

Миранович А.В.¹, Мрочек Ж.А.², Калиев Б.К.³

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ МНОГОСЛОЙНОМ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

1) *Белорусский государственный аграрный технический университет,*

2) *Белорусский национальный технический университет*

Минск, Беларусь

3) *Кызылординский государственный университет им. Коркыт Ата,*

г. Кызылорда, Республика Казахстан

В статье представлена физико-математическая модель определения остаточных напряжений в системе многослойное покрытие-основа при ЭМН специальных паст поверхности цилиндрических деталей и результаты численных исследований влияния теплонпряженности процесса и химического состава порошков на величину остаточных напряжений. Численные исследования проверены экспериментально рентгеноструктурным анализом.

В результате исследований установлено, что при ЭМН специальных паст в покрытиях формируются растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения, в основе – сжимающие тангенциальные и радиальные. Увеличение теплонпряженности процесса наплавки за счет повышения разрядного тока приводит к росту деформаций в системе покрытие-основа. При этом изменение разрядного тока от 100 до 150 А увеличивает остаточные напряжения в 1,2 – 1,7 раза. По условию минимальных остаточных напряжений на границе раздела покрытие-основа наиболее благоприятными для эксплуатационных условий будут покрытия из порошка Fe-2%Ti, которые имеют наименьшие растягивающие остаточные напряжения в покрытии.

Известно [1], что для упрочнения и восстановления поверхностей пустотелых и нежестких деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники, износ которых превышает 0,1 мм на диаметр, применяется электромагнитная наплавка (ЭМН) специальными пастами, обеспечивающая многослойное нанесение износостойких покрытий. Основным преимуществом этого способа является использование смеси композиционных ферромагнитных порошков (ФМП) и связующего компонента (эпоксидной смолы и жидкого стекла), которая обеспечивает в процессе ЭМН точное регулирование расхода порошка, защиту расплава частиц ФМП в рабочей зоне от воздействия окружающей среды и легирование наплавленных слоев необходимыми компонентами [1, 2].

В процессе ЭМН специальными пастами в системе многослойное покрытие-основа возникают и перераспределяются остаточные напряжения, влияющие на усталостную прочность деталей, износостойкость и коррозионную активность их рабочих поверхностей. Вместе с тем, основной причиной нарушения прочности покрытий вследствие появления в них трещин являются напряжения первого рода (напряжения наплавки) [2, 3].

В этом случае покрытие, в первом приближении, рассматривается как сплошная среда вследствие их невысокой пористости (4 – 8 %). Это существенно упрощает задачу и позволяет проводить расчеты в рамках теории механики сплошной среды (сопротивления материалов, теорий упругости, пластичности и др.) с определенными погрешностями в результаты расчета. Такой подход во многих случаях оправдан исходя из

возможности создания относительно простых программных средств, реализующих физико-математические модели и их уточнение по результатам экспериментов [4, 5].

Ввиду того, что при нанесении покрытий из различных материалов в процессе ЭМН на цилиндрические детали специальными пастами наплавленный слой рассматривается как тонкостенная многослойная цилиндрическая оболочка [3, 5, 6], то для определения остаточных напряжений, возникающих в системе многослойное покрытие-основа, наиболее целесообразно рассматривать многослойную оболочку как эквивалентную однослойную (рис.). При этом, заменив многослойную цилиндрическую оболочку эквивалентной толщиной $\delta_3 = \sum_{i=1}^n \delta_i$ с радиусом R срединной поверхности, эквивалентная однослойная оболочка деформируется, так же как и многослойная.

