

ЛИТЕРАТУРА

1. Акулович Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
2. Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
3. Мрочек, Ж.А. Использование постоянных магнитов в устройствах электромагнитной наплавки / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, А.В. Миранович // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 75–84.

УДК 621.793

Мрочек Ж.А., Миранович А. В., Макаревич С.С.

ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ «ПОКРЫТИЕ – ОСНОВА» ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ НА ПЛОСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Белорусский национальный технический университет

Белорусский государственный аграрный технический университет

Белорусский государственный технологический университет

Минск, Республика Беларусь

В статье представлены физико-математическая модель определения остаточных напряжений в системе покрытие-основа при ЭМН порошков на плоские поверхности деталей и результаты численных исследований влияния теплонапряженности процесса и химического состава порошков на величину остаточных напряжений. Численные исследования проверены экспериментально рентгеноструктурным анализом.

В результате исследований установлено, 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 деформаций в системе покрытие-основа. При этом изменение разрядного тока от 100 до 150 А увеличивает остаточные напряжения в 1,5 ... 1,8 раза. По условию минимальных остаточных напряжений на границе раздела покрытие-основа наиболее благоприятными для эксплуатационных условий будут покрытия из порошка X18ФН2М, которые имеют наименьшие растягивающие остаточные напряжения в покрытии.

Практика эксплуатации землеобрабатывающих машин показывает, что в качестве рабочих органов в основном используют плоские детали (фасонные или сплошные диски сеялок и барон, лемеха и полевые доски плугов и др.). Для повышения износостойкости их рабочие поверхности упрочняют способами, использующими высокоинтенсивные источники энергии (плазменная, индукционная, лазерная наплавки и др.) [1, 2]. К ним относится и электромагнитная наплавка (ЭМН), позволяющая получить толщину покрытия 0,4 – 0,8 мм.

Известны две схемы ЭМН ферропорошка на плоские поверхности деталей машин [3]. При осуществлении наплавки по первой схеме (рисунок 1, а) в рабочий зазор вводится ферропорошок в составе смазочно-охлаждающей жидкости, а по второй (рисунок 1, б) – в составе пасты (смесь эпоксидной смолы и жидкого стекла). Оба варианта имеют свои преимущества и недостатки. Так, применение первой схемы приводит к уменьшению коэффициента использования ферропорошка (0,70 – 0,78), так как зерна ферропорошка при нанесении покрытий выбрасываются из рабочей зоны в результате действия гидродинамических сил при электрических разрядах. При этом значительно уменьшается тепловая нагрузка на полюсный наконечник, благодаря чему облегчаются условия (устойчивость, стабильность процесса ЭМН) и ресурс работы. В случае использования второй схемы требуется строго дозированная подача ферропорошка и пасты, что усложняет процесс ЭМН. Однако в процессе наплавки происходит на-

грев и разложение пасты с выделением значительного количества углекислого газа и водорода, которые образуют экран рабочей зоны, предохраняющий процесс ЭМН от воздействия окружающей среды.

Известно [3], что при ЭМН в системе покрытие-основа возникают и перераспределяются остаточные напряжения. Это происходит из-за металлургической природы образования покрытий, использования легирующих элементов, значительного теплового воздействия на основной металл, быстрого и неравномерного охлаждения наплавленной детали, а также последующей механической обработки восстанавливаемой поверхности в сочетании с различными видами упрочнения [4, 5].

При этом остаточные напряжения, возникающие при формировании покрытия – это один из основных факторов, определяющих адгезию покрытия с основой. Однако измеряемая величина адгезии включает в себя величину остаточных напряжений, что не позволяет произвести их точную оценку [6, 7].

