Т. А. Юркеник, Т. М. Федорова

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Пластическая анизотропия листового металла проявляется в различии пластических свойств в плоскости листа и по его толщине. При исследовании процессов обработки металлов давлением (вытяжка, обтяжка, гибка и другие) отмечено, что пластическая анизотропия оказывает существенное влияние на штампуемость листового металла и эксплуатационные характеристики.

Авторами проведено исследование анизотропии свойств титановых сплавов. Для этой цели вырезались образцы из материалов ОТ4, ОТ4-1, ВТ1-2, ВТ-14 вдоль волокон, поперек и под углом 45°. Результаты экспериментов показали, что пластические и прочностные свойства различны.

Материал ОТ4-1	$\sigma_в$, $кг/мм^2$	$\sigma_{0,2}$, $кг/мм^2$	$\delta_р$, %
Вдоль волокон . .	67	57	12
Поперек	63	53	7
Под углом 45°	60,6	53,1	7,2

Учет анизотропии при расчете технологического процесса позволяет корректировать допустимую степень деформирования и другие технологические параметры (коэффициент вытяжки, коэффициент обтяжки, минимальный радиус гиба).

Важной характеристикой при эксплуатации изделия является склонность деталей к трещинообразованию под действием динамических нагрузок. Поэтому необходимо исследовать влияние анизотропии на эту характеристику. Такие испытания проводились на нагартованных образцах из титановых сплавов ОТ4, ОТ4-1, вырезанных вдоль и поперек волокон.

Результаты показали, что с увеличением степени деформации склонность к трещинообразованию повышается незначительно (однако образцы, вырезанные вдоль проката, наиболее склонны к трещинообразованию).

Таким образом, проведенные исследования расширяют возможность пластического деформирования.

Заготовку следует вырезать таким образом, чтобы направление наибольших деформаций при технологическом процессе совпадало с направлением максимальных деформаций, которые допускаются в плоскости листа.

Е. С. Богданов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСТОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРЕНОСНОГО ПОВОРОТА

Обычно деформированное состояние определяют по конечной форме, то есть принимают геометрическую деформацию за физическую и в случае больших деформаций допускают весьма ощутимые ошибки.

Малая чистая деформация определяется симметричным тензором, тогда как малая деформация с поворотом определяется несимметричным тензором. В любом случае тензор малых деформаций можно разложить на симметричный тензор и антисимметричный, определяющий поворот.

Для того, чтобы найти тензор больших истинных деформаций, надо весь процесс деформирования разбить на большое число этапов и, выделив в каждом этапе чистую деформацию, просуммировать ее, переходя к пределу, когда число этапов неограниченно возрастает. Аналитически это возможно, когда процесс чистой деформации совершается при постоянном отношении истинных (натуральных) деформаций.

Пусть известен так называемый дифференциальный тензор, то есть тензор малых деформаций в первом этапе:

$$_{\text{диф}}T = \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_x & \Delta\eta_{xy} & \Delta\eta_{xz} \\ \Delta\eta_{yx} & \Delta\varepsilon_y & \Delta\eta_{yz} \\ \Delta\eta_{zx} & \Delta\eta_{zy} & \Delta\varepsilon_z \end{pmatrix}, \text{ где } \Delta\eta_{ij} \neq \Delta\eta_{ji}; \left.\begin{matrix} i \\ j \end{matrix}\right\} = x, y, z.$$

Разложим этот тензор на симметричный и антисимметричный:

$$_{\text{диф}}T = {}_{\text{диф}}T_{\text{сим}} + {}_{\text{диф}}T_{\text{ант}} = \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_x & \Delta\gamma_{xy} & \Delta\gamma_{xz} \\ \Delta\gamma_{yx} & \Delta\varepsilon_y & \Delta\gamma_{yz} \\ \Delta\gamma_{zx} & \Delta\gamma_{zy} & \Delta\varepsilon_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \Delta\Theta_{xy} & \Delta\Theta_{xz} \\ \Delta\Theta_{yx} & 0 & \Delta\Theta_{yz} \\ \Delta\Theta_{zx} & \Delta\Theta_{zy} & 0 \end{pmatrix},$$

где $\Delta\gamma_{ij} = \dfrac{\Delta\eta_{ij} + \Delta\eta_{ji}}{2}$, а $\Delta\Theta_{ij} = \dfrac{\Delta\eta_{ij} - \Delta\eta_{ji}}{2}$.

