

Поскольку дифференциал от вектора-столбца $(v_1, v_2, \sigma_1, \sigma_2, \tau, \Lambda)$ пропорционален левому собственному вектору $(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6)$ [1], можно записать следующие равенства:

$$\frac{dv_1}{y_1} = \frac{dv_2}{y_2} = \frac{d\sigma_1}{y_3} = \frac{d\sigma_2}{y_4} = \frac{d\tau}{y_5} = \frac{d\Lambda}{y_6}.$$

Отсюда в частном случае получим:

$$\frac{d\sigma_1 - d\sigma_2}{y_3 - y_4} = \frac{d\tau}{y_5}, \quad \frac{d\sigma_1}{d\tau} = \frac{y_3}{y_5}. \quad (7)$$

Интегрируя уравнения (7) для каждого из выражений (5) скоростей распространения пластических волн v_i , будем иметь выражения, позволяющие выполнить построение двух-параметрического семейства пространственных кривых в трехмерном пространстве напряжений $(\sigma_1, \sigma_2, \tau)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новацкий, В.К. Волновые задачи теории пластичности. М.: Мир, 1978. 308 с. 2. Курант Р. Уравнения с частными производными. М.: Мир, 1964. 806 с.

УДК 621.923.7

Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Миранович А.В., Немизанский Ю.В.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОКРЫТИЕ – ОСНОВА

*УО “Белорусский национальный технический университет”
УО “Белорусский государственный аграрный технический университет”
Минск, Беларусь*

При восстановлении изношенных поверхностей деталей наплавкой в системе покрытие-основа возникают остаточные напряжения. Это происходит из-за протекания металлургических процессов образования покрытий, использования легирующих элементов, значительного теплового воздействия на основу, быстрого и неравномерного охлаждения наплавленной поверхности детали, а также последующей механической обработки [1].

Остаточные напряжения в системе покрытие-основа существенно влияют на усталостную прочность деталей при циклических нагрузках последних, оказывают определенное влияние на износостойкость рабочих поверхностей и их коррозионную активность.

Установлено [2 ... 4], что остаточные напряжения сжатия могут быть полезны, и их обоснованно считают резервом повышения прочности деталей, а напряжения растяжения ослабляют и вызывают возникновение трещин, приводят к разрушениям.

Остаточные напряжения при формировании покрытий – 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, если это необходимо.

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 покрытие-основа и т.д. Решение этой задачи вряд ли возможно в ближайшем будущем [5]. Именно это обстоятельство и определяет актуальность разработки инженерных методов

расчета напряжений, основанных на упрощениях реальной картины образования напряжений.

При электромагнитной наплавке (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. Поэтому 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 с использованием результатов эксперимента.

Рассмотрим образование температурных напряжений в системе покрытие-основа, которую можно представить в виде двухслойной пластины, состоящей из разнородных материалов с толщиной слоев δ_1 и δ_2 . Будем считать, что пластины линейно-упругие, однородные и изотропные, каждая пластина нагрета равномерно в плоскости и неравномерно по толщине в направлении оси Z (рис. 1).

Принимаем, что напряжения в процессе образования покрытия отсутствуют. Это означает, что к окончанию процесса наплавки покрытий образовавшиеся остаточные напряжения являются результатом охлаждения пластин.

Анализ напряжений и деформаций в системе покрытие-основа при линейно-упругом деформировании может быть рассмотрен в рамках теорий термоупругости многослойных пластин. Можно предположить, что удлинение вследствие температурных изменений является чистым изменением объема и одинаково в направлении трех координат. Эти изменения длины вызывают дополнительные напряжения, если в материале имеется постоянное распределение температуры и нет препятствий свободному расширению материала.

Возникающие при этом тепловые деформации могут быть представлены зависимостью

$$\varepsilon_T = \alpha(T - T_0),$$

где α – коэффициент линейного расширения материала; $(T - T_0)$ – изменение температуры в материале; T_0 – соответствует начальной температуре и первоначальной длине образца из соответствующего материала.

В случае двухосного напряженного состояния, которое будет иметь место для рассматриваемой тонкой пластины, состоящей из изотропных материалов, взаимосвязь между деформациями и напряжениями может быть представлена с использованием закона Гука, модуля упругости E и коэффициента поперечной деформации μ . При условии $\tau_{ZX} = 0; \tau_{ZY} = 0; \sigma_Z = 0$ будем иметь

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_X &= \frac{1}{E}(\sigma_X - \mu\sigma_Y) + \alpha(T - T_0); \\ \varepsilon_Y &= \frac{1}{E}(\sigma_Y - \mu\sigma_X) + \alpha(T - T_0); \\ \varepsilon_Z &= \frac{\mu}{E}(\sigma_X + \sigma_Y) + \alpha(T - T_0); \\ \gamma_{XY} &= \frac{2(1 + \mu)}{E}\tau_{XY}; \\ \gamma_{ZY} &= \gamma_{ZX} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Если граничные условия в направлении осей X и Y одинаковы, то $\sigma_X = \sigma_Y$ и систем (1) можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_X = \varepsilon_Y &= \frac{1-\mu}{E} \sigma_X + \alpha(T - T_0); \\ \varepsilon_Z &= \frac{2\mu}{E} \sigma_X + \alpha(T - T_0). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

С другой стороны, деформации, возникающие в системе, можно определить на основе оценки кривизны базовой поверхности, в качестве которой примем плоскость, отстоящую от плоскости XOY на расстоянии $\delta/2$.

Считая справедливой гипотезу плоских сечений, деформацию ε_X можно записать, используя формулу Коши:

$$\varepsilon_X = \varepsilon_X^0 - \chi^0 \left(z - \frac{\delta}{2}\right), \quad (3)$$

где ε_X^0 – деформация базовой поверхности; χ^0 – кривизна базовой поверхности в направлении оси X.

Деформация i-го слоя в направлении оси X, согласно (2), будет равна

$$\varepsilon_X^{(i)} = \frac{1-\mu_i}{E_i} \sigma_X + \alpha_i t(z), \quad (4)$$

где $t(z)$ – изменение температуры в направлении оси Z.

Исходя из условия равновесия системы, можно записать

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{\delta_1} \sigma_X^{(1)} dz + \int_{\delta_1}^{\delta} \sigma_X^{(2)} dz &= 0; \\ \int_0^{\delta_1} \sigma_X^{(1)} \left(z - \frac{\delta}{2}\right) dz + \int_{\delta_1}^{\delta} \sigma_X^{(2)} \left(z - \frac{\delta}{2}\right) dz &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Из уравнений (3) и (4) для i-го слоя найдем

$$\sigma_X^{(i)} = \frac{E_i}{1-\mu_i} \left[\varepsilon_X^0 - \chi^0 \left(z - \frac{\delta}{2}\right) - \alpha_i t(z) \right]. \quad (6)$$

Подставляя (6) в систему уравнений равновесия (5), после преобразований получим

$$\left. \begin{aligned} A_1 \varepsilon_X^0 - B_1 \chi^0 - C_1 &= 0; \\ A_2 \varepsilon_X^0 - B_2 \chi^0 - C_2 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_0^{\delta_1} \frac{E_1}{1-\mu_1} dz + \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{E_2}{1-\mu_2} dz; & A_2 &= \int_0^{\delta_1} \frac{E_1}{1-\mu_1} \left(z - \frac{\delta}{2}\right) dz + \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{E_2}{1-\mu_2} \left(z - \frac{\delta}{2}\right) dz; \\ B_1 &= \int_0^{\delta_1} \frac{E_1}{1-\mu_1} \left(z - \frac{\delta}{2}\right) dz + \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{E_2}{1-\mu_2} \left(z - \frac{\delta}{2}\right) dz; & B_2 &= \int_0^{\delta_1} \frac{E_1}{1-\mu_1} \left(z - \frac{\delta}{2}\right)^2 dz + \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{E_2}{1-\mu_2} \left(z - \frac{\delta}{2}\right)^2 dz; \\ C_1 &= \int_0^{\delta_1} \frac{E_1 \alpha_1 t(z)}{1-\mu_1} dz + \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{E_2 \alpha_2 t(z)}{1-\mu_2} dz; & C_2 &= \int_0^{\delta_1} \frac{E_1 \alpha_1 t(z)}{1-\mu_1} \left(z - \frac{\delta}{2}\right) dz + \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{E_2 \alpha_2 t(z)}{1-\mu_2} \left(z - \frac{\delta}{2}\right) dz. \end{aligned}$$

Из системы уравнений (7) можно определить величину деформации и кривизну образца базовой поверхности

$$\varepsilon_X^0 = \frac{C_1 B_2 - C_2 B_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1};$$

$$\chi^0 = \frac{A_2 C_1 - A_1 C_2}{A_1 B_2 - A_2 B_1}.$$

Когда известны ε_X^0 и χ^0 , напряжения в покрытии и основе могут быть определены по зависимости (6).

Следовательно, можно сделать вывод, что механизм и величину формируемых остаточных напряжений в системе покрытие-основа при ЭМН износостойких покрытий, в первом приближении, можно оценить, используя основные положения теорий термоупругости, многослойных пластин и механики сплошной среды [6, 7].

Разработанный алгоритм математической модели расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа позволил с помощью пакета прикладных программ MATHCAD PLUS 6.0 и MATHEMATICA 2.2, работающих в среде WINDOWS, провести на ПЭВМ численные определения остаточных напряжений в покрытиях, сформированных ЭМН порошков на установке с магнитной системой из магнитотвердого материала – ЮНДК24Т (ГОСТ 17809 – 72).

При определении остаточных напряжений для каждого образца использовались величины теплофизических и упругих характеристик материалов покрытия и основы, геометрические параметры системы, диапазон температур, который обеспечивался режимом ЭМН. Последний был оптимальным за исключением силы разрядного тока, т.к. изменением его регулировали температуру в системе покрытие-основа. Покрытия наплавливались на поверхность цилиндрических образцов диаметром 40 мм из стали 45 (ГОСТ 1050 – 88), подвергнутой нормализации. Установлено, что в зависимости от условий наплавки величина остаточных напряжений в покрытии изменялась от 122 до 162 МПа, в основе от – 8 до – 15 МПа. Характер их распределения не менялся: 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. При тех же условиях тангенциальные сжимающие напряжения на поверхности основы соответственно равны 11,5 и 14,8 МПа. Следовательно, с возрастанием температуры увлечение тангенциальных напряжений в основе аналогично увеличению их в покрытии. Такая закономерность характерна и для других исследуемых материалов порошков. Так, например, наименьшие остаточные напряжения в используемом температурном диапазоне имеют покрытия из порошка X18ФН2М, наибольшие – Fe-9%В. Численные измерения остаточных напряжений показали, что при температуре основы 150°C, которую обеспечивает оптимальная сила разрядного тока в 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 благоприятными для эксплуатационных условий будут покрытия из порошка X18ФН2М, которые имеют 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кряжков, В. М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники. – М.: Агропромиздат, 1989. – 335 с.
2. Кожуро, Л. М., Чемисов, Б. П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 232 с.
3. Витязь, П. А., Ивашко, В. С., Ильющенко, А. Ф. и др. Теория и практика нанесения защитных покрытий. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
4. Мрочек, Ж. А., Макаревич, С. С., Кожуро, Л. М. и др. Остаточные напряжения. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 352 с.
5. Барвинок, В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
6. Безухов, Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.
7. Писаренко, Г. С., Лебедев, А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – К.: Наукова думка, 1976. – 416 с.

УДК 621.793

Серебряков В.И., Ткачик Р.Ю.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КЛЕЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛЯХ МАШИН

*Зеленогурский университет
Зелена Гура, Польша*

Клеевые соединения на основе эпоксидных смол с отвердителем и наполнителем (в виде твердой добавки) находят все большее применение в качестве материалов для восстановления, утраченных в процессе эксплуатации, свойств и характеристик поверхностного слоя деталей машин. Особенно такой процесс нанесения покрытий представляется перспективным, являясь малоизученным, для деталей машин, поверхности которых работают в условиях трения скольжения в различных условиях смазки.

Восстанавливая, утраченные в процессе эксплуатации, свойства и характеристики поверхностного слоя деталей машин, можно увеличить их физическую долговечность и, тем самым, повысить качество самого изделия машиностроения.

Следует учитывать также, что процесс нанесения клеевого покрытия требует определенного внимания с точки зрения вредного воздействия на окружающую среду.

Основными эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к покрытым поверхностям, являются: высокая сцепляемость покрытия с основным металлом, а также износостойкость. Эксплуатационные свойства поверхностного слоя детали достигаются при использовании определенного комплексного технологического процесса, состоящего из процесса подготовки поверхности под покрытие, нанесения покрытия и соответствующей механической обработки.

В данной статье излагается комплексная технология и приведены результаты исследований состояния поверхностного слоя образцов, изготовленных из закаленной стали 35ХГС после нанесения покрытия и соответствующей механической обработки, а также результаты исследований антифрикционных свойств клеевого покрытия.

При оптимизации технологического процесса учитывались, прежде всего, рекомендации производителя клеевого соединения.

Для покрытий поверхности образцов использовались и исследовались такие двухкомпонентные клеи на базе эпоксидных смол добавками, как Metal-Glu grafit, Devcon titanium T, Devcon WR, Chester Metal Super, Chester Metal Slide.