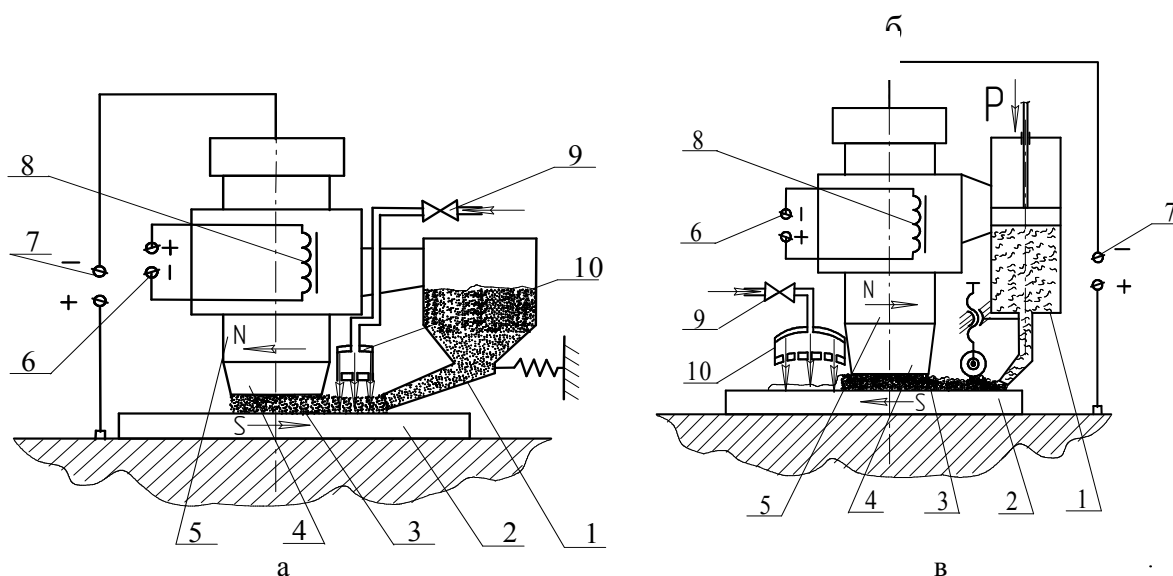


Рис. 1. Схемы ЭМН ферропорошка в составе смазочно-охлаждающей жидкости (а) и в составе пасты (б) на плоские поверхности деталей машин: 1 – бункер-дозатор; 2 – изделие; 3 – ферропорошок; 4 – полюсный наконечник; 5 – сердечник; 6 – источник питания электромагнита; 7 – источник технологического тока; 8 – электромагнитная катушка; 9 – кран; 10 – спрейер

В свою очередь, следует отметить сложность задачи описания процесса формирования остаточных напряжений из-за его дискретного характера, наличия пор, различия физико-механических свойств материалов покрытия и основы, наличия переходной зоны и т.д. Так, в процессе ЭМН композиционных порошков в системе покрытие-основа имеют место все три вида напряжений (напряжения I, II и III рода), но причиной нарушения прочности покрытия, появления трещин являются напряжения I рода [7]. В следствии этого в имеющихся экспериментальных и теоретических работах изучаются в первую очередь эти напряжения. Покрытия в первом приближении рассматриваются как сплошная среда, что может быть оправдано невысокой их пористостью. Это существенно упрощает задачу и позволяет проводить расчеты в рамках разработанных теорий механики сплошной среды (сопротивления материалов, теорий упругости, пластичности и др.), хотя, конечно же, и вносит определенные погрешности в результаты расчета. Однако для инженерной практики такой подход во многих случаях может быть оправданным исходя из возможности создания относительно простых программных средств, реализующих модели и их уточнение по результатам экспериментов.

Ввиду того, что процесс нанесения покрытий осуществляется на плоские поверхности деталей, то для определения напряжений при односторонней ЭМН выберем начало отсчета по грани стержня, противоположной наплавке (рисунок 2) и проведем по этой грани ось ZO.

