

**Расчет остаточных напряжений в системе покрытие-основа при
электромагнитной наплавке**

**Акулович Л. М., профессор, д.т.н., Миранович А. В., инженер,
Тризна В.В., инженер**

*(Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный
технический университет»)*

В статье представлены физико-математическая модель определения остаточных напряжений в системе покрытие-основа при электромагнитной наплавке и результаты численных исследований влияния теплонапряженности процесса и химического состава композиционных порошков на величину остаточных напряжений.

При восстановлении изношенных деталей различными видами наплавки 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 поверхности в сочетании с различными видами упрочнения [1].

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 [2 ... 4]. В свою очередь, следует отметить сложность задачи математического описания процесса формирования остаточных напряжений из-за его дискретного характера, наличия пор, различия физико-механических свойств материалов

покрытия и основы, наличия переходной зоны и др. [5].

При электромагнитной наплавке (ЭМН) композиционных порошков на плоские поверхности рабочих органов землеобрабатывающих машин 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. Поэтому в имеющихся экспериментальных и теоретических работах изучаются в первую очередь напряжения наплавки (σ_H).

Ввиду того, что процесс наплавки протекает непродолжительное время, считаем, что температурное поле является постоянным в направлении продольной оси стержня Z (рис. 1). Температура изменяется по высоте стержня, в направлении оси Y, и остается постоянной по его ширине, в направлении оси X.

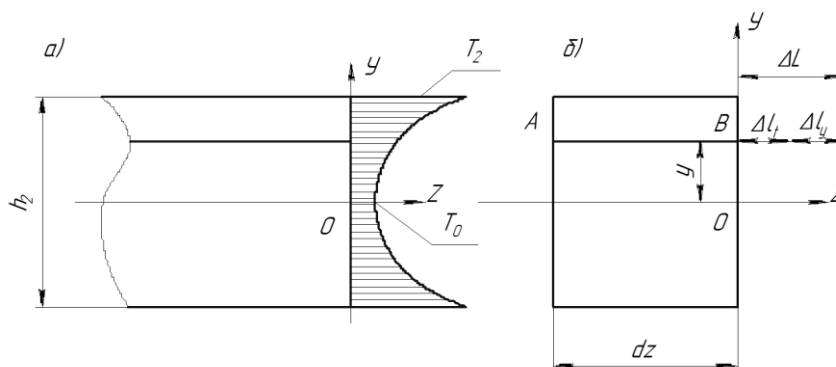


Рис. 1. Схема распределения температуры по высоте стержня и деформация этого стержня от температуры

В процессе наплавки при некоторой температуре T на стержень попадают капли расплава, которые при соприкосновении с поверхностью этого стержня быстро остывают, и к моменту соединения покрытия с основой и при частичной диффузии в основу, температура поверхности стержня будет $T_2 = 150 \dots 250^\circ\text{C}$. Следовательно, на внешней поверхности стержня и в покрытии можно принять расчетную температуру нагрева, равную T_2 (рис. 1, а). К центру заготовки температура интенсивно снижается, так как продолжительность наплавки небольшая.

Если записать уравнение теплопроводности для прямоугольного стержня, то, решив его, можно найти распределение температуры по высоте. Проведенные ранее опыты показали, что с достаточной точностью

распределение температуры по высоте можно представить зависимостью

$$T(y) = T_0 + T_2^* \left(\frac{2|y|}{h_2} \right)^n, \quad (1)$$

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.

Для определения напряжений наплавки выделим в стержне элементарный участок длиной dz (рис. 1, б). Произвольно взятый отрезок $AB = dz$ от действия температуры получит удлинение Δl , которое будет складываться из удлинения от нагрева Δl_t и упругого удлинения Δl_y :

$$\Delta l = \Delta l_t + \Delta l_y. \quad (2)$$

Удлинение от температуры определяется известным из [6, 7] соотношением $\Delta l_t = \alpha_1 T(y) dz$, в котором α_1 – коэффициент линейного расширения материала стержня.

Разделив обе части уравнения (2) на dz , получим соотношение для полной деформации ε как сумму температурной и упругой ε_y деформаций $\varepsilon = \alpha_1 T(y) + \varepsilon_y$. Полная деформация ε будет постоянной по высоте, так как температура по сечению стержня распределена симметрично. Из этого соотношения следует, что $\varepsilon_y = \varepsilon - \alpha_1 T(y)$. Следовательно, согласно закону Гука, напряжение наплавки будет определяться соотношением

$$\sigma_H = \varepsilon_y E_1 = E_1 (\varepsilon - \alpha_1 T(y)), \quad (3)$$

где E_1 – модуль упругости материала стержня.

