Секція: МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА МЕХАНІКА
Голови: проф. В. Кривень, доц. М. Михайлишин, проф. М. Петрик
Вчений секретар: доц. Д. Михалик

УДК 620.171.3
Г. Козбур, О. Шкодзінський, канд. техн. наук, доц.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

РОЗРАХУНОК СТАЛИХ ІНТЕГРУВАННЯ ДЛЯ УМОВ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ОБОЛОНОК В УМОВАХ СНС

H. Kozbur, O. Shkodzinsky, Ph.D., Assoc. Prof.

CALCULATION OF CONSTANTS OF INTEGRATION FOR CONDITIONS BUCKLING ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION OF THIN-WALLED AXISYMMETRIC SHELLS IN A COMPLEX STRESS STATE

Осесиметрична оболонка товщини h з днищами, серединна поверхня якої утворена обертанням гладкої кривої, навантажена внутрішнім тиском q та зусиллям розтягу N, напрямленим по дотичній до меридіана в кожній точці прикладання. Розглядаються великі пластичні деформації оболонки від дії осесиметричного навантаження, пружними деформаціями знехтувано. Прийнято виконання гіпотез Кірхгофа-Лява та існування безмоментного напруженого стану. Матеріал оболонки вважається ізотропним та нестисливим.

Уведено позначення: ρ_m – поточний радіус меридіана серединної поверхні елемента (меридіанний радіус), ρ_t – поточний радіус поверхні, ортогональної до меридіана (широтний радіус), σ_m і σ_t – меридіанне та колове нормальні напруження, $\sigma_r = 0$. Істинні колову, радіальну та меридіанну залишкові деформації позначено відповідно ε_t, ε_r, ε_m. Показник тонкостінності – $\mu = h/\rho_t$, показник опуклості– $\nu = \rho_t/\rho_m$; коефіцієнти $k = \sigma_m/\sigma_t$ і $n = \varepsilon_m/\varepsilon_t$, $n = (2k-1)/(2-k)$.

Застосовано критерій Дорна до умов знаходження істинних нормальних напружень в елементі осесиметричної оболонки, отриманих в [1], та отримано умови втрати стійкості процесу пластичного деформування (1а), (1б).

$$\sigma_t = \frac{(1+\varepsilon_t)^{\nu}\left(\varepsilon_t + \dfrac{1-\nu/2-\mu/2}{1-\nu/2+\mu/2(n+1)}\right)^{\frac{(1-\nu/2)(1-\nu)}{1-\nu/2+\mu/2(n+1)}}}{1-(n+1)\varepsilon_t}\cdot C_t \qquad (1а)$$

$$\sigma_m = \frac{\varepsilon_m + \dfrac{1-\nu/2}{1-\nu/2n}}{(n+\varepsilon_m)\left(\dfrac{n}{n+1}-\varepsilon_m\right)\left(\varepsilon_m + \dfrac{1-\nu/2-(1-\mu/2)/2k}{1-\nu/2n-(1-\mu/2)/2k}\right)}\cdot C_m \qquad (1б)$$

За умов $\sigma_m > 0$ та $\sigma_t > 0$ вираз (1а) відповідає напруженим станам із співвідношенням головних напружень $k = 0,5... \approx 1$, (1б) – випадкам $k = 0,5...2$.

Для знаходження постійної інтегрування C_t у загальному інтегралі (1а) розглянуто частковий випадок настання граничного стану пластичного деформування циліндричної трубки, навантаженої внутрішнім тиском q, в цьому разі $k = 0,5$.

Граничні колові напруження і деформація ε_t^b, σ_t^b відповідають моменту руйнування зразка. Для прикладу використано результати експериментів для сталевих циліндричних тонкостінних зразків, наведені в [2, 3]. Обчислено значення констант інтегрування (Табл. 1):

Таблиця 1 – Розрахунок значень сталих інтегрування для умови (1а)

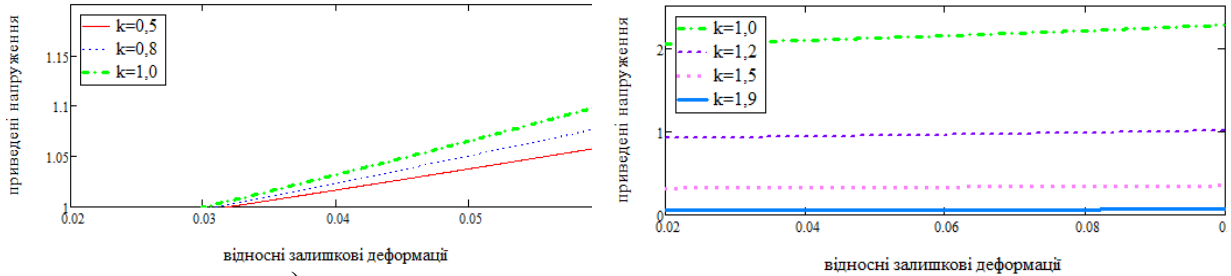
Марка матеріалу	$\mu = h/\rho_t$	ε_t^b	σ_t^b	C_t	Приведені напруження σ_t^b/C_t
Сталь 0,23%С	0,078	0,150	595 МПа	410,2	1,45
Сталь 0,37%С	0,048	0,063	665 МПа	577,1	1,15
10ГН2МФА	0,06	0,036	705 МПа	670,5	1,05
15Х2МФА	0,067	0,021	746 МПа	747,0	1,00
15Х2НМФА	0,067	0,024	745 МПа	739,3	1,01

Аналогічно при $k=1$ визначено сталі інтегрування C_m (Табл. 2).

Таблиця 2 – Розрахунок значень сталих інтегрування для умови (1б)

Марка матеріалу	$\mu = h/\rho_t$	ε_m^b	σ_m^b	C_m	Приведені напруження σ_m^b/C_m
10ГН2МФА	0,06	0,034	667 МПа	321,4	2,08
15Х2МФА	0,067	0,024	739 МПа	360,2	2,05
15Х2НМФА	0,067	0,036	721 МПа	346,6	2,08

Графіки умов втрати міцності (1а), (1б) циліндричної трубки було побудовано для показника тонкостінності $\mu = 0,067$ (рис. 1, а). Значення відносних залишкових деформацій ε_t^b та приведених напружень σ_t^b/C_t було вибрано згідно з таблицями 1, 2.



а) б)

Рисунок 1 – графічне зображення умов втрати стійкості: а) умова (1а) у випадку $\sigma_t > \sigma_m$; б) умова (1б) у випадку $\sigma_m > \sigma_t$

Аналіз графічних зображень умов (1а) та (1б) демонструє зменшення ресурсу міцності матеріалу при пластичному деформуванні із наближенням значень співвідношень головних напружень до 0,5 та 2, що підтверджується багаточисельними експериментами [3].

Література

1. Козбур Г. Пружно-пластичне деформування вісесиметричної оболонки під впливом внутрішнього тиску і розтягу / Г.Козбур // Наукові нотатки, ЛНТУ. – 2016. – Вип.53. – С.79-83.
2. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: Под ред. А. А. Лебедева /К.: Изд. Дом «Ин Юре», 2003. – с.140.
3. Гігіняк Ф.Ф., ; Лєбєдєв А.О., Шкодзінський О.К., ; Лєбєдєва А.О., ; Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану: Монографія / Гігіняк Ф.Ф., Лєбєдєв А.О., Шкодзінський О.К.; За ред. А.О.Лєбєдєва. К.: Наукова думка, 2003. – 270 с.