

УДК 621.771.63; 621.981

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВАЛКОВОЙ ВЫТЯЖКЕ ПРОДОЛЬНЫХ ГОФРОВ НА ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКЕ

Тришевский О.И., д.т.н., проф.

(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им.П.Василенко)

Приведены результаты исследований напряжённого состояния и давлений металла на валки в зоне формовки продольных периодически повторяющихся гофров. Выполнены расчеты нормальных и касательных напряжений при формовке профиля боковой обшивки полувагона.

Вступление. Одним из экономичных видов конструкционных материалов, широко применяющихся в транспортном и сельскохозяйственном машиностроении, являются листовые профили с периодически повторяющимися гофрами жёсткости, изготавливаемые высокопроизводительным методом валковой формовки-вытяжки в валках специализированных станков. Подобные профили нашли широкое применение в конструкциях, например, вагонов-зерновозов и вагонов-минераловозов в качестве обшивок боковых стен. Для правильного выбора оборудования для изготовления подобных профилей и совершенствования технологии формовки при освоении новых профилей необходимо знать напряжённое состояние, а через него и силовые параметры процессов формообразования, определению которых и посвящена настоящая работа.

Цель работы. Целью работы было теоретически с использованием метода наименьших квадратов установить распределение напряжений в каждой точке контакта формирующих элементов валков с металлом полосы. На основании полученного распределения определить нормальные давления металла на валки в зонах контакта, а также подобрать эмпирические формулы для расчёта этих давлений.

Для определения усилий металла на валках необходимо знать напряжения в каждой точке участка контакта. Умножая их на площадь участка контакта и суммируя по длине, получают искомые усилия.

В настоящей работе для определения напряжении был применен следующий метод расчета. Аппроксимируя кривую распределения утонения на готовом гофре полиномом 8-й степени

$$f(x) = -0,174 + 177,797x - 1241,264x^2 + 3719,531x^3 - 5916,201x^4 + 5396,816x^5 - 2834x^6 - 796,479x^7 - 92,604x^8, \quad (1)$$

находили поле скоростей

$$v_y = -f(x) \frac{2y}{s_0}; \quad v_x = \frac{2}{s_0} \int f(x) dx, \quad (2)$$

поле скоростей деформаций и интенсивность скоростей деформаций во всех точках очага деформации (напряженно-деформированное состояние считали плоским):

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}; \quad \varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{xx}^2 + \frac{1}{4} \varepsilon_{xy}^2}. \quad (3)$$

Учитывая зависимость [1]

$$\sigma_{xx} = \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{xx}, \quad \sigma_{yy} = \sigma + 2\mu_i \varepsilon_{yy}, \quad (4)$$

получаем следующие уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= -\mu_i \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \right) - 2 \frac{\partial \mu_i}{\partial x} \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial \mu_i}{\partial y}; \\ \frac{\partial \sigma}{\partial y} &= -\mu_i \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} \right) - 2 \frac{\partial \mu_i}{\partial y} \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial \mu_i}{\partial y} \frac{\partial v_y}{\partial x}; \end{aligned} \quad (5)$$

Эта система неопределенная, так как в ней число уравнений больше числа неизвестных. Решение ищем по методу наименьших квадратов, минимизируя сумму квадратов абсолютных невязок [2].

Заменяя в уравнениях производные на конечные разности и составляя систему нормальных уравнений, получаем для определения среднего напряжения в точке (i, j) следующую итерационную формулу:

$$\sigma[i, j] = \frac{1}{4} \{ \sigma[i, j + 1] + \sigma[i, j - 1] + \sigma[i + 1, j] + \sigma[i - 1, j] - F[i, j + 1]\Delta x + F[i, j - 1]\Delta x - F_1[i + 1, j]\Delta y + F_1[i - 1, j]\Delta y \}. \quad (6)$$