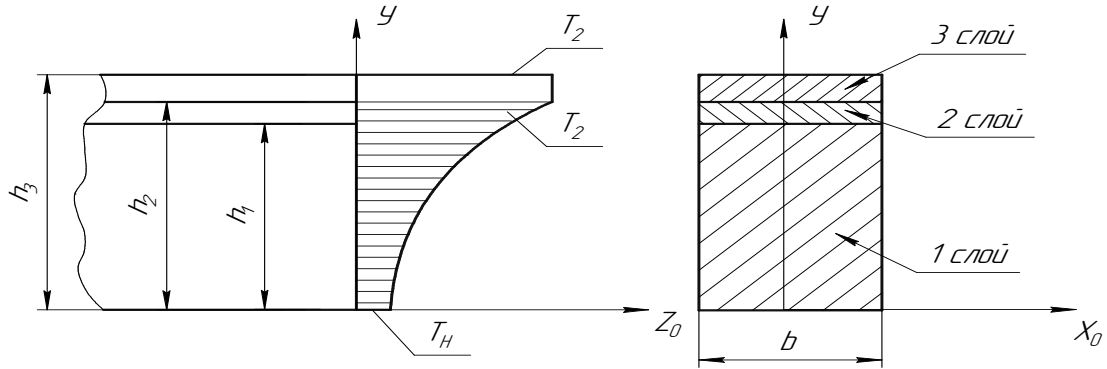


Рис. 2. Распределение температуры по высоте односторонне наплавленного стержня

Распределение температуры в момент появления адгезионной связи между наплавляемым слоем и заготовкой будет аналогичным (1)

$$T(y) - T_H + T_2^A \left(\frac{y}{h_2} \right)^n, \quad (1)$$

где T_H – температура на нижней грани заготовки (рисунок 3), т.е. на оси Z_0 ; $T_2^* = T_2 - T_H$; T_2 – температура на границе заготовки и наплавляемого слоя; n – положительное число.

Определим напряжения в заготовке от неравномерного распределения температуры, т.е. напряжения наплавки, которые будут возникать в заготовке до появления устойчивой адгезионной связи между заготовкой и наплавленным слоем. Для этого выделим из заготовки элементарный участок длиной dz . Если считать справедливой гипотезу плоских сечений, то после деформации сечение ab займет положение a_1b_1 (рисунок 3). На произвольном расстоянии y от оси Z_0 отрезок $AB = dz$ получит удлинение Δl , которое будет складываться из удлинения Δl_0 по оси Z_0 и от поворота сечения на угол $d\Theta$:

$$\Delta l = \Delta l_0 + y d\Theta.$$

Если разделить обе части последнего уравнения на dz , то получим относительную деформацию ε на расстоянии y от оси Z_0 :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + y \frac{d\Theta}{dz}, \quad (2)$$

где ε_0 – деформация на оси Z_0 .

С другой стороны,

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где ε_y – упругая деформация; ε_t – деформация от температуры.

Решая совместно уравнения (2) и (3), найдем

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 + y \frac{d\Theta}{dz} - \varepsilon_t.$$

Учитывая, что $\frac{d\Theta}{dz} = \chi$ – кривизна стержня после деформации, а $\varepsilon_t = \alpha_1 T(y)$, будем иметь

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 + \chi \cdot y - \alpha_1 T(y).$$