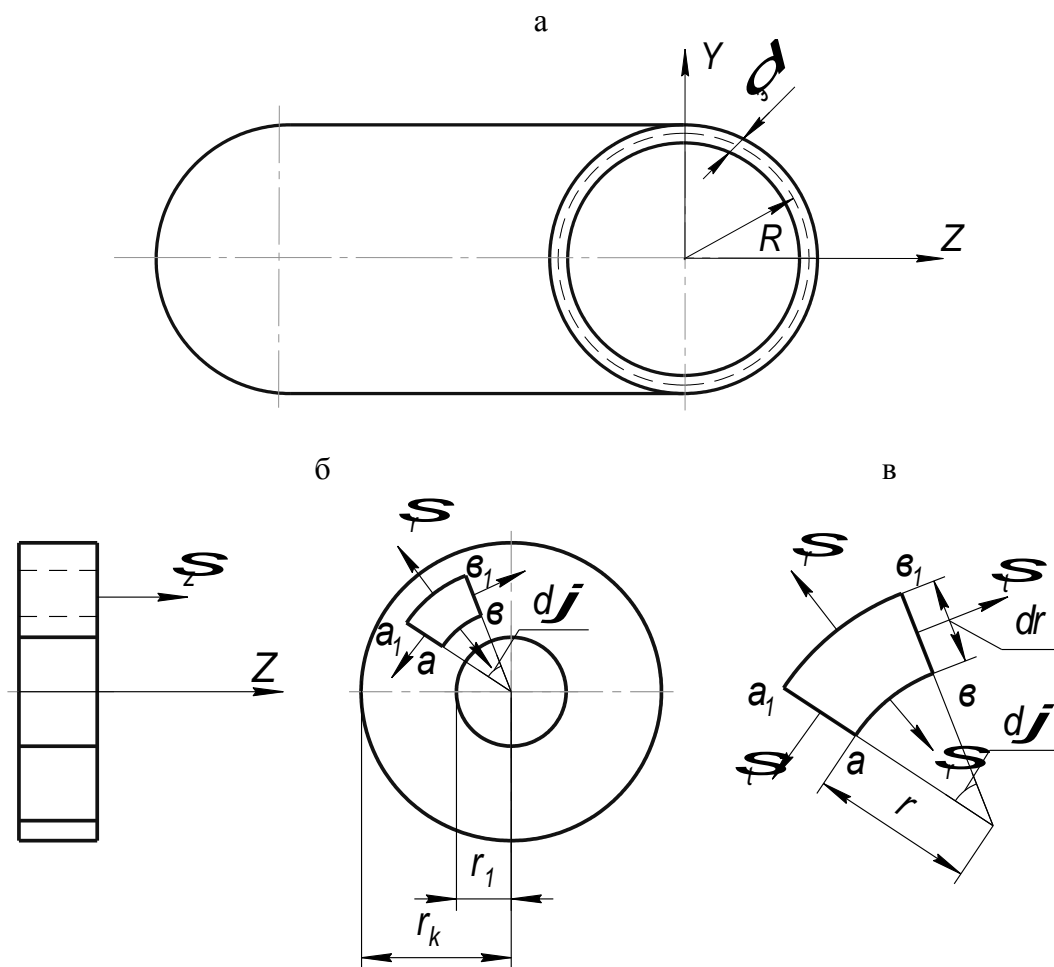


Рис. 1. Основная цилиндрическая деталь:
 a – эквивалентный слой;

b – кольцо, вырезанное из цилиндра; v – элемент, вырезанный из кольца

В процессе ЭМН остаточные напряжения первого рода уравниваются в объеме, соизмеримом с размерами упрочняемой цилиндрической детали и наплавленного слоя. При этом микрокапля расплава ФМП в момент соприкосновения с обрабатываемой поверхностью имеет температуру плавления $T_{пл}$. Так как это происходит при наличии смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), то температура в контуре микрокапли ФМП быстро падает к моменту завершения образования первого слоя на поверхности основы. Поэтому наплавленный слой имеет небольшую температуру t_2 , которую с достаточной

точностью можно считать одинаковой по длине стержня, т.е. в направлении оси Z (рис.). По радиусу основы температура будет уменьшаться от поверхности к центру.