Для верхней границы очага деформации итерационная формула принимает вид:

$$\sigma[i, j] = \frac{1}{3} \{ \sigma[i, j + 1] + \sigma[i, j - 1] + \sigma[i - 1, j] - F[i, j + 1]\Delta x + F[i, j - 1]\Delta x + F_1[i - 1, j]\Delta y \}. \quad (7)$$

Для боковых границ задан следующий закон изменения:

$$\sigma[i, j] = \frac{\sigma_s(i-1)}{m} \quad (8)$$

Была составлена программа и выполнен расчет напряженного состояния при формовке профили обшивки полувагонов с продольными периодическими гофрами (см. рис.1) из стали 09Г2, для которого экспериментально определялась кривая утонения. При расчете принято $\sigma_s = 250$ МПа (25 кГ/мм²), $B = 218$ мм, $S_0 = 4$ мм.

В таблицах 1–4 приведены значения $\sigma, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$. Отметим, что эпюра средних напряжений зависит от выбора граничных условий. Если для граничного сечения они имеют вид треугольника, то кривая нормальных напряжений повторяет по виду кривую утонения. Величины этих напряжений в 1,5–1,8 раза больше предела текучести материала. Его изменение приводит к соответствующему изменению эпюры нормальных напряжений в таком же примерно соотношении. Давления, рассчитанные по эпюре, превышают замеренные на 30–40%.

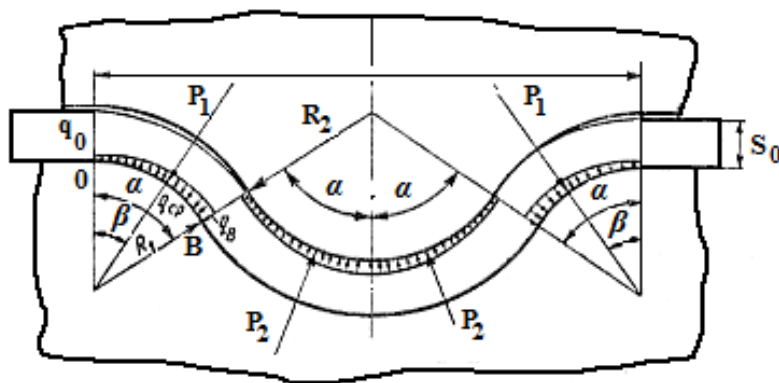


Рис. 1 - Схема очага деформации при формовке продольных периодически повторяющихся гофров

Таблица 1 - Распределение среднего нормального напряжения σ по очагу деформации

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 50,4 | 39,7 | 32,1 | 27,4 | 24,2 | 21,1 | 18,8 | 17,4 | 17,4 | 18,8 | 21,1 | 24,2 | 27,4 | 32,1 | 39,7 | 50,4 |
| 51,4 | 39,4 | 31,0 | 26,1 | 22,7 | 19,7 | 17,4 | 16,1 | 16,1 | 17,4 | 19,7 | 22,7 | 26,1 | 31,0 | 39,4 | 51,4 |
| 52,9 | 38,2 | 28,5 | 23,1 | 19,7 | 16,9 | 14,8 | 13,6 | 13,6 | 14,8 | 16,9 | 19,7 | 23,1 | 28,5 | 38,2 | 52,9 |
| 53,8 | 34,8 | 23,6 | 18,1 | 15,1 | 12,7 | 10,9 | 9,9 | 9,9 | 10,9 | 12,7 | 15,1 | 18,1 | 23,6 | 34,8 | 53,8 |
| 50,7 | 26,3 | 15,0 | 10,6 | 8,6 | 7,1 | 5,9 | 5,3 | 5,3 | 5,9 | 7,1 | 8,6 | 10,6 | 15,0 | 26,3 | 50,7 |
| 31,4 | 7,5 | 1,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,04 | 0,04 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 1,5 | 7,5 | 31,4 |

B

Таблица 2 - Распределение напряжений σ_{xx} в зоне формовки продольных гофров

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 32,2 | 21,5 | 13,9 | 9,3 | 6,0 | 3,0 | 0,6 | -0,8 | -0,8 | 0,6 | 3,0 | 6,0 | 9,3 | 13,9 | 21,5 | 32,2 |
| 33,3 | 21,2 | 12,8 | 7,9 | 4,5 | 1,6 | -0,8 | -2,1 | -2,1 | -0,8 | 1,6 | 4,5 | 7,9 | 12,8 | 21,2 | 33,3 |
| 34,7 | 20,0 | 10,3 | 4,9 | 1,6 | -1,3 | -3,4 | -4,6 | -4,6 | -3,4 | -1,3 | 1,6 | 4,9 | 10,3 | 20,0 | 31,7 |
| 35,6 | 16,6 | 5,4 | -0,09 | -3,1 | -5,5 | -7,3 | -8,3 | -8,3 | -7,3 | -5,5 | -3,1 | -0,09 | 5,4 | 16,6 | 35,6 |
| 32,6 | 8,2 | -3,2 | -7,6 | -9,6 | -11,1 | -12,3 | -12,9 | -12,9 | -12,3 | -11,1 | -9,6 | -7,6 | -3,2 | 8,2 | 32,6 |
| 13,2 | -10,6 | -16,7 | -17,7 | -17,7 | -17,8 | -18,0 | -18,1 | -18,1 | -18,0 | -17,8 | -17,7 | -17,7 | -16,7 | -10,6 | 13,2 |

B

Таблица 3 - Распределение напряжений τ_{yy} по очагу деформации

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 68,6 | 57,9 | 50,2 | 45,6 | 42,3 | 39,3 | 36,9 | 35,6 | 35,6 | 36,9 | 39,3 | 42,3 | 45,6 | 50,2 | 57,9 | 68,6 |
| 69,6 | 57,6 | 49,2 | 44,3 | 40,9 | 37,9 | 35,6 | 34,3 | 34,3 | 35,6 | 37,9 | 40,9 | 44,3 | 49,24 | 57,6 | 69,6 |
| 71,1 | 56,4 | 46,7 | 41,3 | 37,9 | 35,1 | 33,0 | 31,8 | 31,8 | 33,0 | 35,1 | 37,9 | 41,3 | 6,7 | 56,4 | 71,1 |
| 72,0 | 53,0 | 41,8 | 36,3 | 33,3 | 30,9 | 29,1 | 28,1 | 28,1 | 29,1 | 30,9 | 33,3 | 36,3 | 41,8 | 53,0 | 72,0 |
| 68,9 | 44,5 | 33,2 | 28,8 | 26,8 | 25,3 | 24,1 | 23,4 | 23,4 | 24,1 | 25,3 | 26,8 | 28,81 | 33,21 | 44,5 | 68,9 |
| 49,6 | 25,7 | 19,7 | 18,7 | 18,7 | 18,5 | 18,4 | 18,2 | 18,2 | 18,4 | 18,5 | 18,7 | 8,7 | 9,7 | 25,7 | 49,6 |

B

Таблица 4 - Распределение напряжений τ_{xy} в зоне формовки продольных гофров

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|------|------|------|-------|
| 0,04 | -0,2 | -0,2 | -0,09 | -0,01 | 0,01 | -0,004 | 0,004 | -0,01 | 0,01 | 0,09 | 0,2 | 0,2 | -0,04 |
| 0,04 | -0,2 | -0,2 | -0,08 | -0,01 | 0,01 | -0,003 | 0,003 | -0,01 | 0,01 | 0,08 | 0,2 | 0,2 | -0,04 |
| 0,03 | -0,2 | -0,2 | -0,07 | -0,009 | 0,009 | -0,003 | 0,003 | -0,009 | 0,009 | 0,07 | 0,2 | 0,2 | -0,03 |
| 0,03 | -0,2 | -0,1 | -0,06 | -0,007 | 0,007 | -0,002 | -0,002 | -0,007 | 0,007 | 0,06 | 0,1 | 0,1 | -0,03 |
| 0,02 | -0,1 | -0,1 | -0,05 | -0,006 | 0,006 | -0,002 | -0,002 | -0,006 | 0,006 | 0,05 | 0,1 | 0,1 | -0,02 |
| 0,02 | -0,09 | -0,08 | -0,04 | -0,004 | 0,004 | -0,001 | 0,001 | -0,004 | 0,004 | 0,04 | 0,08 | 0,09 | -0,02 |