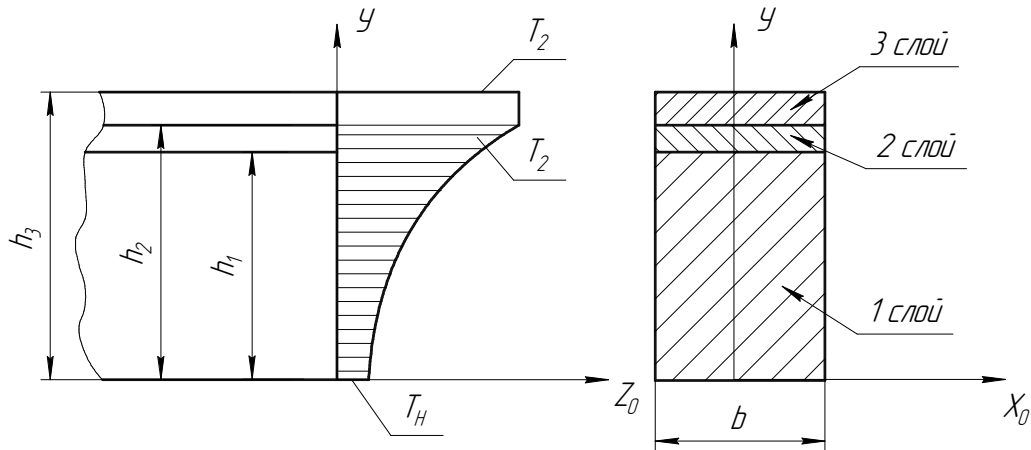


Рис. 3. Деформация односторонне наплавленной заготовки от изменения температуры

Согласно закону Гука напряжения наплавки в заготовке будут

$$\sigma_H = \varepsilon_y E_1 = E_1 (\varepsilon_0 + \chi \cdot y - \alpha_1 T(y)). \quad (4)$$

Запишем условия равновесия:

$$\left. \begin{aligned} \sum Z_0 = 0; \quad \int_A \sigma_H dA = 0; \\ \sum m_{x_0} = 0; \quad \int_A \sigma_H y dA = 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $A = bh_2$ – площадь поперечного сечения заготовки.

Подставив σ_H согласно (3.18) в уравнение (3.19), получим

$$\left. \begin{aligned} E_1 \left(\varepsilon_0 A + \chi \int_A y dA - \alpha_1 \int_A T(y) dA \right) = 0; \\ E_1 \left(\varepsilon_0 A \int_A y dA + \chi \int_A y^2 dA - \alpha_1 \int_A T(y) y dA \right) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В уравнениях (6) $\int_A y dA = b \frac{h_2^2}{2} = S_{x_0}$ – статический момент относительно оси X_0 площади A поперечного сечения заготовки (рисунок 3); $\int_A y^2 dA = b \frac{h_2^3}{3} = J_{x_0}$ – момент инерции относительно оси X_0 поперечного сечения заготовки;

$$\int_A T(y) dA = \int_A \left(T_H + \frac{T_2^*}{h_2^n} y^n \right) dA = T_H A + \frac{T_2^*}{h_2^n} b \int_0^{h_2} y^n dy = T_H A + \frac{T_2^*}{n+1} A = \left(T_H + \frac{T_2^*}{n+1} \right) A;$$

$$\int_A T(y) y dA = \int_A \left(T_H y + \frac{T_2^*}{h_2^n} y^{n+1} \right) dy = T_H S_{x_0} + \frac{2 \cdot T_2^*}{n+2} S_{x_0} = \left(T_H + \frac{2T_2^*}{n+2} \right) S_{x_0}.$$

Подставив в (6) значения интегралов и сократить на E_1 , будем иметь

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_0 A + \chi S_{x_0} - \alpha_1 \left(T_H + \frac{T_2^*}{n+1} \right) A &= 0, \\ \varepsilon_0 S_{x_0} + \chi J_{x_0} - \alpha_1 \left(T_H + \frac{T_2^*}{n+2} \right) S_{x_0} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решая совместно уравнения (7), получим

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{\alpha_1 \cdot S_{x_0}^2 \cdot \left(T_H - \frac{2 \cdot T_2^* \cdot (n-1)}{(n+2) \cdot (n+1)} \right)}{3 \cdot (A \cdot J_{x_0} - S_{x_0}^2)}, \\ \chi &= \frac{n \cdot T_2^* \cdot \alpha_1 \cdot A \cdot S_{x_0}}{A \cdot J_{x_0} - S_{x_0}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

После этого по формуле (4) можно определить напряжения наплавки. При $0 \leq y \leq h_1$ получим напряжения наплавки в первом слое σ_{1H} , при $h_1 \leq y \leq h_2$ получим напряжения наплавки во втором слое σ_{2H} .

