

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОКРЫТИЕ-ОСНОВА ПОСЛЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Студенты – Матяс Д.С., 30 тс, 5 курс, ФТС;
Алексеев А.С., 32 тс, 4 курс, ФТС

Научный
руководитель – Миранович А.В., к.т.н., доцент
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены физико-математическая модель определения остаточных напряжений в системе покрытие-основа при упрочнении и результаты численных исследований влияния теплонапряженности процесса и химического состава композиционных порошков на величину остаточных напряжений.

Ключевые слова: магнитно-электрическое упрочнение, ферромагнитный порошок, покрытие, остаточные напряжения.

В процессе магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (ФМП) плоских поверхностей рабочих органов сельскохозяйственной техники (например, ножей шнеков раздатчиков-смесителей, дисков сошников сеялок) в системе покрытие-основа имеют место все три вида напряжений (I, II и III рода) [1, 2]. Однако причиной нарушения прочности покрытий, появления микротрещин в них являются напряжения I рода [3]. В связи с этим рассмотрим напряжения I рода σ_H , возникающие в покрытиях после МЭУ.

Так как в процессе МЭУ длительность воздействия электрических разрядов составляет около 10^{-3} с [1], то температурное поле по ширине стержня (оси X) и в направлении оси Z (рисунок 1) можно считать постоянным. Изменение температуры будем рассматривать только по высоте стержня в направлении оси Y .

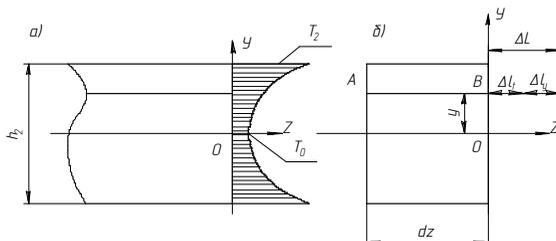


Рисунок 1 – Схема распределения температуры по высоте стержня и его деформации

Согласно [1, 2] распределение температуры по высоте можно представить зависимостью

$$T(y) = T_0 + T_2^* \left(\frac{2|y|}{h_2} \right)^n,$$

где T_0 – температура в центре стержня (при $y = 0$); $T_2^* = T_2 - T_0$, T_2 – температура при $|y| = h_2/2$; n – положительное число.

Напряжения, возникающие при нанесении покрытий при МЭУ, согласно закону Гука, определяются соотношением [1, 2]

$$\sigma_H = \varepsilon_y E_1 = E_1 (\varepsilon - \alpha_1 T(y)), \quad (1)$$

где $\varepsilon = \alpha_1 T(y) + \varepsilon_y$ – полная деформация стержня, состоящая из температурной $\alpha_1 T(y)$ и упругой ε_y деформаций; α_1 – коэффициент линейного расширения материала стержня; E_1 – модуль упругости материала стержня.

Тогда для стержня прямоугольного поперечного сечения напряжения σ_H определяются:

$$\sigma_H = E_1 \alpha_1 \left(\frac{T_2^*}{n+1} - T_2^* \left(\frac{2|y|}{h_2} \right)^n \right). \quad (2)$$

Кроме напряжений σ_H в стержне возникают остаточные напряжения, связанные с остыванием стержня. При температуре T_2 остывание влечет за собой появление напряжений, вызванных линейным расширением материалов стержня 1, упрочненных слоев 3 и переходных слоев 2 (рисунок 2). Если коэффициент линейного расширения и модуль упругости в слоях 1 и 3 будут постоянными и равными соответственно α_1, E_1 и α_3, E_3 , то в слое 2 эти характеристики будут изменяться вдоль оси Y . Ввиду малой толщины второго слоя эти характеристики изменяются линейно, т. е.

$$\left. \begin{aligned} \alpha(y) &= \alpha_1 + (2|y| - h_1) \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{h_2 - h_1}, \\ E(y) &= E_1 + (2|y| - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

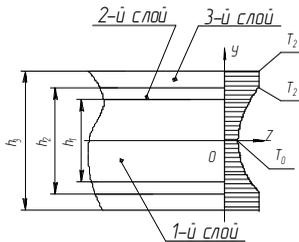


Рисунок 2 – Схема распределения температуры по сечению стержня

При остывании длина элементарного участка dz стержня (рисунок 1) уменьшается. Ввиду симметричности полная деформация ε в любом слое стержня будет одинаковой по высоте сечения. Тогда напряжения, возникающие при остывании, будут равны:

$$\sigma_{1(0)} = \varepsilon_1 E_1; \quad \sigma_{2(0)} = \varepsilon_2 E(y); \quad \sigma_{3(0)} = \varepsilon_3 E_3.$$

После подстановки значений $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ в полученные соотношения найдем:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1(0)} &= E_1(\varepsilon + \alpha_1 T(y)), \\ \sigma_{2(0)} &= E(y)(\varepsilon + \alpha(y)T(y)), \\ \sigma_{3(0)} &= E_3(\varepsilon + \alpha_3 T_2). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Из условия равновесия $\sum Z=0$ для элементарного участка стержня

$$\int_{A_1} \sigma_{1(0)} dA + \int_{A_2} \sigma_{2(0)} dA + \int_{A_3} \sigma_{3(0)} dA = 0, \quad (5)$$

где $A_1=bh_1, A_2=b(h_2 - h_1), A_3=b(h_3 - h_2)$ – площади поперечного сечения слоев 1, 2, 3.

Подставив (4) в (5), получим

$$\varepsilon = - \frac{E_1 \alpha_1 \int_{A_1} T(y) dA_1 + \int_{A_2} E(y) \alpha(y) T(y) dA_2 + E_3 \alpha_3 T_2 A_3}{E_1 A_1 + \int_{A_2} E(y) dA_2 + E_3 A_3}. \quad (6)$$

Интегралы, входящие в (6), вычисляются при конкретных значениях коэффициентов линейного расширения и температуры. Напряжения МЭУ в слоях 1 и 2 будут определяться по формуле (2), а в слое 3 они будут равны нулю.

Таким образом, остаточные напряжения складываются из напряжений МЭУ и напряжений остывания

$$\sigma_1 = \sigma_H + \sigma_{1(0)}; \quad \sigma_2 = \sigma_H + \sigma_{2(0)}; \quad \sigma_3 = \sigma_{3(0)}.$$

Учитывая, что функции $\alpha(y), E(y)$ и $T(y)$ записаны через абсолютное значение $|y|$, при вычислении интегралов (6):

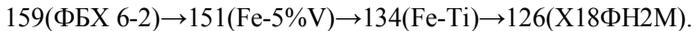
$$\int_{A_1} T(y) dA_1 = 2b \int_0^{h_1/2} \left(T_0 + T_2^* \left(\frac{2 \cdot y}{h_2} \right)^n \right) dy; \quad (7)$$

$$\int_{A_2} E(y) dA_2 = 2b \int_{h_1/2}^{h_2/2} \left(E_1 + (2y - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1} \right) dy; \quad (8)$$

$$\int_{A_2} E(y)\alpha(y)\Gamma(y)dA_2 = 2b \int_{h_1/2}^{h_2/2} \left(E_1 + (2y - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1} \right) \cdot \left(\alpha_1 + 2(2y - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1} \right) \cdot \left(T_0 + T_2^* \left(\frac{2y}{h_2} \right)^n \right) dy. \quad (9)$$

Разработанная физико-математическая модель расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа позволила с помощью пакета прикладных программ MATLAB 7.0 MATHEMATICA 11.0, произвести численные исследования остаточных напряжений в покрытиях после МЭУ.

Для каждого исследуемого образца задавались теплофизические и упругие характеристики материалов покрытия и основы, диапазон температур, который обеспечивался режимом МЭУ. Покрытия наносились на поверхность стержня из стали 45 (ГОСТ 1050 – 88) композиционными порошками ФБХ 6-2, Fe-5%V, X18ФН2М, Fe-Ti на установке мод. УНП-1. Установлено, что в зависимости от условий МЭУ величина остаточных напряжений в покрытии изменяется в пределах от 189 до 563 МПа, в основе от – 11 до – 21 МПа. Характер их распределения не изменяется: в покрытии формируются растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения, в основе – сжимающие тангенциальные и радиальные. Численные исследования остаточных напряжений показали, что при температуре основы 150 °С, которую обеспечивает оптимальная сила разрядного тока, равная 110А, в покрытиях формируются растягивающие остаточные напряжения, которые для покрытий из рассматриваемых порошков в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:



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.

Список использованных источников

1. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.
2. Кожуро, Л.М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л.М. Кожуро, Б.П. Чемисов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 232 с.
3. Остаточные напряжения / Ж.А. Мрочек [и др.]. – Минск : УП «Технопринт», 2003. – 352 с.
4. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 1998. – 583 с.