В

Если эпюра средних напряжений для граничного слоя имеет вид прямоугольника, то нормальные напряжения по эпюре имеют один максимум посередине, а по величине и 5 раз превосходят предел текучести. Это свидетельствует о правильности выбора граничных условий по первому варианту.

Нормальные давления определяли путём интегрирования эпюры напряжений по площади контакта, то есть по площади, на которой давлениями по участкам гофров малых радиусов уравновешивались давлениями по участкам гофров больших радиусов:

$$P_{\phi} = \frac{1}{3} q_{cp} R_1 \alpha D \varphi_1 \cos \beta i \quad , \quad (9)$$

где q_{cp} — среднее удельное давление на участке контакта нижнего вала с металлом:

$$q_{cp} = \frac{q_O + q_B}{2};$$

q_O, q_B — удельные давления в крайних точках О и В участка контакта;

α — угол участка контакта по периметру калибра;

$$\alpha = \arccos \frac{R_1 + R_2 + s_0 + H}{R_1 + R_2 + s_0};$$

R_1, R_2 — радиусы профильных формующих валков;

s_0 — толщина формующей полосы;

H — высота отформованного гофра;

D — основной диаметр рабочих валков, соответствующий участку гладкой бочки;

φ_1 — центральный угол дуги контакта в продольном направлении:

$$\varphi_1 = (0,05 \div 0,07) \varphi;$$

φ — центральный угол дуги контакта в поперечном направлении:

$$\varphi = \arccos \frac{D-2H}{D};$$

i — число одновременно формующих гофров;

β — угол, определяемый из условия, что точка приложения составляющей делит участок эпюры удельных давлений на равные площади:

$$\beta = \frac{\alpha(q_B - q_{cp})}{q_B - q_O}.$$

Результаты расчета удовлетворительно совпадают с экспериментом.

Выводы. Таким образом, на основании проведенных исследований:

1. Распределение утонения по поперечному сечению готового гофра было аппроксимировано полиномом 8-й степени.

2. Получена итерационная формула для определения среднего напряжения в любой точке (i, j) рассматриваемого очага деформации, на основе которой получено распределение напряжений в очаге при формовке профиля обшивки полувагона с продольными гофрами из стали 09Г2.

3. Путём интегрирования эпюры напряжений по площади контакта формируемого металла с валками получены значения нормальных давлений при формовке. Результаты исследований могут быть использованы при дальнейшем совершенствовании технологии и оборудования валковой формовки профилей с продольными периодически повторяющимися гофрами.

Список литературы:

1. Алексеев Ю.Н. Вопросы пластического течения металлов // Харьков: изд-во ХГУ, 1958, 187 с.

2. Алексеев Ю.Н., Тришевский О. И. Определение напряжений и зоне формовки глухих поперечных периодических гофров жёсткости. // Сб. «Гнутые профили проката», вып.2 – Харьков: Изд. УКРНИИМЕТа, 1974, – С. 36—43.

Анотація

До визначення напружень при валковій витяжці подовжніх гофрів на листовій заготовці
Тришевський О.І.

Приведені результати досліджень напруженого стану і тиску металу на валки в зоні формування подовжніх гофрів, що періодично повторюються. Виконані розрахунки нормальної і дотичної напруги при формуванні профілю бічної обшивки піввагона

Abstract

To determination of tensions at rolling extraction longitudinal corrugations on sheet purveyance
Trishevskij O. I.

The results of investigations of stress state and the pressure of the metal on the rolls in the zone forming longitudinal recurring corrugations. The calculations of normal and shear stresses during molding profile side trim gondola