Вследствие неравномерного распределения температуры по радиусу в материале детали возникают остаточные напряжения (напряжения наплавки). Учитывая, что температура детали до ЭМН была равна температуре окружающей среды t_k , то температура, от которой будут возникать напряжения наплавки, будет равна:

– в центре цилиндрической детали (при $r = 0$)

$$T_0 = t_{0n} - t_k;$$

– на поверхности цилиндрической детали

$$T_2 = t_{2n} - t_k.$$

В процессе остывания после нанесения первого слоя дополнительно возникают напряжения остывания, как в основной детали, так и в наплавленном слое.

При наплавке следующего слоя температура на поверхности детали снова устанавливается примерно равной t_2 (или несколько выше, так как деталь к этому времени полностью не остыла). Однако, ввиду того, что процесс ЭМН осуществляется в потоке СОЖ, то t_{2i} (температура на поверхности детали при наплавке i -го слоя) будет мало отличаться от t_2 , а t_{0i} (температура в центре детали) от t_0 . Так как $t_{2i} > t_2$ и $t_{0i} > t_0$, то остальные напряжения, возникшие при остывании после нанесения предыдущего слоя, исчезнут. После нанесения последнего слоя температура на поверхности основной детали и в наплавленных слоях равна t_{2n} , а в центре основной детали t_{0n} .

Условно, заменив наплавленные слои эквивалентным слоем, напряжения наплавки в основной детали, а также напряжения остывания в основной детали и в эквивалентном слое, определяются, как

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= t_{0n} - t_k; \\ T_2 &= t_{2n} - t_k. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

При этом распределение температуры по радиусу описывается [2]

$$T_0(r) = T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_{\hat{e}}}\right)^n \quad (2)$$

где $T_2^* = T_2 - T_0$; r – текущий радиус; r_k – внешний радиус детали; n – параметр, определяемый на основании экспериментальных замеров температуры по радиусу.

Напряжения наплавки в основном цилиндре. Предположим, что распределение температуры симметричным относительно оси цилиндра и постоянно вдоль этой оси. В этом случае деформации цилиндра будут симметричными относительно его оси.

Вырежем из цилиндра кольцо с двумя поперечными сечениями, перпендикулярными к оси и находящимися одно от другого на расстоянии, равном единице (рис. 1.). Допустим, что при деформации эти поперечные сечения остаются плоскими, если взять их на достаточном расстоянии от торцов цилиндра. Следовательно, в этом случае относительные удлинения в осевом направлении будут постоянными. Обозначим ось цилиндра Z , осевое перемещение w , текущий радиус r , перемещение в направлении радиуса u . Тогда относительные удлинения: осевое, радиальное и окружное будут равны соответственно

$$\varepsilon_z = \frac{dw}{dz} = \text{const}; \quad \varepsilon_r = \frac{du}{dr}; \quad \varepsilon_t = \frac{u}{r}. \quad (3)$$

Выделим из кольца элемент a в a_1 в l (рис. 1., в).

Ввиду симметрии по граням этого элемента будут отсутствовать касательные напряжения, а будут присутствовать только нормальные напряжения σ_z , σ_r , σ_t . Тогда связь между деформациями и напряжениями запишется законом Гука с учетом температурных деформаций следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E_0} (\sigma_r - \mu_0 (\sigma_t + \sigma_z)) + \alpha_0 T(r); \\ \varepsilon_t &= \frac{1}{E_0} (\sigma_t - \mu_0 (\sigma_z + \sigma_r)) + \alpha_0 T(r); \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E_0} (\sigma_z - \mu_0 (\sigma_r + \sigma_t)) + \alpha_0 T(r), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где E_0 , μ_0 , α_0 – модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент линейного температурного расширения материала детали. Из уравнений (4) определим напряжения

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E_0} (\sigma_r - \mu_0 (\sigma_t + \sigma_z)) + \alpha_0 T(r); \\ \varepsilon_t &= \frac{1}{E_0} (\sigma_t - \mu_0 (\sigma_z + \sigma_r)) + \alpha_0 T(r); \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E_0} (\sigma_z - \mu_0 (\sigma_r + \sigma_t)) + \alpha_0 T(r), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\theta = \varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_z$ – объемная деформация.

