велику кількість малих станцій технічного обслуговування. Ця система разом з малими станціями має не лише вирішувати питання своєчасної та в повному обсязі доставки запасних частин, але й створювати такі форми зовнішнього постачання та внутрішньої організації їх роботи, при яких максимальною мірою забезпечується мінімальний час виконання конкретних замовлень.

Література

1. Кристофер М. Логистика и управление цепочками поставок / Под общей редакцией В. С. Лукинского – серия «Теория и практика менеджмента» – СПб; Питер, 2004. – 316 с.: ил.

УДК 539.3

ПРИКЛАДНА МОДЕЛЬ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТОВСТИХ ШАРУВАТИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ВЕЛИКОЇ КРИВИЗНИ

Марчук О.В., доктор технічних наук,
Рассказов О.О., доктор технічних наук,
Ільченко Я.Л.

Постановка проблеми. В сучасних умовах в практиці розрахунку різноманітних конструкцій виникають проблеми розрахунку на стійкість циліндричних оболонок великої кривизни. Розрахунку стійкості тонких циліндричних оболонок малої кривизни присвячена велика кількість робіт, які відображені в оглядах Воровича И.И. [1], Григолюка Э.И., Когана Ф.А [2], Григоренко Я.М., Влайкова Г.Г., Григоренко О.Я. [3], Гузя О.М., Чернишенко І.С., Шнеренко К.І. [4], Неміша Ю.М., Хоми І.Ю. [6], Піскунова В.Г., Рассказова О.О. [7], Сало В.А. [8] і ін., але підходи, що в них розглядають не дозволяють коректно розв'язувати задачі стійкості для товстих оболонок. Виникає проблема врахування зміни кривизни оболонки за її товщиною.

У даному повідомленні розроблена прикладна модель, яка дозволяє розглядати втрату стійкості таких конструкцій в умовах осесиметричного згину. Підхід заснований на розділенні циліндричної оболонки по товщині концентричними поверхнями на ряд складових циліндричних оболонок. Кожна з цих складових оболонок мають свою кривизну, визначувану по її серединній лінії. Задовольняючи умовам контакту на зовнішніх поверхнях між складовими оболонками, маємо нагоду описувати стійкість початкової оболонки.

Запишемо вектор переміщень шаруватої циліндричної оболонки наступним чином:

$$U_1(x,z) = U_{1l}(x) f_{1l}(z) + W_{p,1}(x)\varphi_{1p}(z);$$
$$U_3(x,z) = W_p(x)\beta_p(z) \qquad (\ l = 1,2;\ \ p = 1,\ldots,3)\ .$$

Тут $U_{1l}(x)$ –тангенціальні переміщення на зовнішніх поверхнях оболонки, $W_l(x)$ – вертикальні переміщення на зовнішніх поверхнях оболонки, $W_3(x)$ – функція зсуву. Розподіл шуканих функцій за товщиною виконується за рахунок наступної апроксимації [3]: $f_{1l}(z)$ $\beta_1(z), \beta_2(z)$ –поліноми першої степені $\varphi_{11}(z), \varphi_{12}(z),$ $\beta_3(z)$ – поліноми другої степені; $\varphi_{13}(z)$ – поліноми третьої степені.

Використовуючи відомі співвідношення, запишемо вирази для деформацій

$$\overline{e}_{11} = e_{11} + e_{11}^{\text{H}}; \quad \overline{e}_{22} = e_{22}; \qquad \overline{e}_{13} = e_{13}\ ; \qquad \overline{e}_{33} = e_{33},$$

де

$$e_{11} = U_{1l,1} f_{1l} + W_{p,11}\varphi_{1p};\ \ e_{11}^{\text{H}} = 0{,}5\left[(U_{1l,1} f_{1l} + W_{p,11}\varphi_{1p})^2 + (W_{p,1}\beta_p)^2\right];$$

$$e_{22}=\frac{1}{r}W_p\beta_p;\quad e_{33}=W_p\beta_{p,3};\quad 2e_{13}=U_{1l}f_{1l,3}+W_{p,1}(\varphi_{1p,3}+\beta_p)\quad (\ l=1,2;\ \ p=1,...,3)\,.$$

Напруження закритичного стану запишемо наступним чином

$$\sigma_{11}=C_{11}(U_{1l,1}f_{1l}+W_{p,11}\varphi_{1p})+C_{12}(\frac{1}{r}W_p\beta_p)+C_{13}(W_p\psi_p)\,;$$

$$\sigma_{22}=C_{21}(U_{1l,1}f_{1l}+W_{p,11}\varphi_{1p})+C_{22}(\frac{1}{r}W_p\beta_p)+C_{23}(W_p\psi_p)\,;$$

$$\sigma_{33}=C_{31}(U_{1l,1}f_{1l}+W_{p,11}\varphi_{1p})+C_{32}(\frac{1}{r}W_p\beta_p)+C_{33}(W_p\psi_p)\,;$$

$$\sigma_{13}=G_{13}[U_{1l}f_{1l,3}+W_{p,1}(\varphi_{1p,3}+\beta_p)]\quad (l=1,2;\ \ p=1,...,3)\,.$$

Рівняння збуреного стану оболонки отримаємо на основі наступного варіаційного рівняння:

$$\delta\ \Pi+\delta\ \Pi_{\text{Н}}-\delta\ A_1=0\ ,$$

де

$$\delta\ \Pi=\int\limits_0^a\int\limits_{a_{k-1}}^{a_k}\{[C_{11}(U_{1l,1}f_{1l}+W_{p,11}\varphi_{1p})+C_{12}(\frac{1}{r}W_p\beta_p)+C_{13}(W_p\beta_{p,3})]\delta\ (U_{1l,1}f_{1l}+W_{p,11}\varphi_{1p})+$$

$$+[C_{21}(U_{1l,1}f_{1l}+W_{p,11}\varphi_{1p})+C_{22}(\frac{1}{r}W_p\beta_p)+C_{23}(W_p\beta_{p,3})]\delta\ (\frac{1}{r}W_p\beta_p)+$$

$$+[C_{31}(U_{1l,1}f_{1l}+W_{p,11}\varphi_{1p})+C_{32}(\frac{1}{r}W_p\beta_p)+C_{33}(W_p\beta_{p,3})]\delta\ (W_p\beta_{p,3})+$$

$$+G_{13}[U_{1l}f_{1l,3}+W_{p,1}(\varphi_{1p,3}+\beta_p)]\ \delta[U_{1l}f_{1l,3}+W_{p,1}(\varphi_{1p,3}+\beta_p)]\}dzdx$$

– варіація внутрішньої енергії оболонки в збуреному стані;

$$\delta\ \Pi_{\text{Н}}=\int\limits_0^a\int\limits_{a_{k-1}}^{a_k}0{,}5\sigma_{11}^0\delta\Big[(U_{1l,1}f_{1l}+W_{p,11}\varphi_{1p})^2+(W_{p,1}\beta_p)^2\Big]\,dzdx$$

– варіація потенційної енергії шаруватої оболонки докритичного напруженого стану, що виникає при втраті стійкості;

$$\delta\ A_1=\int\limits_0^a(q_{11}\delta U_{11}+q_{12}\delta U_{12}+q_{31}\delta W_1+q_{32}\delta W_2)dx$$

– робота сил на лицьових поверхнях шару (сил міжшарового зчеплення).

Після відповідних перетворень рівняння рівноваги шаруватої циліндричної оболонки набуває вигляду:

$$-[B_{11l\bar{l}}\frac{\partial^2}{\partial x^2}-B_{66l\bar{l}}]U_{1\bar{l}}-[C_{11l\bar{p}}\frac{\partial^3}{\partial x^3}+(C_{13l\bar{p}}-C_{66l\bar{p}}+\frac{1}{r}R_{12l\bar{p}})\frac{\partial}{\partial x}]W_{\bar{p}}+$$

$$+\varepsilon^0\{\frac{\partial}{\partial x}[(\varepsilon_{11}\overline{B}_{111\bar{l}l})\frac{\partial U_{1\bar{l}}}{\partial x}+(\varepsilon_{11}\overline{C}_{111\bar{p}l})\frac{\partial^2 W_{\bar{p}}}{\partial x^2}]\}=q_{1l}$$

$$[C'_{11\bar{p}l}\frac{\partial^3}{\partial x^3}+(C'_{31p\bar{l}}-C'_{66p\bar{l}}+\frac{1}{r}R'_{21p\bar{l}})\frac{\partial}{\partial x}]U_{1l}+\{D_{11\bar{p}p}\frac{\partial^4}{\partial x^4}+[D_{13\bar{p}p}+D'_{31\bar{p}p}-D_{66\bar{p}p}+\frac{1}{r}(S_{12\bar{p}p}+S'_{21\bar{p}p})]\frac{\partial^2}{\partial x^2}+$$

$$+\frac{1}{r}(H_{23p\bar{p}}+H_{32p\bar{p}})+D_{33p\bar{p}}+\frac{1}{r^2}H_{22p\bar{p}}\}W_p+$$

$$+\varepsilon^0\{\frac{\partial^2}{\partial x^2}[(\varepsilon_{11}\bar{C}'_{111\bar{l}p})\frac{\partial U_{1\bar{l}}}{\partial x}+(\varepsilon_{11}D_{111\bar{p}p})\frac{\partial^2 W_{\bar{p}}}{\partial x^2}]-\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon_{11}\bar{H}_{11l\bar{p}p})\frac{\partial W_{\bar{p}}}{\partial x}\}=q_{3p}\ (l,\bar{l}=1,2;\ p,\bar{p}=1,...,3),$$

де

$$B_{11l\bar{l}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}c_{11}f_{1l}f_{1\bar{l}}dz;\ C_{11l\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{11}f_{1l}\varphi_{1\bar{p}}dz;\ C'_{11p\bar{l}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{11}\varphi_{1p}f_{1\bar{l}}dz;\ C_{13l\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{13}f_{1l}\beta_{\bar{p},3}dz;$$

$$C'_{31p\bar{l}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{31}\beta_{p,3}f_{1\bar{l}}dz;\ D_{11p\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{11}\varphi_{1p}\varphi_{1\bar{p}}dz;\ D_{13p\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{13}\varphi_{1p}\beta_{\bar{p},3}dz;\ D'_{31p\bar{l}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{31}\beta_{p,3}\varphi_{1\bar{p}}dz;$$

$$S_{12p\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{12}\varphi_{1p}\beta_{\bar{p}}dz;\ S'_{21p\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{21}\beta_p\varphi_{1\bar{p}}dz;\ R_{12l\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{12}f_{1l}\beta_{\bar{p}}dz;\quad R'_{21p\bar{l}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{21}\beta_p f_{1\bar{l}}dz;$$

$$H_{23p\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{23}\beta_{p,3}\beta_{\bar{p}}dz;\ H'_{32p\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{23}\beta_p\beta_{\bar{p},3}dz;\ H_{22p\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{22}\beta_p\beta_{\bar{p}}dz;\ B_{66l\bar{l}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}G_{13}f_{1l,3}f_{1\bar{l},3}dz;$$

$$D_{33p\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}C_{33}\beta_{p,3}\beta_{\bar{p},3}dz\ \ D_{66p\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}G_{13}(\varphi_{1p,3}+\beta_p)(\varphi_{1\bar{p},3}+\beta_{\bar{p}})dz;C_{66l\bar{p}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}G_{13}f_{1l,3}(\varphi_{1\bar{p},3}+\beta_{\bar{p}})dz;$$

$$C'_{66p\bar{l}}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}G_{13}(\varphi_{1p,3}+\beta_p)f_{1\bar{l},3}dz;\bar{B}_{11\bar{l}l}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}B_{11}f_{1\bar{l}}f_{1l}dz;\bar{C}_{11\bar{p}p}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}B_{11}\varphi_{1\bar{p}}f_{1l}dz;\bar{C}'_{11\bar{l}p}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}B_{11}f_{1\bar{l}}\varphi_{1p}dz;$$

$$\bar{D}_{11\bar{p}p}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}B_{11}\varphi_{1\bar{p}}\varphi_{1p}dz;\bar{H}_{11\bar{p}p}=\int_{a_{k-1}}^{a_k}B_{11}\beta_{\bar{p}}\beta_p dz.$$

Розглянемо стійкість двошарової ортотропні оболонки (шари однакові, повернені один до одного на 90^0) з наступними фізико-механічними характеристиками: a/h=5, R/h=2,5,10,20 $E_1^{(1)}/E_2^{(1)}=30/1$; $E_2^{(1)}=E_3^{(1)}$; $G_{12}^{(1)}/E_2^{(1)}=0{,}6/1$; $G_{13}^{(1)}=G_{12}^{(1)}$; $G_{23}^{(1)}/E_2^{(1)}=0.3/1$; $\nu_{12}^{(1)}=\nu_{13}^{(1)}=\nu_{23}^{(1)}=0{,}25$. Докритичний стан однорідний $\sigma_{11}^0=-\varepsilon^0 B_{11}\varepsilon_{11}$. У таблиці 1 подано результати розрахунку (ε^0). Оболонка розраховувалась при її поділенні на два шари з розгляданням кожного окремого шару отриманою системою рівнянь. Розрахунок проводився з урахуванням усіх складових тензора напружень та деформацій (Т), а також з виключенням обтиснення відповідним завданням фізико-механічних характеристик (С).

