

УДК 539.4.014.13

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ I-ГО РОДА  
В ДЕТАЛЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКОЙ

При вытяжке листового металла трение на рабочей поверхности матрицы создает заторможенный слой, деформация которого по сравнению со слоем, прилегающим к пуансону, затруднена. Вследствие неоднородности деформации возникают дополнительные напряжения I-го рода, которые остаются в готовой детали и являются остаточными.

В основе аналитического определения таких остаточных напряжений лежит теорема о разгрузке, сформулированная А.А.Ильшиным [1], согласно которой эти напряжения равны разности напряжений в теле, находящемся под воздействием внешне приложенных сил при его пластическом и упругом поведении.

Радиальные растягивающие напряжения при вытяжке можно определить по известной формуле [2]:

$$\sigma_1 = \sigma_s A' (1 + \mu) ,$$

$$A' = \nu \pi \frac{R_n}{R_u} + \frac{M Q}{\pi R_n S \sigma_s} + \frac{S}{2z_m + S} , \quad (1)$$

где  $\sigma_s$  - предел текучести материала с учетом пружинения;

$R_n$  - наружный радиус фланца в данный момент;

$R_u$  - радиус средней поверхности изделия;

$Q$  - усилие прижима;

$S$  - толщина материала;

$z_m$  - радиус закругления матрицы;

$\mu$  - коэффициент трения.

Напряжения, вызываемые трением на радиусе закругления матрицы, распределяются по толщине образца неравномерно. Со стороны матрицы они имеют максимальную величину, а со стороны пуансона влияние сил трения, очевидно, не сказывается. Авторами было установлено, что экспериментальные данные хорошо описываются функцией вида

$$\sigma_1''(x) = \sigma_1''(\max) \cdot e^{-kx^2} , \quad (2)$$

где  $\sigma_1^*(x)$  и  $\sigma_1^*(max)$  — соответственно значения напряжения, вызываемых силами трения, в любом слое и на поверхности, соприкасающейся с матрицей;

$e$  — основание натуральных логарифмов;

$x$  — расстояние слоя от наружной поверхности;

$k$  — коэффициент.

Учитывая равенство площадей эпюр напряжений, вызываемых силами трения, при равномерном распределении последних и описываемом функцией (2), определим величину действительного радиального напряжения, действующего при вытяжке в любом сечении:

$$\sigma_{r(1)} = \sigma_s A' (1 + 1,81 \mu S \sqrt{k} \cdot e^{-kx^2}) \quad (3)$$

При упругом поведении материала под воздействием усилия вытяжки радиальные напряжения определяются по выражению (1), т.е. они равномерны по всему сечению. Величину остаточных напряжений I-го рода согласно теореме о разгрузке получим, вычитая (1) из (3):

$$\sigma_{i(1)} = 1,6 \mu \sigma_s A' (1,13 S \sqrt{k} \cdot e^{-kx^2} - 1) \quad (4)$$

Аналогичное выражение получаем при определении остаточных тангенциальных напряжений, используя условие пластичности

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \beta \sigma_s$$

Оценивая выражение (4), приходим к выводу, что величина остаточных напряжений I-го рода в деталях, изготовленных вытяжкой, зависит не только от коэффициента контактного трения, но и от пластических свойств материала, способности его к упрочнению, а также параметров инструмента, изделий и заготовок. Со стороны внешней поверхности в деталях действуют растягивающие осевые и тангенциальные остаточные напряжения; слои, примыкающие к внутренней поверхности, испытывают двухстороннее сжатие.

Экспериментальные исследования этих напряжений по методу колец и полосок [3] показали хорошую сходимость полученных результатов с аналитическими данными.

## Л и т е р а т у р а

1. И л ь ю н и н А.А. Пластичность, ч. I. Упруго-пластическая деформация, Гостехиздат, М., 1948.
2. Г у б и н С.И. и др. Основы теории обработки металлов давлением. Машгиз, М., 1959.
3. Б и р г е р И.А. Остаточные напряжения. М., Машгиз, 1963.