

$$R_a = \frac{D_a}{3C_a (h - a + e_a)}.$$

Из анализа формул (18), (22), (23) видно, что для расчетного определения остаточных напряжений в произвольном слое  $a$  покрытия необходимо знать не только величину прогиба, но и закон изменения производной от толщины слоя. В связи с этим процедуру расчета остаточных напряжений (при послойном наращивании покрытия) осуществляют следующим образом.

После нанесения очередного слоя на образец производим определение приращения толщины слоя  $\Delta a$  и, соответственно, прогиба  $\Delta f$ . Учитывая, что наносимый слой является шероховатым и может иметь разброс толщины на всей напыляемой поверхности, определение приращения толщины слоя было произведено через приращение массы напыленного слоя путем взвешивания образца после каждого слоя на аналитических весах. Толщину слоя определяли перерасчетом приращения массы на приращение толщины слоя. Экспериментальные данные и результаты последующей обработки заносили в таблицы. Пример для одного образца (напыление проволокой Св08А) показан в табл. 1.

Таблица 1

**Экспериментальные данные зависимости прогиба образца  
от толщины наносимого слоя с применением  
воздушно-распыляющего пульсирующего потока**

Table 1

**Experimental data on the dependence  
of the sample deflection on the thickness  
of applied layer using an air-spraying pulsating flow**

i	Показания индикатора, мм		$\Delta f_i$ , мм	$f_i$ , мм	$\Delta a_i$ , мм	$a_i$ , мм	$h_2 + a_i$ , мм		$G_j$ , г	$\Delta G_j$ , г
	начальн.	послед.					расчет	изме- рение		
0	0,069	0,069	0	0	0	0	10,1	10,1	0	0
1	0,069	0,103	0,034	0,034	0,127	0,127	10,227	10,3	1,7	1,7
2	0,103	0,148	0,045	0,079	0,134	0,261	10,361	10,5	1,8	3,5
3	0,148	0,162	0,014	0,093	0,127	0,388	10,488	10,7	1,7	5,2
4	0,162	0,142	0,020	0,113	0,141	0,529	10,629	10,8	1,9	7,1
5	0,142	0,150	0,008	0,121	0,149	0,678	10,778	10,9	2,0	9,1
6	0,150	0,152	0,002	0,123	0,134	0,812	10,912	11,1	1,8	10,9
7	0,152	0,158	0,006	0,129	0,141	0,953	11,053	11,2	1,9	12,8
8	0,158	0,160	0,002	0,131	0,149	1,102	11,202	11,3	2,0	20,8
9	0,160	0,161	0,001	0,132	0,149	1,251	11,351	11,4	2,0	22,8
10	0,161	0,160	-0,001	0,131	0,149	1,4	11,5	11,5	2,0	24,8

Размер стержня:  $h_2 = 10,1$  мм;  $b = 20,2$  мм.

Режимы напыления:  $I_{св} = 150$  А;  $U_d = 28$  В;  
 $V_n = 66,3$  мм;  $L_n = 120$  мм.

Проволока: Св08А  $\varnothing 2,0$  мм.

Частота пульсаций: 65–75 Гц

Прогиб от наклепа пескоструйной обработкой 0,023 мм.

В таблице приняты следующие обозначения:

$f_i$  – текущее значение прогиба, мм;  $\Delta f_i$  – приращение прогиба, мм;  $a_i$  – текущее значение толщины слоя, мм;  $\Delta a_i$  – приращение толщины слоя, мм;  $h_2 + a_i$  – общая толщина стержня и покрытия, мм;  $G_j$  – приращение массы покрытия, г;  $i$  – номер напыленного слоя.