Условие равновесия выделенного элемента a в a_1 в l (рис. 1., в) запишется уравнениями

$$r \frac{d\sigma_r}{dz} + \sigma_r - \sigma_t = 0; \quad \int_A \sigma_z dA = 0 \quad (6)$$

где A – площадь поперечного сечения основного цилиндра.

Решив совместно уравнения (3), (5) и (6), получим

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d(ur)}{dr} \right) = \frac{1 + \mu_0}{1 - \mu_0} \alpha_0 \frac{dT(r)}{dr}. \quad (7)$$

Проинтегрировав уравнение (7) дважды по r , найдем

$$u = Cr + \frac{D}{r} + \frac{1 + \mu_0}{1 - \mu_0} \frac{\alpha_0}{r} \int_{r_1}^r T(r) dr. \quad (8)$$

Деформации ε_r и ε_t по зависимостям (3) запишутся через перемещение u согласно (8), а деформация ε_z определится из второго уравнения (6).

В этом случае, подставив деформации в (5), получим общие зависимости для напряжений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E_0}{1-\mu_0} \left(C + \frac{1-\mu_0}{1+\mu_0} \frac{D}{r^2} - \frac{\alpha_0}{r^2} \int_{r_1}^r rT(r)dr \right); \\ \sigma_t &= \frac{E_0}{1-\mu_0} \left(C + \frac{1-\mu_0}{1+\mu_0} \frac{D}{r^2} - \frac{\alpha_0}{r^2} \int_{r_1}^r rT(r)dr - \alpha_0 T(r) \right); \\ \sigma_z &= \frac{E_0 \alpha_0}{1-\mu_0} \left(\frac{2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^r rT(r)dr - T(r) \right), \end{aligned} \right\} \quad (8a)$$

Постоянные интегрирования C и D определяются из условий на внутренней и наружной поверхностях цилиндра. Так как в процессе наплавки эти поверхности свободны от внешних сил, то условия для определения C и D выразятся:

$$(\sigma_r)_{r=r_1} = 0; \quad (\sigma_r)_{r=r_k} = 0.$$

Используя эти условия в уравнениях (8, 8a), найдем

$$C = \frac{\alpha_0}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^r rT(r)dr,$$

$$D = \frac{(1+\alpha_0)r_1^2 \alpha_0}{(1-\mu_0)(r_k^2 - r_1^2)} \int_{r_1}^r rT(r)dr.$$

С учетом зависимостей C и D напряжения запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E_0 \alpha_0}{(1-\mu_0)r^2} \left(\frac{r^2 - r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_k} rT(r)dr - \int_{r_1}^r rT(r)dr \right); \\ \sigma_t &= \frac{E_0 \alpha_0}{(1-\mu_0)r^2} \left(\frac{r^2 - r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_k} rT(r)dr + \int_{r_1}^r rT(r)dr - r^2 T(r) \right); \\ \sigma_z &= \frac{E_0 \alpha_0}{1-\mu_0} \left(\frac{2}{r_k^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_k} rT(r)dr - T(r) \right). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Чтобы определить напряжения наплавки в основном (полном) цилиндре необходимо в зависимости (9) подставить распределение температуры $T(r)$ по радиусу согласно (2).

После подстановки и интегрирования получим

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r(H)} &= \frac{E_0 \alpha_0 T_2^*}{(n+2)(1-\mu_0)} \frac{r_k^2}{r^2} \left[\frac{r^2 - r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \left(1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right) - \left(\left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right) \right]; \\ \sigma_{t(H)} &= \frac{E_0 \alpha_0}{(1-\mu_0)} \frac{r_k^2}{r^2} \left[\frac{T_2^* r_k^2}{n+2} \left(\frac{r^2 - r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \left(1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right) - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} - (n+1) \left(\frac{r}{r_k} \right)^{n+2} - T_0 r_1^2 \right) \right]; \\ \sigma_{z(H)} &= \frac{E_0 \alpha_0 T_2^*}{(1-\mu_0)} \left[\frac{2r_k^2}{(n+2)(r_k^2 - r_1^2)} \left(1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right) - \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Если основной цилиндр сплошной, то для определения напряжений наплавки необходимо в зависимостях (10) использовать условия, что $r_1 = 0$. В этом случае напряжения наплавки в основном цилиндре будут определяться, как

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r(H)}^* &= \frac{E_0 \alpha_0 T_2^*}{(n+2)(1-\mu_0)} \left[1 - \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right]; \\ \sigma_{t(H)}^* &= \frac{E_0 \alpha_0 T_2^*}{(n+2)(1-\mu_0)} \left[1 - (n+1) \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right]; \\ \sigma_{z(H)}^* &= \frac{E_0 \alpha_0 T_2^*}{(n+2)(1-\mu_0)} \left[2 - (n+2) \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Таким образом, зависимости (10) и (11) позволяют определить напряжения, возникающие в процессе наплавки в основном цилиндре в том случае, когда он полый, и когда он сплошной.

Напряжения, возникающие при остывании после наплавки всех слоев. После наплавки всех слоев заменим их одним эквивалентным слоем с эквивалентными – модулем упругости E_3 , коэффициентом Пуассона μ_3 и коэффициентом линейного температурного расширения α_3 . В результате получаем полый толстостенный цилиндр с наплавленным эквивалентным слоем. Согласно [4, 5], где рассматривается полый цилиндр с одним слоем, напряжения остывания в основном цилиндре определяются зависимостями

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r(0)} &= \frac{E_0}{1-\mu_0^2} \left[C_0(1+\mu_0) - D_0 \frac{1-\mu_0}{r^2} \right] + \frac{E_0 \alpha_0}{(1-\mu_0)r^2} \left[\frac{r^2 - r_1^2}{2} T_0 + \frac{T_2^* r_k^2}{n+2} \left(\left(\frac{r}{r_k} \right)^{n+2} - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right) \right]; \\ \sigma_{\varphi(0)} &= \frac{E_0}{1-\mu_0^2} \left[C_0(1+\mu_0) + D_0 \frac{1-\mu_0}{r^2} \right] + \frac{E_0 \alpha_0}{(1-\mu_0)} \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n - \frac{T_2^* r_k^2}{(n+2)r^2} \left(\left(\frac{r}{r_k} \right)^{n+2} - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right) - \frac{T_0}{2r^2} (r^2 - r_1^2) \right]; \\ \sigma_{z(0)} &= \frac{E_0}{(1+\mu_0)(1-2\mu_0)} [(1-\mu_0)\varepsilon_{z(0)} + 2\mu_0 C_0] + \frac{E_0 \alpha_0}{(1-\mu_0)} \left[T_0 + T_2^* \left(\frac{r}{r_k} \right)^n \right], \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

а напряжения остывания в эквивалентном слое следующими:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r(\vartheta)} &= \frac{E_\vartheta}{1-\mu_\vartheta^2} \left[C_\vartheta(1+\mu_\vartheta) - D_\vartheta \frac{1-\mu_\vartheta}{r^2} \right] + \frac{E_\vartheta \alpha_\vartheta T_2}{(1-\mu_\vartheta)r^2} \frac{r^2 - r_k^2}{2}; \\ \sigma_{\varphi(\vartheta)} &= \frac{E_\vartheta}{1-\mu_\vartheta^2} \left[C_\vartheta(1+\mu_\vartheta) + D_\vartheta \frac{1-\mu_\vartheta}{r^2} \right] + \frac{E_\vartheta \alpha_\vartheta T_2}{(1-\mu_\vartheta)} \left(1 - \frac{r^2 - r_k^2}{2r^2} \right); \\ \sigma_{z(\vartheta)} &= \frac{E_\vartheta}{(1+\mu_\vartheta)(1-2\mu_\vartheta)} [(1-\mu_\vartheta)\varepsilon_{z(\vartheta)} + 2\mu_\vartheta C_\vartheta] + \frac{E_\vartheta \alpha_\vartheta}{(1-\mu_\vartheta)} T_2, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где r_2 – внешний радиус эквивалентного слоя ($r_2 = r_k + \delta_0$).

$$\begin{aligned} C_0 &= -\frac{1-\mu_0}{r_k^2 - r_1^2} \left(K_1 + \frac{r_k^2}{E_0} P \right); D_0 = -\frac{(1+\mu_0)r_1^2}{r_k^2 - r_1^2} \left(K_1 + \frac{r_k^2}{E_0} P \right); \\ C_\vartheta &= \frac{1-\mu_\vartheta}{r_2^2 - r_k^2} \left(\frac{r_k^2}{E_0} P - \frac{\alpha_\vartheta T_2}{1-\mu_\vartheta} \frac{r_2^2 - r_k^2}{2} \right); \\ D_\vartheta &= \frac{(1+\mu_\vartheta)r_k^2}{r_2^2 - r_k^2} \left(\frac{r_k^2}{E_0} P - \frac{\alpha_\vartheta T_2}{1-\mu_\vartheta} \frac{r_2^2 - r_k^2}{2} \right); \\ K_1 &= \frac{\alpha_0 T_0}{1(1-\mu_0)} (r_k^2 - r_1^2) + \frac{\alpha_0 T_2^* r_k^2}{(1-\mu_0)(n+2)} \left(1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right); \\ P &= \frac{\frac{\alpha_\vartheta T_2}{1-\mu_\vartheta} - \frac{\alpha_0 T_0}{1-\mu_0} - \frac{2\alpha_0 T_2^* r_k^2}{(1-\mu_0)(r_k^2 - r_1^2)(n+2)} \left(1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right)}{\frac{(1-\mu_0)r_k^2 + (1+\mu_0)r_1^2}{E_0(r_k^2 - r_1^2)} + \frac{(1-\mu_0)r_k^2 + (1+\mu_0)r_1^2}{E_\vartheta(r_2^2 - r_k^2)}}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{z(0)} = -\frac{1}{B_1 + B_2} \left[\frac{E_0 \alpha_0 T_0}{2(1-\mu_0)} (r_k^2 - r_1^2) + \frac{E_0 \alpha_0 T_2^* r_k^2}{(1-\mu_0)(n+2)} \left(1 - \left(\frac{r_1}{r_k} \right)^{n+2} \right) + \frac{E_\vartheta \alpha_\vartheta T_2}{2(1-\mu_\vartheta)} (r_2^2 - r_k^2) + \frac{E_0 \mu_0 (r_k^2 - r_1^2)}{(1+\mu_\vartheta)(1-2\mu_\vartheta)} C_\vartheta \right];$$

$$B_1 = \frac{E_0 (1 - \mu_0)(r_k^2 - r_1^2)}{2(1 + \mu_0)(1 - 2\mu_0)}; B_2 = \frac{E_y (1 - \mu_y)(r_2^2 - r_k^2)}{2(1 + \mu_y)(1 - 2\mu_y)}.$$

Полные остаточные напряжения в основном цилиндре будут складываться из напряжений, возникающих при наплавке (10), и напряжений, возникающих при остывании (12), т.е.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r(\hat{n}\hat{d})} &= \sigma_{r(i)} + \sigma_{r(0)}; \\ \sigma_{t(\hat{n}\hat{d})} &= \sigma_{t(i)} + \sigma_{t(0)}; \\ \sigma_{z(\hat{n}\hat{d})} &= \sigma_{z(i)} + \sigma_{z(0)}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Остаточные напряжения в эквивалентном слое определяются зависимостями (15). Для того, чтобы определить остаточные напряжения в случае если основной цилиндр сплошной, необходимо в зависимостях (12 – 14) предположить, что $r_1 = 0$.