Определим напряжения, которые будут возникать при остывании наплавленной заготовки ниже температуры T_2 . Как и в предыдущем случае, модули упругости E_1 , E_3 и коэффициенты линейного расширения α_1 и α_3 первого и третьего слоев будут постоянными по высоте сечения. Во втором слое они будут зависеть от ординаты y . Ввиду малой толщины второго слоя эту зависимость можно принять линейной

$$\left. \begin{aligned} \alpha(y) &= \alpha_1 + (y - h_1) \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{h_2 - h_1}, \\ E(y) &= E_1 + (y - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

При остывании деформация от температуры будет отрицательной. Полная деформация в i -м слое будет складываться из упругой деформации и деформации от температуры ($-\varepsilon_{it}$)

$$\varepsilon = \varepsilon_i - \varepsilon_{it}. \quad (10)$$

Геометрическая сторона задачи запишется уравнением (2). Из уравнений (2) и (10) найдем

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + y \frac{d\Theta}{dZ} + \varepsilon_{it},$$

или

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + \chi + \alpha_i T_i(y). \quad (11)$$

Согласно закону Гука напряжения остывания в слоях будут:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{10} &= E_1 (\varepsilon_0 + \chi + \alpha_1 T_1(y)); \\ \sigma_{20} &= E(y) (\varepsilon_0 + \chi + \alpha(y) T(y)); \\ \sigma_{30} &= E_3 (\varepsilon_0 + \chi + \alpha_3 T_3(y)). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Запишем уравнения равновесия:

$$\sum Z = 0; \int_{A_1} \sigma_1 dA_1 + \int_{A_2} \sigma_2 dA_2 + \int_{A_3} \sigma_3 dA_3 = 0,$$

$$\sum m_{x_0} = 0; \int_{A_1} \sigma_1 y dA_1 + \int_{A_2} \sigma_2 y dA_2 + \int_{A_3} \sigma_3 y dA_3 = 0.$$

Подставив значения напряжений согласно (3.26), будем иметь

$$\left. \begin{aligned} & E_1 \varepsilon_0 A_1 + E_1 \int_{A_1} y dA_1 + E_1 \alpha_1 \int_{A_1} T(y) dA_1 + \varepsilon_0 \int_{A_2} E(y) dA_2 + \\ & + \chi \int_{A_2} y E(y) dA_2 + \int_{A_2} E(y) \alpha(y) T(y) dA_2 + E_3 \varepsilon_0 A_3 + E_3 \chi \int_{A_3} y dA_3 + \\ & + E_3 \alpha_3 T_2 A_3 = 0; \\ & E_1 \varepsilon_0 \int_{A_1} y dA_1 + E_1 \chi \int_{A_1} y^2 dA_1 + E_1 \alpha_1 \int_{A_1} T(y) dA_1 + \varepsilon_0 \int_{A_2} E(y) dA_2 + \\ & + \chi \int_{A_2} y^2 E(y) dA_2 + \int_{A_2} E(y) \alpha(y) T(y) dA_2 + E_3 \varepsilon_0 \int_{A_3} y dA_3 + \\ & + E_3 \chi \int_{A_3} y^2 dA_3 + E_3 \alpha_3 T_2 \int_{A_3} y dA_3 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где $A_1 = bh_1$; $A_2 = b(h_2 - h_1)$; $A_3 = b(h_3 - h_2)$.

Запишем уравнения некоторых интегралов:

$$S_{1x_0} = \int_{A_1} y dA_1 = b \frac{h_1^2}{2} \text{ — статический момент площади } A_1 \text{ относительно оси } X_0;$$

$$S_{3x_0} = \int_{A_3} y dA_3 = \frac{1}{2} b (h_3^2 - h_2^2) \text{ — момент инерции относительно оси } X_0;$$

$$J_{1x_0} = \int_{A_1} y^2 dA_1 = \frac{bh_1^3}{3} \text{ — момент инерции относительно } X_0 \text{ поперечного сечения 1-го}$$

слоя;

$$J_{3x_0} = \int_{A_3} y^2 dA_3 = \frac{1}{3} b (h_3^3 - h_2^3) \text{ — момент инерции относительно оси } X_0 \text{ поперечного сече-$$

ния третьего слоя.