Перед напылением поверхность каждого образца подвергалась пескоструйной обработке корундовым песком при давлении воздуха 0,6 МПа. Под воздействием пескоструйной об-

работки наблюдается прогиб образцов в сторону обрабатываемой поверхности, что указывает на появление в поверхностном наклепываемом слое напряжений сжатия. Если принять толщину наклепываемого слоя равной 50...60 мкм [13] и считать распределение остаточных напряжений сжатия по толщине равномерным, можно показать, что их величина достигает значений 350...400 МПа. По-видимому, эти напряжения будут сниматься в момент напыления за счет теплового воздействия расплавленных капель на поверхностные слои. Более того, в результате неравномерного нагрева основы при нанесении первого слоя происходит образование в тонком поверхностном слое основы напряжений растяжения. Для подтверждения этого мы провели измерение остаточного прогиба образца после нанесения первого слоя и его самопроизвольного отслаивания за счет

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

предварительной обработки поверхности графитом.

Таким образом, начальный прогиб образца  $f_n$ , вызванный его неравномерным нагревом при нанесении первого слоя, приведет к возникновению начальных напряжений в образце, которые следует затем вычесть из напряжений, рассчитываемых по вышеприведенным формулам (табл. 1).

По результатам исследований строят графики зависимостей прогиба образца от толщины покрытия  $a$ .

В методике определения остаточных напряжений  $\sigma_a$  в покрытиях необходимо знать значение производной  $df/da$ .

Для решения этой задачи вначале ищется интерполяционный полином подходящей степени (уравнение кривой  $f(a)$ ), проходящей через экспериментальные точки (рис. 3).

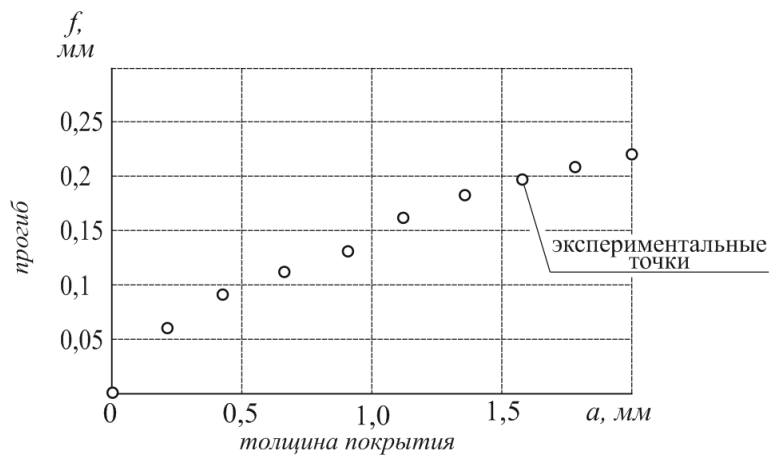


Рис. 3. Нахождение интерполяционного полинома

Fig. 3. Finding the interpolation polynomial

С целью уточнения искомого уравнения  $fd(a)$  целесообразно назначить координаты фиктивных точек – начальной ( $a_{н.ф.}$ , рис. 4), по уравнению параболы  $f_1d(x)$ , проходящей через точки  $(a_1, f_1)$  и  $(a_2, f_2)$ . Это необходимо для получения достаточно гладкой кривой (особенно для полинома высокой степени) в начале координат и конце кривой.

Уравнение параболы в начальных точках будет иметь вид:

$$f_1d(x) = fd_1 \cdot a \frac{x - a_2}{a_1(a_1 - a_2)} + fd_2 \cdot \frac{x - a_1}{a_2(a_2 - a_1)}. \quad (24)$$

Для конечной точки  $a_{к.ф.}$  уравнение параболы  $f_2d(x)$ , проходящей через точки  $(a_{i-1}, fd_{i-1})$ , будет в следующем виде:

$$f_2d(x) = f_{i-1} \frac{(x - a_i)(x - a_{i+1})}{(a_{i-1} - a_i)(a_{i-1} - a_{i+1})} + f_i \frac{(x - a_{i-1})(x - a_{i+1})}{(a_i - a_{i-1})(a_i - a_{i+1})} + f_{i+1} \frac{(x - a_{i-1})(x - a_i)}{(a_{i+1} - a_{i-1})(a_{i+1} - a_i)}. \quad (25)$$

Тогда, задавая принятое значение абсцисс начальной точки  $a_{н.ф.} = 0,1$  мм и конечной фиктивной точки  $a_{к.ф.} = a_n + 0,1$ , находим соответствующие прогибы по формулам (23) и (24).

Таким образом, получаем требуемое уравнение  $f(a)$  в виде полинома, проинтегрировав который, находим и соответствующие величины производных  $df/da$ .

Описанная процедура подбора интерполяционного полинома реализована в специально

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

разработанном алгоритме и составленной Mathcad-программе, позволяющей вычислить и последующие расчеты в диалоговом режиме. В качестве программного продукта используют

пакет Mathcad–Prime6 2020. Результаты расчета могут быть представлены как в виде таблиц, так и в виде графиков.

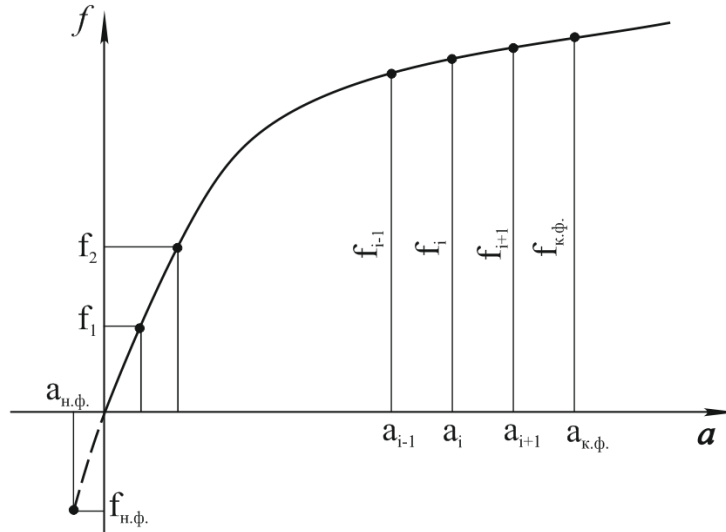


Рис. 4. Координаты фиктивных точек

Fig. 4. Coordinates of fictitious points

## Результаты

На основании рассмотренной методики расчета и практических данных измерения параметров прогиба, изменения толщины и массы нанесенного слоя при послойном напылении различных материалов на стальной образец прямоугольной формы определены величины

остаточных напряжений в покрытии для различных материалов и на различных параметрах напыления. Подтверждено, что они зависят от технологических параметров и типа наносимого материала.

В качестве иллюстрации обработки экспериментальных данных приведен рис. 5.

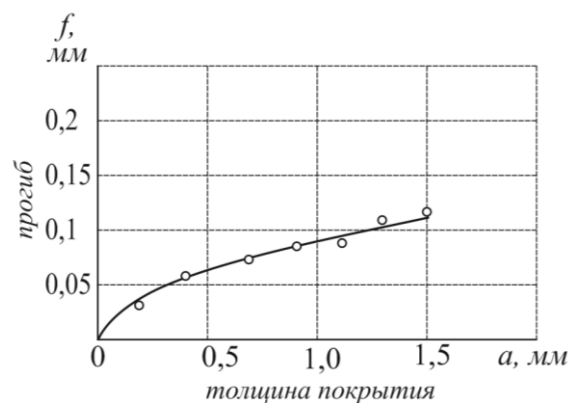


Рис. 5. Зависимость прогиба образцов от толщины покрытия при дистанции напыления  $l_n = 120$  мм и скорости перемещения металлатора  $V_n = 26,4$  мм/с для материалов на следующих режимах горения дуги: Св–08А, диаметр 2,0 мм ( $I_{св} = 150$  А,  $U_d = 28$  В, частота пульсаций 65–75 Гц)

Fig. 5. Dependence of the sample deflection on the coating thickness at a spraying distance  $l_n = 120$  mm and a metallizer movement speed  $V_n = 26.4$  mm/s for materials in the following arc burning modes: Св–08А, diameter 2.0 mm ( $I_{св} = 150$  А,  $U_d = 28$  V, ripple frequency 65–75 Hz)



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

На рис. 6 приведені залежності змінення прогибів образців для деяких фіксованих значень товщини покриття при напыленні проволокою Св–08А. Можна побачити, що

прогиб образців змінюється в достатньо широких діапазонах, що сказується на величині залишкових напружень в покритті і основі.

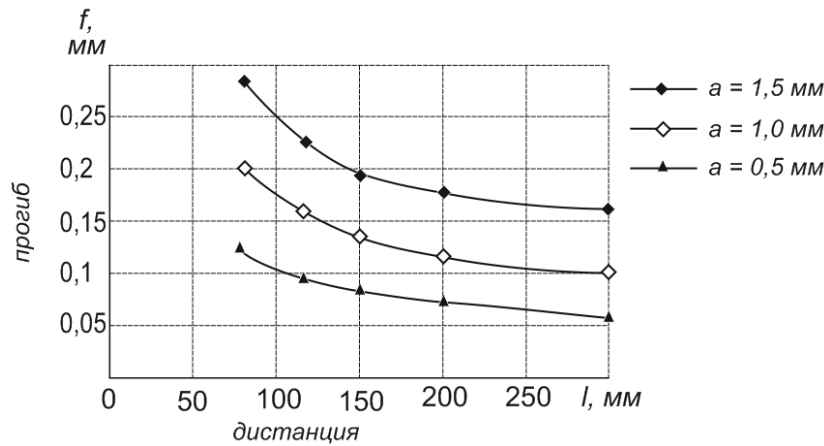


Рис. 6. Залежність прогибу образців від товщини наносимого покриття  $V_n = 26,4$  мм/с для покриття, нанесеного проволокою Св–08А діаметром 2,0 мм ( $I_{св} = 150$  А,  $U_d = 28$  В, частота пульсацій 65–75 Гц)

Fig. 6. Dependence of the sample deflection on the thickness of the applied coating  $V_n = 26.4$  mm/s for the coating applied with wire Св–08А with a diameter of 2.0 mm ( $I_{св} = 150$  А,  $U_d = 28$  V, ripple frequency 65–75 Hz)

Ісходя з аналізу графіків, можна зробити висновок, що залишкові напруження розподіляються дуже нерівномірно по товщині покриття. Зростання величини напружень не прямо пропорційно збільшенню товщини наносимого покриття і мають максимальне значення в перехідній зоні на участку неоднородності покриття – образці.

Найбільш оптимальним вважається послідовне нанесення малих шарів товщиною 0,5 мм на відстані (відстання від зони горіння дуги до поверхні деталі) 150 мм, що може бути застосовано тільки для даного типу наносимого матеріалу. Проведені дослідження п'яти різних типів розпилюваних матеріалів підтверджують, що величина і принцип розподілення залишкових напружень в покритті критично залежать від властивості напылюваного матеріалу, відстані напылення і наносимого за один проход шару. З зменшенням відстані напылення менше 80 мм різко зростає товщина покриття, нанесеного за один проход, і, відповідно, прогиб образця і необхідні залишкові напруження.

### Наукова новизна і практична значимість

В роботі розглянуто вплив залишкових напружень на придатність напылених покриттів, представлена математична модель, що визначає залишкові напруження в покриттях, нанесених різними методами газотермічного напылення, в тому числі з використанням пульсуючого розпилюючого повітряного потоку. Результати, отримані в межах даної роботи, дозволять контролювати напружене стан покриттів, нанесених різними методами газотермічного напылення, їх можна застосовувати при розв'язанні конструкторських завдань, крім цього, вони є актуальними в освітніх цілях при підготовці профільних спеціалістів по інженерним напрямкам.

### Висновки

1. Розроблена математична модель розподілення залишкових напружень в нанесеному покритті на призматическому стержні, позво-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ляющая установит величину и характер распределения напряжений в покрытии и стержне, а также факт «скачка» напряжений в переходной зоне.

2. Остаточные напряжения в напыленном газотермическом покрытии распределяются неравномерно по толщине и имеют максималь-

ное значение в переходной зоне. С послойным нарастанием толщины покрытия величина напряжения возрастает непропорционально, замедляя рост, однако суммарная усадочная сила в слое и, соответственно, уровень напряжений в переходной зоне непрерывно возрастают.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Глушкова Д. Б. Повышение долговечности поршневых колец методом двухпроволочной металлизации. *Вестник ХНАДУ*. 2018. Вып. 82. С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2018.82.0.27>
2. Девойно О. Г., Пантелеенко А. Ф. Исследование износостойких покрытий из диффузионно-легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой. *Наука и техника*. 2017. Т. 3, № 16. С. 249–255. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255>
3. Зайцев А. Н., Александрова Ю. П., Ягопольский А. Г. Сравнительный анализ физико-механических свойств газотермических радиационно-стойких электроизоляционных покрытий в зависимости от метода нанесения. *Известия Высших Учебных Заведений. Машиностроение*. 2018. № 6 (699). С. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-6-12-23>
4. Захаров Б. М., Ступников В. П., Маркосян Т. С. Об использовании разделительных покрытий в высокотемпературных технологических процессах. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение*. 2016. № 6. С. 136–140. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-6-136-140>
5. Кравченко И. Н., Зубрилина Е. М., Чеха Т. А., Добычин М. В. Технология нанесения защитных покрытий на поршневые кольца дизельных двигателей. *Вестник ДГТУ*. 2016. № 3 (86). С. 59–64. DOI: <https://doi.org/10.12737/20221>
6. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М. Получение композиционного керамического материала для газотермического напыления. *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 181–188. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-181-188>
7. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Пантелеенко А. Ф. Материалы для газотермического напыления, полученные методом диффузионного легирования из порошков на основе сталей аустенитного класса. *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 380–385. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-380-385>
8. Петришин Г. В., Быстренков В. М., Одарченко В. И. Метод обеспечения износостойкости лопаток лопатных смесителей. *Литье и металлургия*. 2019. № 2. С. 32–35. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-32-3512>
9. Роянов В. А., Зусин В. Я., Самогугин С. С. *Дефекты в сварных соединениях и покрытиях*: учебное пособие. Мариуполь: Изд-во ПГТУ, 2000. 184 с.
10. Тимохова О. М., Бурмистрова О. Н., Тимохов Р. С. Исследование интенсивности изнашивания газотермических покрытий деталей лесных машин. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. № 8 (98). С. 153–156.
11. Noyce P. A., Crevello G. L. Metallized Coatings for Corrosion Control. *Structural Practices*. 2017. P. 16–21.
12. Preikschat P., Skalsky A. Metal Coating as a Base for Paint. *IST International Surface Technology*. 2018. P. 38–39.

О. М. СЕРЕНКО<sup>1</sup>, И. В. ЗАХАРОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Автоматизация та механізація зварювального виробництва», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 958 20 17, ел. пошта zsv-73@i.ua, ORCID 0000-0002-8536-6313

<sup>2\*</sup>Каф. «Автоматизация та механізація зварювального виробництва», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 845 25 39, ел. пошта zakharovai75@gmail.com, ORCID 0000-0002-3492-0134

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОКРИТТЯХ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ДУГОВОЇ МЕТАЛІЗАЦІЇ З ПУЛЬСУЮЧИМ РОЗПИЛЮВАЛЬНИМ ПОТОКОМ