При определении остаточных напряжений для каждого образца задавались теплофизические и упругие характеристики материалов покрытия и основы [7, 8], диапазон температур, который обеспечивался режимом ЭМН. Последний был оптимальным [1] за исключением силы разрядного тока, т.к. изменением его регулировали температуру в системе покрытие-основа. Приняли, что покрытия наплавлялись на поверхность диаметром 40 мм из стали 45 (ГОСТ 1050 – 88), подвергнутой нормализации, порошками ФБХ 6-2, Fe-5% V, Fe-2% Ti, С-300. Установлено, что в зависимости от условий наплавки величина остаточных напряжений в покрытии изменялась в пределах от 166 до 598 МПа, в основе от – 12 до – 19 МПа. Характер их распределения не изменялся: в покрытии формируются растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения, в основе – сжимающие тангенциальные и радиальные. Увеличение теплонапряженности процесса ЭМН за счет повышения разрядного тока приводит к росту термопластических деформаций в системе покрытие-основа. Так, изменение разрядного тока от 100 до 150 А увеличивает остаточные напряжения в 1,2 – 1,7 раза. Например, для покрытия Fe-5% V при температуре поверхности основы 162 °С тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности покрытия равны 151 МПа, при 200 °С – 269 МПа, т.е. напряжения увеличиваются. При тех же условиях тангенциальные сжимающие напряжения на поверхности основы соответственно равны – 10,9; – 13,9 МПа. Следовательно, с возрастанием температуры увеличение тангенциальных напряжений в основе аналогично увеличению их в покрытии. Такая закономерность характерна и для других исследуемых материалов порошка. Так, например, наименьшие остаточные напряжения в используемом температурном диапазоне имеют покрытия из порошка Fe-2% Ti, наибольшие – С-300. Численные исследования остаточных напряжений показали, что при температуре основы 155 °С, которую обеспечивает оптимальная сила разрядного тока, равная 110 А, в покрытиях формируются растягивающие остаточные напряжения, которые для покрытий из рассматриваемых порошков в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:

$$169(\text{C-300}) \rightarrow 157(\text{ФБХ 6-2}) \rightarrow 149(\text{Fe-5\% V}) \rightarrow 133(\text{Fe-2\% Ti}).$$

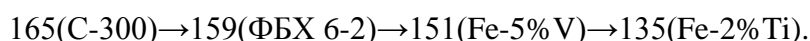
По условию минимальных остаточных напряжений на границе раздела покрытие-основа наиболее благоприятным для эксплуатационных условий будет покрытие из порошка Fe-2% Ti, которое имеет наименьшие растягивающие остаточные напряжения в покрытии.

Результаты численных исследований остаточных напряжений в системе покрытие-основа показали, что величина остаточных напряжений в зависимости от химического состава порошка и режима нанесения покрытий может меняться в широких пределах.

С целью проверки разработанного теоретического метода расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа проведены экспериментальные исследования с использованием рентгеноструктурного анализа и определения параметров линейно-напряжённого состояния материала по смещению линий рентгенограммы [7, 8].

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-7. Съёмка профиля рентгеновской линии выполнялась в автоматическом режиме. Покрытия из порошков на образцы из стали 45 формировали на оптимальном режиме.

Анализ полученных результатов показал, что в покрытиях формируются остаточные напряжения растяжения, которые для исследуемых порошков в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:



Установлено, что остаточные напряжения, определенные в покрытиях, как расчетным путем, так и экспериментально, по значениям близки. При этом определенные экспериментально имеют меньшие значения и расхождение величин напряжений находятся в пределах 14 – 18 %, что позволяет рекомендовать разработанную математическую модель для расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа при наплавке.