Таблиця 1

Параметр стійкості оболонки ε^0 при співвідношенні a/h=5

R/h	2	5	10	20
T	0.2739	0.08393	0.03018	0.01370
C	0.5174	0.1007	0.03217	0.01399

Нехтування обтисненням при розрахунку оболонок з великою кривизною при R/h<5 на стійкість може привести до виникнення суттєвої похибки.

Таким чином, побудована прикладна математична модель дослідження стійкості оболонок, що заснована на розділенні циліндричної оболонки по товщині концентричними поверхнями на ряд складових циліндричних оболонок. Вона дозволяє розглядати товсті оболонки великої кривизни з урахуванням змінності кривизни по товщині оболонки. Розрахунок таких конструкцій без урахування обтиснення може бути некоректним.

Література

- Ворович И.И. Некоторые результаты и проблемы асимптотической теории пластин и оболочек //Материалы I Всесоюзной школы по теории и численным методам расчета оболочек и пластин. –Тбилиси: Изд-во Тбилис.ун-та 1975. –С.51-149.
- Григолюк Э.И., Коган Ф.А. Современное состояние теории многослойных оболочек // Прикл. механика.–1972. 8, N6.–С.3–17.
- Григоренко Я.М., Влайков Г.Г., Григоренко А.Я. Численно-аналитическое решение задач механики оболочек на основе различных моделей. –Киев:Академпериодика, 2006. –472с.
- Гузь А.Н., Чернышенко И.С. Шнеренко К.И. Концентрация напряжений около отверстий в оболочках из композитных материалов // Прикладная механика.– 2001.–37,N2 с. 3–43.
- Марчук А.В., Пискунов В.Г. Статика, колебания и устойчивость композитных панелей с пологим искривлением пологих слоев. 2. Устойчивость // Механика композитных материалов.– 1999.–Т35,N5.– С.643–652.
- Немиш Ю.Н., Хома И.Ю. Напряженно-деформированное состояние нетонких оболочек и пластин. Трехмерная теория (обзор) // Прикладная механика.– 1991.–27,N11 с. 3–26.
- Пискунов В.Г., Рассказов А.0. Развитие теории слоистых пластин и оболочек // Прикладная механика.– 2001.–37,N2 с. 22–57.
- Сало В.А. Краевые задачи статики оболочек с отверстиями .–Х.:НТУ “Харьковский политехнический институт”,2003. –216 с.

УДК 621.7.044.2

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ШАРУВАТИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Мороз М.М., кандидат технічних наук

Постановка проблеми. Шаруваті металеві композиції знаходять широке застосування у виробництві великого класу деталей, елементів конструкції, машин і обладнання для підприємств нафтового, енергетичного, хімічного, транспортного машинобудування, а також у виробництві літальних апаратів, приладо- й кораблебудуванні, радіоелектроніці, інструментальній промисловості та ін. Шаруваті метали володіють підвищеною експлуатаційною надійністю, міцністю й стійкістю до ударних і знакозмінних навантажень, більш технологічні та економічні. Тому вдосконалення методів їх обробки та моделювання технологічних процесів важливе та актуальне. Серед методів отримання шаруватих металів та їх подальшого оброблення для виробництва деталей різної конфігурації находять широке застосування імпульсні методи оброблення: магнітоімпульсне та вибухове зварювання та штампування. Ці процеси мають практично необмежені можливості, не вимагають значних витрат на обладнання забезпечують найбільш високу міцність зчеплення шарів.

Для розрахунку процесу деформування шаруватих матеріалів, наприклад, листовим штампуванням необхідно оцінювати залишкову пластичність шаруватої заготівки. Це необхідно для з’ясування можливості реалізації подальшої операції формування [1] та одержання фізико-механічних характеристик матеріалів після навантаження. Високопродуктивним та ефективним процесом отримання шаруватих металевих композицій – є зварювання вибухом.

Матеріал і результати досліджень. Виготовлення шаруватої заготівки зварювання вибухом супроводжується немонотонним деформуванням. Напруження і деформації при переміщенні рухомої пластини при вибуховому навантаженні змінюють знак. У таких випадках має місце ефект Баушингера. Рухома пластина під дією тиску, що виникає при розповсюдженні детонаційної хвилі, зазначає подвійний згин. При зіткненні елементів пластин залежно від акустичної жорсткості в останніх виникають стискаючі та розтягуючи напруження.

При математичному моделюванні процес розглядається як двостадійний:

придбання початкової швидкості при проходженні ударної хвилі по пластині і вихід її на вільну поверхню;

подальше прискорення рухомої пластини під дією тиску продуктів детонації вибухової речовини.

Розрахунок напружень, деформацій та інших механічних характеристик здійснюємо за