**Мета.** Автори передбачають розробити математичну модель розрахункового визначення залишкових напружень у довільному шарі газотермічного покриття на підставі величини зміни геометрії основи (прогин зразка) та закону зміни похідної від товщини шару, для подальшого регулювання цих напружень, змінюючи технологічні параметри нанесення матеріалів під кожен вид напилюваного покриття. **Методика.** На підставі відомих робіт із визначення напружень у зварних з'єднаннях, наплавлених сталевих шарах вироблено підхід для визначення прогину зразків після пошарового напилення. Ці параметри прогину покладено в розроблену математичну модель впливу на напружений стан. Систематизовано відомості з вивчення основних видів залишкових (внутрішніх) напружень, як I роду, які розподілені в об'ємі всієї деталі (зразка) з покриттям, так і II, локалізовані в об'ємі частинок, які напилюють. **Результати.** Представлено дослідження залишкових напружень, що виникають у нанесеному шарі, величина й характер розподілу яких залежить від типу, основного та напилюваного матеріалів, способів і параметрів напилення, жорсткості деталі та інших факторів. Показано важливу роль оцінки залишкових напружень в газотермічному покритті розрахунковим методом у зв'язку зі складністю експериментального визначення кінетики розвитку напружень в композиті покриття – основа. **Наукова новизна.** Автори цієї роботи на підставі вперше створеної математичної моделі та програмного продукту Mathcad–Prime 6 2020 провели дослідження рівня та принципів утворення залишкових напружень у покритті в разі газотермічного пошарового напилення різними матеріалами, у тому числі з можливістю використання пульсуючого розпилювального повітряного потоку. Аналітичні дослідження показали, що увагу в літературі за останні п'ять–сім років було приділено вивченню залишкових напружень і деформацій у зварних з'єднаннях, і тільки зростання інтересу до технології напилення відкриває широкі можливості вивчення формування полів напружень у газотермічному покритті. **Практична значимість.** Результати, отримані в рамках цієї роботи, підтверджують утворення залишкових напружень у покриттях і можуть бути використані як розрахункові програми для вирішення конструкторських завдань, а також в освітніх цілях під час підготовки профільних фахівців з інженерних спеціальностей.

*Ключові слова:* працездатність; залишкові напруження; покриття; основа; математична модель

О. М. SERENKO<sup>1</sup>, І. В. ZAKHAROVA<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Automation and Mechanization of Welding Production», State Higher Educational Institution, Priazovskiy State Technical University, Universitetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (067) 958 20 17, e-mail zsv-73@i.ua, ORCID 0000-0002-8536-6313

<sup>2\*</sup>Dep. «Automation and Mechanization of Welding Production», State Higher Educational Institution, Priazovskiy State Technical University, Universitetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (067) 845 25 39, e-mail zakharovai75@gmail.com, ORCID 0000-0002-3492-0134

## DETECTION OF RESIDUAL STRESSES IN COATINGS OBTAINED BY THE METHOD OF ARC METALLIZATION WITH A PULSATING SPRAYING FLOW

**Purpose.** The authors propose to develop a mathematical model for the calculated determination of residual stresses in arbitrary layer of a thermal gas coating based on the change magnitude in the base geometry (sample deflection) and the variation law of the layer thickness derivative, further regulation of these stresses by changing the technological parameters of spraying for each type of sprayed coating. **Methodology.** Based on known works on stress detection of in welded joints, the approach of determination of samples deflection after layer-by-layer spraying was developed. These deflection parameters are the basis for the developed mathematical model of influence on the stress state. The data on the study of the main types of residual (internal) stresses, as I type, distributed in the volume of the whole part (sample) with coating, and II type, localized in the volume of sprayed particles, are systematized. **Findings.** We presented investigations of the residual stresses arising in the applied layer, the magnitude and nature of the distribution of which depend on the type, base and sprayed materials, methods and parameters of spraying, the rigidity of the part, and other factors. The important role of evaluating residual stresses in a thermal gas