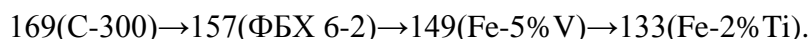
Заключение

В результате анализа экспериментальных результатов исследований и математических расчетов:

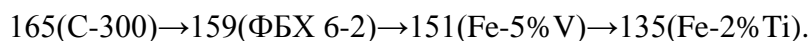
– разработана физико-математическая модель определения остаточных напряжений в системе покрытие-основа при многослойном нанесении порошков в составе паст ЭМН на цилиндрические поверхности деталей;

– численные расчеты остаточных напряжений показали, что при ЭМН в покрытиях формируются растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения, в основе – сжимающие тангенциальные и радиальные. Увеличение теплонапряженности процесса наплавки за счет повышения разрядного тока приводит к росту термопластических деформаций в системе покрытие-основа, а изменение разрядного тока от 100 до 150 А увеличивает остаточные напряжения в 1,2 – 1,7 раза;

– установлено, что при температуре основы 155°С, которую обеспечивает оптимальная сила разрядного тока, равная 110 А, в покрытиях формируются растягивающие остаточные напряжения, которые для покрытий из рассматриваемых порошков в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:



– анализ результатов, полученных экспериментальным путем, позволил установить, что в покрытиях формируются остаточные напряжения растяжения, которые для используемых порошков в порядке убывания их величины можно рассматривать в следующей последовательности:



ЛИТЕРАТУРА

1. Мрочек, Ж.А. Повышение износостойкости быстроизнашивающихся деталей сельскохозяйственной техники с использованием электромагнитной наплавки / Ж.А. Мрочек, А.В. Миранович // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 30 / Под ред. В.К. Шелега. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 142–144.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий./ П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко и др. – Минск : Беларуская навука, 1998. – 583 с.
3. Остаточные напряжения / Ж.А. Мрочек, С.С. Макаревич, Л.М. Кожуро и др. – Минск : УП «Технопринт», 2003. – 352 с.
4. Барвинок, В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
5. Ящерицын, П.И. Остаточные напряжения при электромагнитной наплавке / С.С. Макаревич, А.П. Ракомсин, Л.М. Кожуро // Весці НАН Беларусі. Сер.физ.-техн.навук. – 2000. – №2. – С.62-65.
6. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963. – 240 с.
7. Миркин Л.И. Рентгеноструктурный анализ машиностроительных материалов : Справочник. – М. : Машиностроение, 1979. – 134 с.
8. Комяк Н.И. Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений / Н.И. Комяк, Ю.Т. Мясников – Л. : Машиностроение, 1972. – 88 с.

УДК 621.789-977

Сакович Н. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЯ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния поверхностной высокотемпературной термомеханической обработки (ПВ ТМО) на микроструктуру металлопокрытий. Показано, что при ПВ ТМО металлопокрытий износ уменьшается по сравнению с закалкой в 2 раза.

Повышение прочности металлопокрытий при поверхностной высокотемпературной обработке (ПВ ТМО) определяется структурными изменениями, происходящими во время осуществления самой операции упрочнения и их стабильностью при последующих операциях термо- и механообработке. При осуществлении ПВ ТМО путем обкатки цилиндрической поверхности продольно перемещающимися роликами [1] было изучено влияния процесса на микро- и субмикроструктуру металлопокрытия следующего химического состава: $C-0,51\%$, $C_2-2\%$, $Mn-0,91\%$, $Si-0,46\%$.

Установлено, что мартенситная структура металлопокрытия в результате ПВ ТМО несколько измельчена по сравнению с высокочастотной закалкой. Однако трудно установить количественную закономерность в изменении микроструктуры в зависимости от режимов ПВ ТМО. Аналогичная картина была зафиксирована при определении твердости и микротвердости, которые после ПВ ТМО несколько увеличиваются. Указанные параметры в условиях термомеханической обработки, по-видимому, не являют-