

Eesti Põllumajanduse Akadeemia

PÕLLUMAJANDUSHOONETE JA -EHITISTE UUED
KONSTRUKTSIOONID

Eesti Põllumajanduse Akadeemia
TEADUSLIKE TÖÖDE KOGUMIK

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Сборник научных трудов
Эстонской сельскохозяйственной академии

NR. 469

Tartu 1990

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ИЗГИБА ПРЯМОЙ
ПОЛОСОВОЙ ПОДЛОЖКИ С ПОКРЫТИЕМ

Я. П. Кыо, Х. Я. Лилле, В. А. Смирнов
М. А. Мещеряков

В методе изгиба плоской подложки для определения остаточных напряжений в покрытиях подложка обычно имеет форму прямой полосы (узкой прямоугольной пластинки) или прямоугольной пластинки, близкой к квадратной. Расчет остаточных напряжений для наращиваемых с одной стороны прямоугольных пластинок (широких полос) изложен в ряде работ (см. например [1-3]). Так как подложки такой формы явно изгибаются по сферической поверхности, то расчет, основанный на решении задачи чистого (сферического) изгиба пластинки обычно сомнений не вызывает. Однако в случае, когда подложка имеет форму прямой относительно узкой полосы, мнения разных авторов о характере деформации подложки при наращивании или удалении покрытия расходятся.

В ранних работах, обзор которых имеется в монографии [4], а также в некоторых новых (в [5, 6], например), авторы полагают, что в системе подложка-покрытие существует одноосное напряженное состояние, и изгиб происходит по дуге окружности. В некоторых публикациях (в [7], например) принимается, что при нанесении покрытия на полосу имеет место цилиндрический изгиб, причем напряженное состояние системы подложка-покрытие полагается двухосным. Наконец, существует мнение [8], что полоса с покрытием при малых деформациях изгибается подобно пластинке по сферической поверхности.

В работе [9] показана возможность моделирования изгиба системы полоса-покрытие изгибом полосового образца из термометалла при равномерном нагреве. Путем измерения зеркальным прибором угла поворота свободного конца образца, закрепленного по консольной схеме, установлено хорошее совпадение экспериментальных данных с данными расчетов на основе предположе-

ния, что при изгибе образец принимает сферическую форму. Поскольку такой результат лишь косвенно подтверждает характер деформации системы подложка-покрытие, нами методом голографической интерферометрии осуществлен эксперимент по определению формы поверхности, которую принимает поверхность полосовых моделей-образцов из термобиметалла при равномерном изменении температуры.

Образцы выполнялись из ленточного нормального термобиметалла ТБ1523 компоненты которого: никельмарганцовистая сталь 20НГ и инвар 36Н. Общая толщина образцов $h = 0,600$ мм, толщины слоев $h_1 = 0,288$ мм, $h_2 = 0,312$ мм, коэффициенты линейного расширения $\alpha_1 = 19 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, модули упругости $E_1 = 175 \text{ ГПа}$, $E_2 = 150 \text{ ГПа}$ [10]. Длина образцов $l = 50$ мм, ширина $b = 7,8; 17,8; 25,0$ мм.

Работа выполнена на измерительной голографической установке, включающей источник когерентного монохроматического излучения (лазер) и систему оптических приборов: светоделитель, рассеивающие линзы, зеркала и т. п. Съемка голограмм осуществлялась двухэкспозиционным методом. Для этого на одной и той же фотопластине сначала регистрировалась внешняя поверхность активного слоя, положенного на три сферические опоры образца (рис. 1) до деформации, а затем - после деформации, вызванной равномерным охлаждением на $\Delta t \text{ } ^\circ\text{C}$.

После обработки фотопластина с зарегистрированной голограммой помещалась в рассеянный луч лазера, где записанное изображение восстанавливалось и фотографировалось зеркальным фотоаппаратом. Расшифровка полученных голографических интерферограмм, зарегистрировавших прогибы образцов, производилась путем подсчета числа светлых полос до рассматриваемой точки от нулевой полосы, за которую принималась светлая полоса, наиболее удаленная от центра образца.

Прогибы определялись по формуле

$$w = n \lambda / 2, \quad (1)$$

где n - порядок светлой полосы; λ - длина волны лазерной волны (длина волны лазера). В условиях проведенных опытов $\lambda = 0,6328$ мкм.

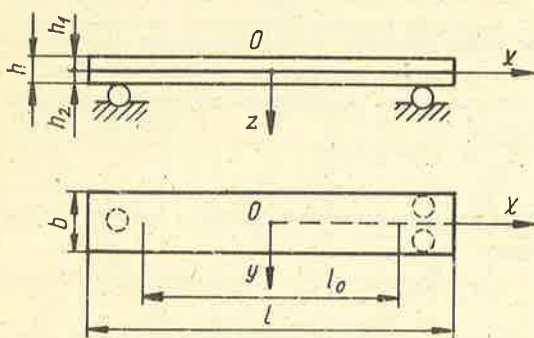


Рис. 1. Схема образца

На рис. 2 приведена голографическая интерферограмма деформации образца $7,8 \times 50$ мм. Чередующиеся светлые и темные полосы по существу представляют собой линии равных прогибов. Круговая форма полосы свидетельствует о том, что в результате равномерного изменения температуры поверхность образца принимает форму поверхности вращения.



Рис. 2. Голографическая интерферограмма деформации образца $7,8 \times 50$ мм

Для более точного выявления формы поверхности образцов была выполнена аппроксимация результатов измерения прогибов на участке длиной l_0 вдоль длинной оси симметрии ($y = 0$) уравнением

$$w = c_1 + c_2x + c_3x^2, \quad (2)$$

которое при малых прогибах достаточно точно соответствует предположению об изгибе образца по сферической поверхности кривизину которой можно представить второй производной прогиба

$$\kappa = w'' = 2c_3.$$

При этом угол наклона нормали и прогиб в начале координат ($x = 0$) будут

$$\varphi_0 = w'(0) = c_2, \quad w_0 = w(0) = c_1.$$

Численная процедура аппроксимации осуществлена на ЭВМ методом наименьших квадратов. Результаты для трех образцов приведены в таблице. Определены: кривизна поверхности κ , угол наклона нормали φ_0 и прогиб w_0 в начале координат, а также – средне-квадратическое отклонение δ аппроксимирующей функции (2) от экспериментальных значений прогиба.

Таблица

$b, \text{мм}$	b/l	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$l_0, \text{мм}$	$\kappa \cdot 10^5, \text{мм}^{-1}$	$w_0, \text{мкм}$	$\varphi_0 \cdot 10^4$	$\delta, \text{нм}$
7,8	0,16	-0,9	43,5	4,16	-9,76	-0,233	142
17,8	0,36	-1,0	36,6	4,65	-7,72	0,081	37
25,0	0,50	-0,9	47,5	4,08	-11,48	0,089	42

Погрешность наблюдений при подсчете числа интерференционных полос в наших экспериментах можно считать равной 0,25 полосы. Тогда погрешность измерения прогибов согласно выражению (1) составляет примерно 79 нм. Таким образом, средне-квадратическое отклонение аппроксимирующей функции от экспериментальных значений прогиба (таблица) и погрешность измерения прогибов есть величины одного порядка и следовательно, аппроксимацию функцией (2) можно считать оптимальной, и форму

поверхности образца - сферической. Такой же вывод следует из рис. 3, где представлены экспериментальные значения прогибов и аппроксимирующая их кривая для образца размером 7,8 x 50 мм.