Введем обозначения:

$$U_{1x_0} = \int_{A_1} T(y) dA_1 = A_1 \left(T_H + \frac{T_2^*}{n+1} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^n \right),$$

$$R_{1x_0} = \int_{A_1} y T(y) dA_1 = A_1 h_1 \left(\frac{T_H}{2} + \frac{T_2^*}{n+2} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^n \right),$$

$$D_{2x_0} = \int_{A_2} E(y) dA_2 = \frac{A_2 (E_1 + E_2)}{2},$$

$$\begin{aligned}
C_{2x_0} &= \int_{A_2} yE(y)dA_2 = S_{2x_0} \frac{E_1 h_1 - E_2 h_2}{h_2 - h_1} + J_{2x_0} \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1}, \\
K_{2x_0} &= \int_{A_2} y^2 E(y)dA_2 = J_{2x_0} \frac{E_1 h_2 - E_2 h_1}{h_2 - h_1} + H_{2x_0} \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1}, \\
P_{2x_0} &= \int_{A_2} E(y)\alpha(y)\Gamma(y)dA_2, \quad L_{2x_0} = \int_{A_2} yE(y)\alpha(y)\Gamma(y)dA_2, \\
S_{2x_0} &= \frac{1}{2}b(h_2^2 - h_1^2), \quad J_{2x_0} = \frac{1}{3}b(h_2^3 - h_1^3), \quad H_{2x_0} = \frac{1}{4}(h_2^4 - h_1^4).
\end{aligned}$$

Интегралы P_{2x_0} и L_{2x_0} легко вычисляются при конкретных значениях модулей упругости, коэффициентов линейного расширения и температуры.

Подставим интегралы в уравнения (3.27).

$$\left. \begin{aligned}
&\varepsilon_0 (E_1 A_1 + D_{2x_0} E_3 A_3) + \chi (E_1 S_{1x_0} + C_{2x_0} + E_3 S_{3x_0}) = \\
&= -(E_1 \alpha_1 U_{1x_0} + P_{2x_0} + E_3 \alpha_3 T_2 A_3); \\
&\varepsilon_0 (E_1 S_{1x_0} + C_{2x_0} + E_3 S_{3x_0}) + \chi (E_1 J_{1x_0} + K_{2x_0} + E_3 J_{3x_0}) = \\
&= -(E_1 \alpha_1 R_{1x_0} + L_{2x_0} + E_3 \alpha_3 T_2 S_{3x_0}).
\end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Решив систему уравнений (3.28), найдем ε_0 и χ :

$$\left. \begin{aligned}
\varepsilon_0 &= \frac{P \cdot K - L \cdot C}{C^2 - D \cdot K}; \\
\chi &= \frac{L \cdot D - P \cdot C}{C^2 - D \cdot K}.
\end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где

$$\left. \begin{aligned}
D &= E_1 A_1 + D_{2x_0} + E_3 A_3; \\
C &= E_1 S_{1x_0} + C_{2x_0} + E_3 S_{3x_0}; \\
K &= E_1 J_{1x_0} + K_{2x_0} + E_3 J_{3x_0}; \\
P &= E_1 \alpha_1 U_{1x_0} + P_{2x_0} + E_3 \alpha_3 T_2 A_3; \\
L &= E_1 \alpha_1 R_{1x_0} + L_{2x_0} + E_3 \alpha_3 T_2 S_{3x_0}.
\end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Подставив ε_0 и χ согласно (15) в уравнения (12), определим напряжения остывания в слоях. Полные остаточные напряжения, возникающие при односторонней наплавке заготовок прямоугольного сечения, получим суммированием напряжений наплавки с напряжениями остывания

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= \sigma_{1H} + \sigma_{10}, \\
\sigma_2 &= \sigma_{2H} + \sigma_{20}, \\
\sigma_3 &= \sigma_{30}.
\end{aligned}$$

Разработанная физико-математическая модель расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа позволила с помощью пакета прикладных программ MATHCAD PLUS 13.0, произвести на ПЭВМ численные исследования остаточных напряжений в покрытиях, сформированных ЭМН различных порошков на установке (рисунок 4) с магнитной системой из магнитотвердого материала – ЮНДК24Т (ГОСТ 17809 - 72).

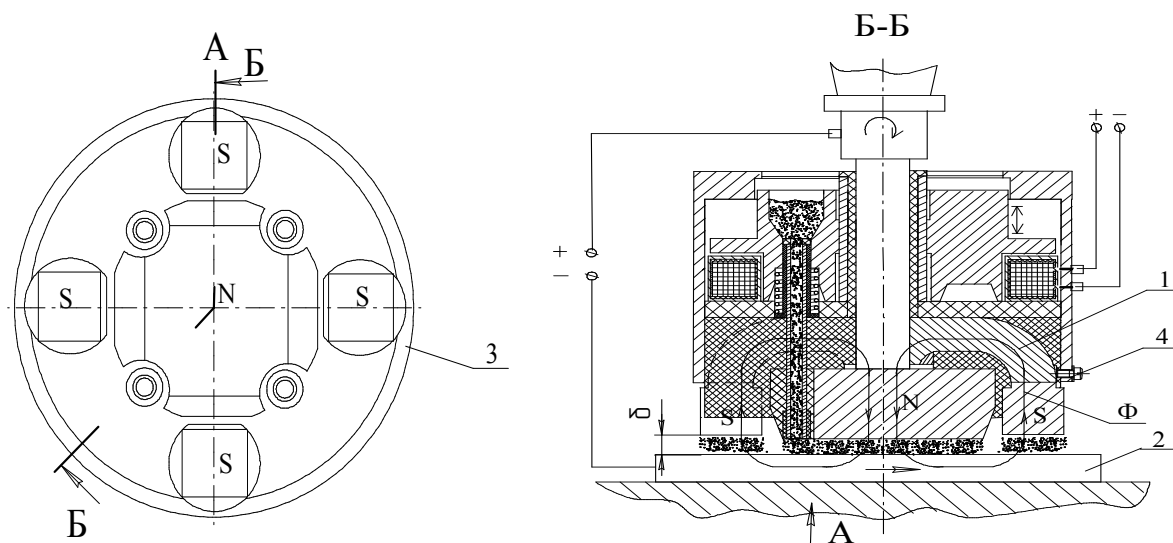


Рис. 4 Схема устройства для ЭМН плоских поверхностей

При определении остаточных напряжений для каждого образца задавались теплофизические и упругие характеристики материалов покрытия и основы, геометрические параметры системы, диапазон температур, который обеспечивался режимом ЭМН. Последний был оптимальным [2] 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 Fe-9%В, ФБХ 6-2, Fe-2%V, Fe-2%Ti, X18ФН2М. Установлено, что в зависимости от условий наплавки величина остаточных напряжений в покрытии изменяется в пределах от 182 до 543 МПа, в основе от – 8 до – 15 МПа. Характер их распределения не изменяется: 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 1,5 ... 1,8 раза. Например, для покрытия Fe-2%V при температуре поверхности основы 159°C тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности покрытия равны 146 МПа, при 200°C – 263 МПа, т.е. напряжения увеличиваются. При тех же условиях тангенциальные сжимающие напряжения на поверхности основы соответственно равны – 11,5; – 14,8 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 примененном температурном диапазоне температур имеют покрытия из порошка X18ФН2М, наибольшие – Fe-9%В. Численные исследования остаточных напряжений показали, что при температуре основы 150°C, которую обеспечивает оптимальная сила разрядного тока, равная 100 А, в покрытиях формируются растягивающие остаточные напряжения, которые для покрытий из рассматриваемых порошков в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:

$$162(\text{Fe-9\%В}) \rightarrow 154(\text{ФБХ 6-2}) \rightarrow 146(\text{Fe-2\%V}) \rightarrow 128(\text{Fe-2\%Ti}) \rightarrow 122(\text{X18ФН2М}).$$