Исходя из того, что нормальная сила N в поперечном сечении стержня площадью $A = b \cdot h_2$ отсутствует, можно записать $N = \int_A \sigma_H dA = 0$. Учитывая (3),

это уравнение можно представить в виде $E_1 \int_A (\varepsilon - \alpha_1 T(y)) dA = 0$ или, в виде

$$\varepsilon A - \alpha_1 T_0 A - 2^n \alpha_1 h_2^{-n} T_2^* \int_A |y|^n dA = 0. \quad (4)$$

Для стержня прямоугольного поперечного сечения $dA = b dy$. Поэтому

$$\int_A |y|^n dA = 2b \int_0^{h_2/2} |y|^n dy = \frac{2b |y|^{n+1}}{n+1} \Big|_0^{h_2/2} = \frac{2b}{n+1} \cdot \frac{h_2^{n+1}}{2^{n+1}} = \frac{b}{n+1} \cdot \frac{h_2^{n+1}}{2^n}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), найдем

$$\varepsilon = \alpha_1 \left(T_0 + \frac{T_2^*}{n+1} \right). \quad (6)$$

И теперь в соответствии с (3) можно определить напряжения наплавки:

$$\sigma_H = E_1 \alpha_1 \left(\frac{T_2^*}{n+1} - T_2^* \left(\frac{2|y|}{h_2} \right)^n \right). \quad (7)$$

Кроме напряжений наплавки σ_H в стержне возникают остаточные напряжения, связанные с остыванием стержня и наплавленных слоев ниже температуры T_2 . При температуре T_2 между наплавленными слоями и материалом стержня появляется устойчивая адгезионная связь, и дальнейшее остывание влечет за собой появление напряжений, связанных с различными коэффициентами линейного расширения материалов стержня 1, наплавленных слоев 3 и переходных слоев 2, образовавшихся в результате диффузии наплавленного материала в материал стержня (рис. 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 меняться вдоль оси Y . Ввиду малой толщины второго слоя эти характеристики можно считать изменяющимися линейно, т. е.

$$\left. \begin{aligned} \alpha(y) &= \alpha_1 + (2|y| - h_1) \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{h_2 - h_1}, \\ E(y) &= E_1 + (2|y| - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Учитывая небольшую толщину наплавленного слоя 3, температуру в этом слое можно считать постоянной и равной T_2 (рис. 2).

При остывании длина элементарного участка dz стержня уменьшается. Ввиду симметричного расположения слоев и симметричного распределения температуры полная деформация ε в любом слое стержня будет одинаковой по высоте сечения. Тогда в соответствии с законом Гука, напряжения, возникающие при остывании в слоях стержня, 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:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1(0)} &= E_1(\varepsilon + \alpha_1 T(y)), \\ \sigma_{2(0)} &= E(y)(\varepsilon + \alpha(y)T(y)), \\ \sigma_{3(0)} &= E_3(\varepsilon + \alpha_3 T_2). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

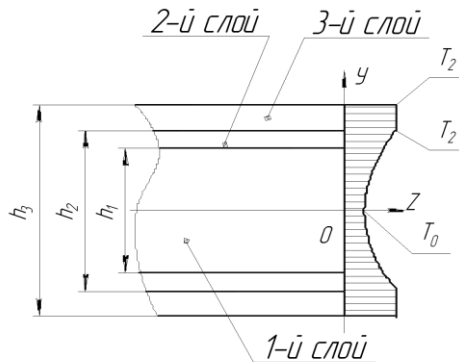


Рис.2. Схема распределения температуры в стержне и наплавленном слое

Теперь рассмотрим уравнение равновесия $\sum Z = 0$ для элементарного участка стержня

$$\int_{A_1} \sigma_{1(0)} dA + \int_{A_2} \sigma_{2(0)} dA + \int_{A_3} \sigma_{3(0)} dA = 0, \quad (10)$$

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 (9) в (10), получим

$$\varepsilon = - \frac{E_1 \alpha_1 \int_{A_1} T(y) dA_1 + \int_{A_2} E(y) \alpha(y) T(y) dA_2 + E_3 \alpha_3 T_2 A_3}{E_1 A_1 + \int_{A_2} E(y) dA_2 + E_3 A_3}. \quad (11)$$

Подставив (11) в соотношения (9), определим напряжения, возникающие в слоях наплавленного стержня при остывании. Интегралы, входящие в (11), легко вычисляются при конкретных значениях коэффициентов линейного расширения и температуры. Напряжения наплавки в слоях 1 и 2 будут определяться по формуле (7), а в слое 3 они будут равны нулю.

Таким образом, остаточные напряжения, возникающие при двухсторонней наплавке стержня с прямоугольным поперечным сечением, будут складываться из напряжений наплавки и напряжений остывания

$$\sigma_1 = \sigma_H + \sigma_{1(0)}; \quad \sigma_2 = \sigma_H + \sigma_{2(0)}; \quad \sigma_3 = \sigma_{3(0)}. \quad (12)$$

При вычислении интегралов, входящих в уравнение (11), следует иметь в виду, что функции $\alpha(y)$, $E(y)$ и $T(y)$ записаны через абсолютное значение $|y|$.

Следовательно,

$$\int_{A_1} T(y) dA_1 = 2b \int_0^{h_1/2} \left(T_0 + T_2^* \left(\frac{2 \cdot y}{h_2} \right)^n \right) dy; \quad (13)$$

$$\int_{A_2} E(y) dA_2 = 2b \int_{h_1/2}^{h_2/2} \left(E_1 + (2y - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1} \right) dy; \quad (14)$$

$$\int_{A_2} E(y) \alpha(y) T(y) dA_2 = 2b \int_{h_1/2}^{h_2/2} \left(E_1 + (2y - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1} \right) \cdot \left(\alpha_1 + 2(2y - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1} \right) \cdot \left(T_0 + T_2^* \left(\frac{2y}{h_2} \right)^n \right) dy. \quad (15)$$

Разработанная физико-математическая модель расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа позволила с помощью пакета прикладных программ MATHCAD PLUS 2002 и MATHEMATICA 2.2, работающих в среде WINDOWS, произвести численные исследования остаточных напряжений в покрытиях, сформированных ЭМН различных композиционных порошков на установке с магнитной системой из магнитотвердого материала – ЮНДК24Т (ГОСТ 17809 – 72).

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 наплавлились на поверхность стержня из стали 45 (ГОСТ 1050 – 88) композиционными порошками Fe-9%В, ФБХ 6-2, Fe-5%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-5%V при температуре поверхности основы 159 °С тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности покрытия равны 146 МПа, при 200 °С – 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 °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:

162(Fe-9%В)→154(ФБХ 6-2)→146(Fe-5%V)→128(Fe-2%Ti)→122(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 композиционного 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, 9].

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3 в кобальтовом немонахроматизированном излучении. Съёмка профиля рентгеновской линии выполнялась в автоматическом режиме. Покрытия из порошков на образцы в виде прямоугольных стержней 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:

139(Fe-9%V)→132(ФБХ 6-2)→122(Fe-5%V)→110(Fe-2%Ti)→101(X18ФН2М).

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 физико-математическую модель для расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа при наплавке.

Список литературы:

1. Кряжков, В. М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники. – Москва: Агропромиздат, 1989. – 335 с.
2. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
3. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
4. Остаточные напряжения / Ж. А. Мрочек [и др.]. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 352 с.
5. Барвинок, В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – Москва: Машиностроение, 1990. – 384 с.

6. Ящерицын, П. И. Остаточные напряжения при электромагнитной наплавке / П. И. Ящерицын [и др.]. // Весці НАН Беларусі. Сер.физ.-техн.наук. - 2000. - №2. - С.62-65.

7. Биргер, И. А. Остаточные напряжения. – Москва: Машгиз, 1963. – 240 с.

8. Миркин, Л. И. Рентгеноструктурный анализ машиностроительных материалов: Справочник. – Москва: Машиностроение, 1979. – 134 с.

9. Комяк, Н. И. Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений / Н. И. Комяк, Ю. Т. Мясников. – Ленинград: Машиностроение, 1972. – 88 с.

Аннотация

Расчет остаточных напряжений в системе покрытие-основа при электромагнитной наплавке

Акулович Л. М., Миранович А. В., Тризна В.В.

В статье представлены физико-математическая модель определения остаточных напряжений в системе покрытие-основа при электромагнитной наплавке и результаты численных исследований влияния теплонапряженности процесса и химического состава композиционных порошков на величину остаточных напряжений.

Abstract

Definition of optimum conditions of an electromagnetic welding of antiwear coatings on a details of electric motors water pumps

L.M. Akulovich, A.V. Miranovich, V.V. Trizna

In article physical and mathematical model of definition of residual pressure in system a covering-basis at electromagnetic welding and results of numerical researches of influence of thermal stress of process and a chemical compound of composite powders on size of residual pressure are presented.