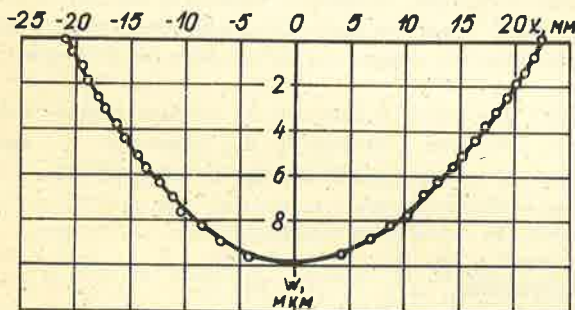


Рис. 3. Прогибы на средней линии образца 7,8 x 50 мм: светлые кружки - экспериментальные значения, сплошная линия - аппроксимирующая кривая

Таким образом, результаты моделирования чистого изгиба прямых полосовых подложек с покрытием изгибом полосовых биметаллических образцов при равномерном изменении температуры позволяют заключить, что подложки в форме прямых полос относительной толщиной $h/b \leq 0,08$ и относительной шириной $b/l \geq 0,16$ при наращивании или удалении покрытия изгибаются по сферической поверхности.

Л и т е р а т у р а

1. Нью Я. П. О расчете электрокристаллизационных напряжений в гальванических покрытиях по деформации ленточного катода // Сб. науч. тр. Эст. с.-х. акад. - 1969. - № 53. - С. 145-150.

2. Кыо Я. П. Определение остаточных напряжений в наращенных на стержни и пластинки покрытиях методом замера деформации // Изв. вузов СССР. Машиностроение. - 1969. - № 12. - С. 47-51.
3. Кыо Я. П. Расчет собственных напряжений в гальванических покрытиях по деформации катодной пластинки // Сб. науч. тр. Эст. с.-х. акад. - 1969. - № 13. - С. 63-75.
4. Ваграмян А. Т., Петрова Ю. С. Физико-механические свойства электролитических осадков. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 206 с.
5. Остаточные напряжения в покрытии из нитрида-титана, осажденного в вакууме / Матвеев Н. В., Краснов А. Н., Милосердов Н. В. и др. // Проблемы прочности. - 1985. - № 5. - С. 90-93.
6. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник. В 2-х томах / Под ред. М. А. Шлугера, Л. Д. Тока. - М.: Машиностроение, 1985. Т. 2. - 248 с.
7. Санжаровский А. Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий. - М.: Химия, 1978. - 183 с.
8. Барвинок В. А., Борисов Л. Н., Фокин В. Г. Определение остаточных напряжений в покрытиях плазменного напыления // Изв. вузов. машиностроение. - 1974. - № 5. - С. 115-119.
9. Кыо Я. П., Лилде Х. Я. Моделирование изгиба прямой полосовой подложки с покрытием // Сб. науч. тр. Эст. с.-х. акад. - 1988. - № 160. - С. 9-21.
10. Термобиметаллы. Композиции, обработка, свойства / Ю. А. Башнин, Ф. В. Улановский, Н. В. Перепелица и др. - М.: Машиностроение, 1986. - 134 с.

HOLOGRAAFIAMETODI KASUTAMINE KATTEGA RIBAALUSE PAINDE
MODELLEERIMISEL

J. Kõo, H. Lille, V. Smirnov, M. Meštšerjakov
K o k k u v õ t e

Kattega ribaaluse painet on modelleeritud bimetaltriba paindega ühtlasel jahutamisel. Holograafiaametodiga on kindlaks tehtud, et ribaalused suhtelise paksusega alla 0,08 ja suhtelise laiusega üle 0,16 painduvad katte pealekandmisel või mahavõtmisel mõõda sfäärilist pinda.

THE APPLICATION OF THE METHOD OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY
BY MODELLING THE BENDING OF A STRAIGHT STRIP SUBSTRATE
WITH THE DEPOSIT

J. Kõo, H. Lille, V. Smirnov, M. Meshcheryakov
S u m m a r y

The results of modelling the bending of a straight strip substrate with the deposit by bending thermobimetallic strip in case of regular change of temperature are presented. The deposit was added or removed on the surface of substrates with the relative thickness smaller than 0,08 and with the relative width larger than 0,16. The deformed surface of substrate determined by the method of holographic interferometry is spherical.