Симметричный тензор определяет чистую деформацию за первый этап, а антисимметричный определяет переносный поворот за этот же этап.

Если нагружение простое, то все компоненты дифференциального тензора будут пропорциональны одному параметру, за который можно принять хотя бы $\Delta\varepsilon_{\text{п}} = \Delta\varepsilon$.

Тогда $_{\text{диф}}T_{\text{сим}} = \Delta\varepsilon \cdot K_{ij} \quad \left.\begin{matrix} i \\ j \end{matrix}\right\} = x, y, z.$

Главные компоненты тензора K_{ij} будут являться корнями векового уравнения

$$K^3 - I_1 K_2 + I_2 K - I_3 = 0,$$

где I_1, I_2, I_3 — инварианты тензора K_{ij}.

Окончательно дифференциальный симметричный тензор в главных осях примет следующий вид:

$$_{\text{диф}}T_{\text{сим}} = \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \cdot K_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\varepsilon \cdot K_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta\varepsilon K_3 \end{pmatrix}.$$

Сложив полученный тензор с единичным тензором, получим так называемый элементарный тензор.

$$_{\text{эл}}T_m = \begin{pmatrix} 1 + \Delta\varepsilon \cdot K_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \Delta\varepsilon \cdot K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \Delta\varepsilon K_3 \end{pmatrix},$$

компоненты которого представляют собой главные масштабы в конце первого этапа.

Если процесс деформации разбит на n этапов с равными промежуточными масштабами, то конечный масштаб будет равен $m = (1 + \Delta\varepsilon)^n$, откуда

$$n = \frac{\ln m}{\ln(1 + \Delta\varepsilon)}.$$

Тогда тензор конечных масштабов будет равен

$$T_m = \lim_{\Delta\varepsilon \to 0} \begin{pmatrix} 1+\Delta\varepsilon\cdot K_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1+\Delta\varepsilon\cdot K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1+\Delta\varepsilon\cdot K_3 \end{pmatrix}^{\frac{\ln m}{\ln(1+\Delta\varepsilon)}} = \begin{pmatrix} e^{K_1 \ln m} & 0 & 0 \\ 0 & e^{K_2 \ln m} & 0 \\ 0 & 0 & e^{K_3 \ln m} \end{pmatrix},$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Отсюда тензор истинных деформаций будет

$$T_e = \begin{pmatrix} e_1 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 \ln m & 0 & 0 \\ 0 & K_2 \ln m & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \ln m \end{pmatrix},$$

где e_1, e_2, e_3 — главные компоненты тензора истинных (натуральных) деформаций, а

$$m = 1 + \varepsilon_x,$$

где ε_x — конечная относительная деформация по направлению оси x.

Исследование процессов больших деформаций часто приводит к ошибочным результатам и выводам по двум причинам: во-первых, деформированное состояние выражается не истинными деформациями, а относительными и, во-вторых, деформированное состояние определяется без учета влияния поворота и непропорциональности изменения деформаций.

В данном исследовании показан путь исключения влияния поворота на определение деформированного состояния при простом нагружении.

Е. С. Богданов

ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ

В качестве простейшего примера деформации с переносным поворотом может служить деформация при кручении тонкостенной трубы из пластичного материала. Не останавливаясь на описании опыта, позволившего довести тонкостенную трубку до разрушения без потери устойчивости, рассмотрим кручение трубы при любой величине угла сдвига. Поскольку действует только одна нагрузка, постольку нагружение можно считать простым, однако тензор деформации будет несимметричным.

Выделим на поверхности трубы единичный квадрат, сторона которого совпадает с образующей. В процессе закручивания до заданного угла сдвига выделенный элемент будет изменять свою форму испытывая на так называемый простой сдвиг. Конечной формой элемента будет параллелограмм, одна сторона которого

$$r_1 = 1, \text{ а другая } r_2 = \frac{1}{\cos\gamma},$$

где γ — конечный угол сдвига.

По этим размерам можно определить натуральные деформации

$$e_{1,3} = \ln \frac{1}{2} (\pm \operatorname{tg}\gamma + \sqrt{\operatorname{tg}^2\gamma + 4}).$$

Если конечный угол сдвига задан так, что $\operatorname{tg}\gamma = 2$, то

$$e_1 = 0{,}88, \quad e_i = \frac{e_1}{\sqrt{3}} = 0{,}507.$$

Эта деформация найдена по достигнутой форме и не является чистой деформацией: