

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ПРИВАРКОЙ ЛЕНТЫ ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ

В статье описана методика определения остаточных напряжений в деталях, возникших в результате восстановления электроконтактной приваркой ленты (ЭКПЛ) из коррозионно-стойких сталей. Испытанию подвергались покрытия, полученные ЭКПЛ из коррозионно-стойких сталей различного класса. На основе экспериментов установлено, что детали, восстановленные ЭКПЛ из коррозионно-стойких сталей, имеют остаточные напряжения растяжения довольно высокого уровня, что может привести к снижению усталостной прочности восстанавливаемых деталей.

Восстановление изношенных деталей машин и оборудования перерабатывающих отраслей АПК является одним из путей снижения себестоимости их ремонта. Многие детали, особенно контактирующие с технологической средой, машин и оборудования перерабатывающих отраслей АПК выполнены из дорогих коррозионно-стойких сталей. Анализ быстроизнашивающихся деталей показал, что они выбраковываются при износе рабочих поверхностей 0,1...0,3 мм.

Возможность, экономическая целесообразность восстановления таких деталей электроконтактной приваркой ленты (ЭКПЛ) из коррозионно-стойких сталей были доказаны еще в 1990–95 гг. /1/. Технология восстановления изношенных деталей машин и оборудования молочной промышленности, в частности, внедрена в двух ремонтно-технических предприятиях Республики Башкортостан. В основном вышеуказанная технология применяется для восстановления деталей типа «вал», не испытывающих в процессе эксплуатации циклические нагрузки. Для деталей, работающих при динамических нагрузках, данная технология не всегда пригодна, так как велика вероятность при электроконтактной приварке возникновения в теле детали внутренних напряжений, снижающих усталостную прочность детали. Для определения величин остаточных напряжений в деталях, восстановленных ЭКПЛ из коррозионно-стойких сталей, использовалась методика, разработанная на кафедре сопротивления материалов и деталей машин Кишневского сельскохозяйственного института /2, 3/.

Исследования проводились на образцах (кольца) с характеристиками, приведенными на рис. 1 и в табл. №1.

Как видно из табл. 1, исследовались образцы и лента из коррозионно-стойких сталей различного класса, а также из стали 45, что позволило оценить влияние химического состава и свойств различных сталей на остаточные напряжения в приваренном слое ленты.

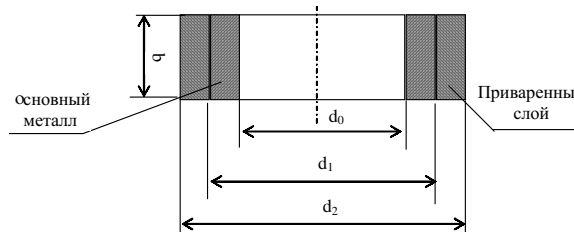
В каждой серии испытывалось по три образца. Определение остаточных напряжений проводилось с учетом действительных значений и характеристик упругости (E – модуль упругости I рода, σ – модуль упругости II рода, ν – коэффициент Пуассона).

Для определения модуля упругости I рода в кольцевом образце с покрытием было необходимо:

1. Опытным путем определить собственную частоту изгибных колебаний составно-

Таблица 1. Характеристики образцов (колец) с покрытиями, нанесенными ЭКПЛ

№ образцов	Марка стали	
	основного металла	приваренного слоя
1	Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 12Х18Н10Т
2	Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 20Х13
3	Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 15Х28
4	Сталь 45	Сталь 12Х18Н10Т
5	Сталь 45	Сталь 20Х13
6	Сталь 45	Сталь 15Х28
7	Сталь 45	Сталь 45



$d_0 = 48$ мм, $d_1 = 49,4$ мм, $d_2 = 50,0$ мм, $b = 11$ мм.
Рисунок 1. Образцы для исследования упругих свойств и остаточных напряжений покрытий

го сечения, для чего использовалась специальная установка (рис. 2).

2. Рассчитать динамическую жесткость образца с покрытием

$$B_2 = 0,873 \int_u \cdot MR^3 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где M – масса кольца, г;

R – средний радиус кольца, мм, определяемый из выражения

$$R = \frac{d_0 + d_2}{4},$$

где d_0 – внутренний диаметр образца, мм;

\int_u – собственная частота изгибных колебаний, кГц.

3. Определить жесткость основы

$$B_1 = E_1 \cdot \frac{B \cdot h_1^3}{12}, \quad (2)$$

где E_1 – модуль Юнга основного металла (подложки), Н мм²;

h_1 – толщина (высота) подложки, мм.

$$h_1 = \frac{d_1 - d_0}{2}$$

d_1 – наружный диаметр основы, мм;

B – ширина образца, мм.

4. Составить и решить относительно j уравнение

$$\alpha j + B j + c = 0, \quad (3)$$

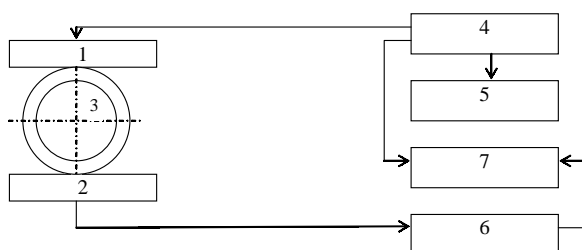
где E_2 – модуль упругости материала покрытия, МПа.

$$c = 1 - \beta; \quad \beta = \frac{B_2}{B_1}; \quad m = \frac{h_2}{h_1}; \quad h_2 = \frac{d_2 - d_1}{2}$$

5. Найти E_2 из выражения

$$E_2 = \gamma \cdot E_1 \quad (4)$$

Для определения модуля упругости II рода было необходимо:



1, 2 – задающий и приемный преобразователь; 3 – образец; 4 – генератор (ГЗ-104); 5 – частотомер (Ф-599); 6 – широкополосный усилитель (ВЗ-28А); 7 – самописец двухкоординатный (ПДС-0,21)

Рисунок 2. Блок-схема установки для определения характеристик упругости

1. Опытным путем определить частоту крутильных колебаний, рассчитать изгибную и крутильную жесткости и момент инерции при кручении по формулам:

$$J_{k2} = \frac{1}{3} \left(1 - 0,63 \frac{h_2}{b} \right) \cdot h_2^3 \cdot \epsilon \quad (5)$$

$$B_p = \frac{b^3 (E_1 h_2 + E_2 h_2)}{12} \quad (6)$$

$$C_2 = \left[5,62 / M \cdot R^3 \cdot \int_k - \frac{Y}{B_p} \right]^{-4}, \quad (7)$$

где J_{k2} – момент инерции при кручении, мм⁴;

B_p – изгибная жесткость сечения, Н мм².

$$B_{(r)} = (1 - \gamma_1) \cdot R_1^2 + (1 + \gamma_2) \cdot \mu^2$$

$$K_{(\mu)} = E \cdot (\mu^2 - R_1^2)$$

$$A = (1 - \gamma_1) \cdot R_1^2 + (1 + \gamma_1) \cdot R_0^2$$

$$D = E_1 \cdot (R_1^2 - R_0^2),$$

где E_1, V_1 – модули нормальной упругости и коэффициенты Пуассона основного металла (подложки) и покрытия соответственно;

R_0, R_1 – наружный начальный и текущий радиус покрытия.

2. Рассчитать момент инерции при кручении и крутильную жесткость сечения подложки

$$J_{k1} = \frac{1}{3} \left(1 - 0,63 \frac{h_1}{b} \right) \cdot h_1^3 \cdot \epsilon \quad (8)$$

$$C_1 = G_1 \cdot J_{k1}, \quad (9)$$

где J_{k1} – момент инерции при кручении основного металла (подложки), мм⁴;

C_1 – крутильная жесткость сечения основного металла (подложки), Н мм²;

G_1 – модуль упругости II рода материала подложки, Н/мм².

3. Рассчитать модуль упругости материала покрытий

$$G_2 = \frac{C_2 - C_1}{J_{k2} - J_{k1}} \quad (10)$$

Коэффициент Пуассона подложки и покрытия соответственно рассчитываются по формуле:

$$\nu_1 = \frac{E_1}{2 \cdot G_1} - 1; \quad \nu_2 = \frac{E_2}{2 \cdot G_2} - 1. \quad (11)$$

Остаточные напряжения на кольцевых образцах определялись методом последовательного удаления слоев /4/.

Относительные деформации определялись с помощью тензорезисторов 2ПКБ-10-200. На каждый образец перед проведением эксперимента на равных расстояниях друг от друга бакселитофенольным клеем БФ-2 по общепринятой методике [5] наклеивалось по два тензодатчика. Для замера относительных деформаций в процессе снятия тонких слоев активные и компенсационные тензодатчики включались на внешний полумост мостовой схемы прибора АИ-1 (рис. 3).

Внутренний полумост был смонтирован в цифровом измерителе информации. Компенсационные датчики предназначались для исключения температурной погрешности и представляли собой тензодатчики из той же партии, наклеенные на кольца из того же материала, что и исследуемые образцы.

Перед удалением первого слоя производилось многократное (не менее 8...10 раз) измерение нулевых показаний.

Образцы обтачивались на токарном станке 1К62 с помощью специального приспособления, и на каждой ступени фиксировались окружные деформации и замерялся наружный диаметр образца (по 6...8 размеров).

Число проточек (до полного снятия покрытия) выбиралось равное 5...6.

По полученным и обработанным статистическими методами данным строились деформационная кривая в координатах: радиус образца – деформация.

Окружные остаточные напряжения рассчитывались по формуле:

$$\sigma_0(\mu) = \frac{d}{d\mu} \cdot [\mu \cdot \sigma_\mu \cdot (\mu)], \quad (12)$$

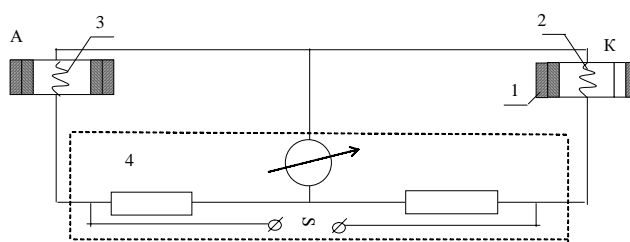
$\sigma_\mu(\mu) = -A_2 + \frac{B_2}{\mu^2}$ – радиальные остаточные напряжения.

$$A = \frac{1}{2(1-\nu_2)} \cdot \left\{ \left[1 + (1-2\nu) \cdot g_2 - (g_2-1) \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2} \right] - A_1 + 2\sigma_2(\nu_2-\nu_1) \cdot z(\mu) \right\};$$

$$B_2 = R_1^2 \cdot A_2 - (R_1^2 - R_0^2) \cdot A_1;$$

$$g_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

В каждой серии испытывались по три образца, затем сто-



1 – образец; 2, 3 – активный и компенсирующий тензорезисторы; 4 – цифровой измеритель деформаций ИДД-1

Рисунок 3. Схема подключения тензорезисторов

ились по усредненным данным эпюры распределения остаточных напряжений.

В результате исследований на первом этапе были получены следующие характеристики упругости образцов (табл. 2).

Распределение окружных остаточных напряжений в приваренном слое и в основном металле приведено на рисунке 4.

Анализ полученных результатов (рис. 4) показал, что окружные остаточные напряжения в покрытиях, полученных приваркой ленты 12Х18Н10Т на основу из стали 12Х18Н10Т, составляют на поверхности +204 МПа, а на границе покрытие – основа +32 МПа (номер образца 1).

Такие же закономерности распределения остаточных напряжений наблюдаются и в покрытиях, полученных ОКП ленты из сталей 20Х13 и 15Х28 на основу из стали 20Х13 (номера образцов 2, 3).

В покрытиях, полученных из ленты коррозионно-стойких сталей на основу из стали 45, уровень растягивающих напряжений несколько меньше, чем в случаях, когда ленты из этих же сталей приваривали на соответствующие коррозионно-стойкие стали. Например, лента из стали 12Х18Н10Т при приварке на сталь

Таблица 2. Характеристика упругости исследуемых образцов

№ образцов	Основной металл			Приваренная лента		
	марка стали	σ_1 , МПа 10^{-4}	ν_1	марка стали	σ_1 , МПа 10^{-4}	ν_1
1	12Х18Н10Т	8,05	0,20	12Х18Н10Т	7,33	0,23
2	20Х13	8,17	0,30	20Х13	8,03	0,25
3	20Х13	8,15	0,30	15Х28	7,04	0,26
4	сталь 45	7,69	0,30	12Х18Н10Т	8,11	0,24
5	сталь 45	7,71	0,28	20Х13	8,06	0,27
6	сталь 45	7,08	0,30	15Х28	8,03	0,26
7	сталь 45	7,69	0,31	сталь 45	8,04	0,24

12Х18Н10Т на наружных слоях имела остаточные напряжения 204 МПа, а при приварке на сталь 45 – 160 МПа (номера образцов 1 и 4).

Покрытие из стали 20Х13 – 246 МПа и 204 МПа, 15Х28 – 243 МПа и 192 МПа. Уровень растягивающих напряжений покрытий из стали 45 находится на уровне напряжений в коррозионно-стойких сталях мартенсито-ферритного класса.

Исходя из изложенного, можно заключить, что детали, восстановленные ЭКП лент из коррозионно-стойких сталей, имеют остаточные напряжения растяжения довольно высокого уровня, что приводит к снижению усталостной прочности восстановленных деталей.

Поэтому для деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, целесообразно искать другие способы восстановления или после технологического процесса восстановления ЭКПЛ ввести дополнительную обработку для снижения уровня растягивающих напряжений, например поверхностно-пластическую деформацию, дробеструйную обработку и т. д.

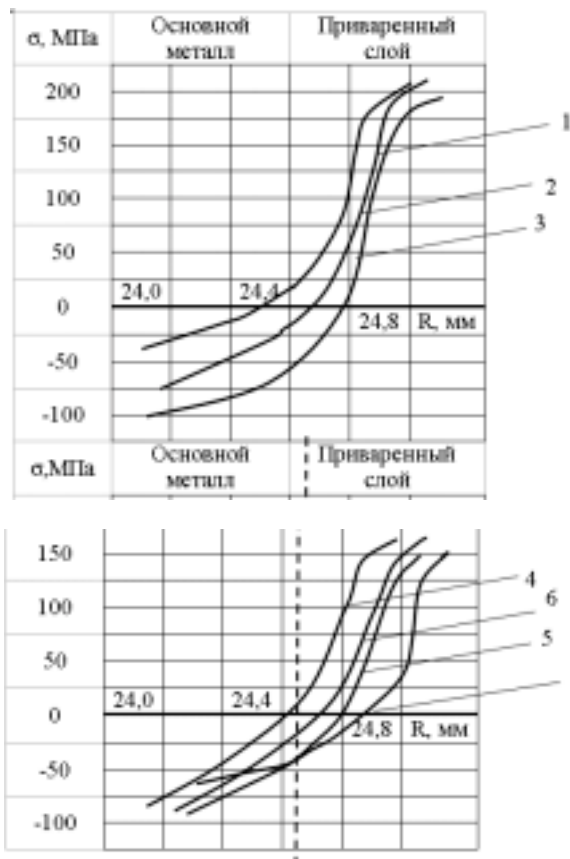


Рисунок 4. Остаточные напряжения покрытий, полученных ЭКПЛ (номера образцов соответствуют таблицам 1, 2)

Список использованной литературы:

1. Поляченко А.В., Фархшатов М.Н. Восстановление деталей оборудования // Молочная и мясная промышленность, №3, 1990. – С. 26–28
2. Дехтярь Л.И., Зильберман Б.В. Исследование характеристик упругости покрытий, используемых для упрочнения деталей машин // Повышение прочности деталей сельскохозяйственной техники / Труды КСХИ, т. 155, Кишинев, 1976. с. 25–32.
3. Дехтярь Л.И., Андрейчук В.И. Остаточные напряжения в неоднородных деталях сельскохозяйственной техники (некоторые расчеты). Кишинев, 1988. – 98 с.
4. Дехтярь Л.И. Определение остаточных напряжений в покрытиях и биметаллах. – Кишинев, Карта молдовеняскэ, 1986. – 173 с.
5. Электрические измерения неэлектрических величин. Под редакцией Новицкого П.В. – Л.: Энергия, 1975. – 676 с.