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

coating by the calculation method is shown in connection with the complexity of the experimental determination of the kinetics of stress development in the coating-base composite. **Originality.** The authors of this work, on the basis of the first created mathematical model and software product Mathcad-Prime 6 2020, conducted a study of the level and principles of the formation of residual stresses in the coating during gas-thermal layer-by-layer spraying with various material, including the possibility of using a pulsating spraying air flow. Analytical studies have shown that the attention in the literature over the past five to seven years has been paid only to the study of residual stresses and deformations in welded joints, and only the growing interest in spraying technology opens up wide possibilities for studying the formation of stress fields in a thermal gas coating. **Practical relevance.** The results obtained in this paper confirm the formation of residual stresses in coatings and can be used as computational programs to solve design tasks, as well as for educational purposes during experts training in engineering fields.

*Keywords:* operability; residual stresses; coating; base; mathematical model

## REFERENCES

1. Hlushkova, D. B. (2018). Increase of longness of piston rings method of two-wire metalization. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 82, 27-34.  
DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2018.82.0.27> (in Russian)
2. Devoino, O. G., & Panteleenko, A. F. (2017). Investigation on wear-resistant coatings from diffusion-alloyed austenitic steel obtained by plasma spraying and subsequent laser processing. *Science & Technique*, 16(3), 249-255. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255> (in Russian)
3. Zaytsev, A. N., Aleksandrova, U. P., & Yagopolskiy, A. G. (2018). A Comparative Analysis of Physical and Mechanical Properties of Gas-Thermal Radiation-Resistant Electrical Insulating Coatings Depending on the Application Method. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 6(699), 12-23.  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-6-12-23> (in Russian)
4. Zakharov, B. M., Stupnikov, V. P., & Markosyan, T. S. (2016). On the use of Dividing Coatings in High-Temperature Technological Processes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 6, 136-140. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-6-136-140> (in Russian)
5. Kravchenko, I. N., Zubrilina, E. M., Czecha, T. A., & Dobyichin, M. V. (2016). Technique of applying protective coatings on diesel piston rings. *Vestnik of Don State Technical University*, 3(86), 59-64.  
DOI: <https://doi.org/10.12737/20221> (in Russian)
6. Okovity, V. A., Panteleenko, F. I., Okovity, V. V., & Astashinsky, V. M. (2017). Production of composite ceramic material for thermal spraying. *Science & Technique*, 16(3), 181-188.  
DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-3-181-188> (in Russian)
7. Panteleenko, F. I., Okovity, V. A., & Panteleenko, A. F. (2019). Materials for Gas-Thermal Spraying, Obtained by Diffusion Alloying from Powders Based on Austenitic Steels. *Science & Technique*, 18(5), 380-385.  
DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-380-385> (in Russian)
8. Petrishin, G. V., Bystrenkov, V. M., & Odarchenko, V. I. (2019). Method of providing wear-resistance of the blades of paddle mixers. *Litiyo i Metallurgiya*, 2, 32-35.  
DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-32-35> (in Russian)
9. Royanov, V. A., Zusin, V. Ya., & Samotugin, S. S. (2000). *Defekty v svarnykh soedineniyakh i pokrytiyakh: uchebnoe posobie*. Mariupol: Izdatelstvo PGU. (in Russian)
10. Timokhova, O. M., Burmistrova, O. N., & Timokhov, R. S. (2020). Investigation of the wear rate of thermal spray coatings of forest machine parts. *International Research Journal*, 8(98), 152-156. (in Russian)
11. Noyce, P. A., & Crevello, G. L. (2017). Metallized Coatings for Corrosion Control. *Structural Practices*, 16-21. (in English)
12. Preikschat, P., & Skalsky, A. (2018). Metal Coating as a Base for Paint. *IST International Surface Technology*, 38-39. (in English)

Поступила в редколлегию: 05.06.2020

Принята к печати: 09.10.2020