По условию минимальных остаточных напряжений на границе раздела покрытие-основа наиболее благоприятным для эксплуатационных условий будет покрытие из порошка X18ФН2М, которое имеет наименьшие растягивающие остаточные напряжения в покрытии.

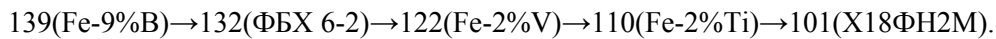
Результаты численных исследований остаточных напряжений в системе покрытие-основа показали, что величина остаточных напряжений в зависимости от химического состава порошка и режима нанесения покрытий может изменяться в широких пределах.

С целью проверки разработанного теоретического метода расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа проведены исследования по их экспериментальному определению,

которые проводились рентгеноструктурным анализом, используя метод определения параметров линейно-напряжённого состояния материала по смещению линий рентгенограммы [8 – 10].

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3 в кобальтовом немонохроматизированном излучении. Съёмка профиля рентгеновской линии выполнялась в автоматическом режиме. Покрытия из порошков на образцы из стали 45 наносили 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:



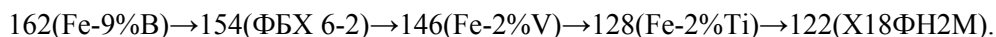
Видно, что остаточные напряжения, определенные в покрытиях, как расчетным путем, так и экспериментально, по значениям близки. При этом определенные экспериментально имеют меньшие значения. Расхождения значений напряжений находятся в пределах 14 – 18 %, что дает основание рекомендовать разработанную математическую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

Заключение. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

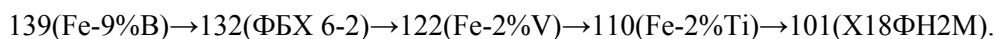
1. Разработана физико-математическая модель определения остаточных напряжений в системе покрытие-основа при ЭМН порошков на плоские поверхности деталей.

2. Численные исследования 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. При этом изменение разрядного тока от 100 до 150 А увеличивает остаточные напряжения в 1,5 – 1,8 раза.

3. Численные исследования остаточных напряжений показали, что при температуре основы 150°С, которую обеспечивает оптимальная сила разрядного тока, равная 100 А, в покрытиях формируются растягивающие остаточные напряжения, которые для покрытий из рассматриваемых порошков в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:



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



ЛИТЕРАТУРА

1. Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
2. Пулька, Ч.В. Наплавка рабочих узлов почвообрабатывающей и уборочной сельскохозяйственной техники (обзор) / Ч.В. Пулька // Автоматическая сварка. – 2003. – № 8. – С. 36–41.
3. Мрочек, Ж.А. Использование постоянных магнитов в устройствах электромагнитной наплавки / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, А.В. Миранович // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 75–84.
4. Теория и практика нанесения защитных покрытий. / Витязь П. А., Ивашко В. С., Ильющенко А. Ф. и др. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
5. Остаточные напряжения. / Мрочек Ж. А. Макаревич С. С., Кожуро Л. М. и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 352 с.
6. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
7. Ящерицын, П. И. Остаточные напряжения при электромагнитной наплавке / С. С. Макаревич, А. П. Ракомсин, Л. М. Кожуро // Весці НАН Беларусі. Сер.физ.-техн.наук. - 2000. - №2. - С.62-65.
8. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 240 с.
9. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный анализ машиностроительных материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1979. – 134 с.
10. Комяк Н. И., Мясников Ю. Т. Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений. – Л.: Машиностроение, 1972. – 88 с.