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

допомогою сіткового методу. Використання у цьому випадку методу скінчених елементів неможливе. Елементи не узгоджуються з моделлю однорідних шарів. Розрив механічних характеристик призводить до необмеженого зростання нормальних напружень у міжшаруватій зоні. Кожну з пластин покриваємо лагражевою сіткою $X_1^1X_2^1$ і $X_1^2X_2^2$, зв'язаною з серединною поверхнею. Використовуємо "вузлову схему". Вузлова точка розрахункової сітки кожного фізичного елемента є точкою приведення відповідної маси, у якій визначаються всі шукані величини. Масові крапки з'єднуються невагомими розтяжними прямими відрізками.

Кожну пластину розбиваємо на підшари. Ці шари розташовані на однаковій відстані один від одного, працюють при плоскому напруженому стані і розділені абсолютно жорстким матеріалом. Матеріали пластин вважаємо ізотропними пружно-пластичними зі зміщенням, величина якого залежить від координати по осі симетрії пластини.

Прискорення вузлів сітки серединної поверхні, швидкості і переміщення визначаємо з рівнянь для кожного mn–го вузла пластини. Для рухомої пластини рівняння мають вигляд :

$$\begin{aligned}
&\nabla_\gamma M_{mn}^{\gamma\alpha} - Q_{mn}^{\gamma} R_{\gamma mn}^{\alpha} + P_{mn}^{\alpha} = \rho \ddot{w}_{mn}^{\alpha} \\
&M_{mn}^{\gamma\alpha} R_{\gamma\alpha}^{mn} + \nabla_\gamma Q_\gamma^{mn} + P_{mn}^{3} = \rho^3 \ddot{w}_{mn}^{3} \\
&\nabla_\alpha L^{\alpha\gamma} - Q_{mn}^{\alpha} = 0,
\end{aligned} \tag{1}$$

де ∇ - знак коваріантного диференціювання; $M_{mn}^{\gamma\alpha}$ - мембранні сили, $L^{\alpha\gamma}$ - згинальні моменти; Q_{mn} - перерізуючи сили; ρ - приведена маса, $\ddot{w}_{mn}^{\alpha}$ - прискорення, P_{mn}^{α} - силовий вплив імпульсного навантаження, $R_{\varphi mn}^{\alpha}$ - тензор кривизни.

Рівняння для нерухомої пластини не мають перерізуючих сил та згинальних моментів, але доповнюються членами рівняння $\rho c\ \dot{w}_{mn}^{\alpha}$, ρ, c - густина і швидкість звуку в середовищі за нерухомою пластиною, $\dot{w}_{mn}^{\alpha}$ - швидкість пластини.

З перших двох рівнянь (1) визначаються компоненти прискорень $\ddot{w}_{mn}^{2}$ і $\ddot{w}_{mn}^{3}$ в усіх вузлах, а потім визначаємо положення вузлів в новий момент часу τ. Для цього використовуємо співвідношення:

$$\begin{aligned}
&w_{2,\tau+1} = w_{2,\tau}(\Delta t)^2 + 2w_{2,\tau} - w_{2,\tau-1}, \\
&w_{1,\tau+1} = w_{1,\tau}(\Delta t)^2 + 2w_{1,\tau} - w_{1,\tau-1},
\end{aligned} \tag{2}$$

де $\Delta\tau$ - величина кроку інтегрування.

Визначивши координати вузлів, розрахуємо величини деформацій по шарах пластини геометричні співвідношення, для переміщень та деформацій приймаємо у формі Тимошенка.

Після визначення деформацій переходимо до фізичної сторони задачі. Збільшення тензора деформацій розкладаємо на пружні і пластичні компоненти.

$$\Delta\varepsilon_{mn}^{\alpha\gamma} = \Delta\varepsilon_{mn}^{\alpha e} + \Delta\varepsilon_{mn}^{\alpha\gamma,\rho} \tag{3}$$

Для визначення тензора пружних деформацій використовуємо узагальнений закон Гука. Умову пластичності використовуємо у формі Мізеса-Генкі. Для плоского напруженого стану має вигляд:

$$s_{mn}^{T} = \sigma_{11}^{mn}\sigma_{22}^{mn} + 3\sigma_{12}^{mn}\sigma_{21}^{mn} + (\sigma_{11}^{mn})^2 + (\sigma_{22}^{mn})^2 - (\sigma_s^{\partial})^2 = 0, \tag{4}$$

де σ_{11}, σ_{22} – головні напруження, σ_s – означає як деформаційне, так і кінематичне зміцнення матеріалу кожної пластини.

Залежність між компонентами девіатора напружень $s_{mn}^{\alpha\gamma}$ і девіатора деформацій $s_{mn}^{\alpha\gamma}$ приймаємо у вигляді ускладненої моделі Г. Бакхауза [2]:

$$s_{mn}^{\alpha\gamma} = \frac{2}{3}\sigma_i(\varepsilon_i)\frac{\dot{\varepsilon}_{mn}}{\dot{\varepsilon}_i} - \frac{1}{3}\int_0^{\varepsilon_i}(1-\beta(\varepsilon_i))\sigma_i(\varepsilon_i)$$
$$\varphi\left(\varepsilon_i - \varepsilon_i^0\right)\frac{d^2\varepsilon_{mn}}{d\varepsilon_i^2}(\varepsilon_i)d\varepsilon_i, \quad (5)$$

де σ_i – інтенсивність напружень; ε_{mn} – компоненти швидкостей деформацій; ε_i – інтенсивність швидкостей деформацій.

Після визначення напружень у кожному вузлі і шарі пластини розраховуємо мембранні, перерізуючи сили та згинальні моменти. Для цього проводиться інтегрування по товщині пластини.

Для дослідження деформованого стану за товщиною зварених вибухом заготовок нині використовується метод координатної сітки, метод “вставок” і металографічний метод. Останній заснований на вивченні взаємного зміщення окремих зерен мікроструктури деформованого металу.

Перераховані вище методи визначення деформованого стану мають деякі недоліки. Метод координатної сітки вимагає високого класу точності й чистоти оброблення поверхонь, забезпечуючих між ними нульовий зазор для збереження ділильної сітки при вибуховому плакуванні.

Метод вставок дозволяє визначити напрям і величину зсувних переміщень шарів металу, але не дає уявлення про величину пластичних деформацій, що реалізуються в приконтактних шарах. Тому перераховані методи придатні для дослідження зсувної деформації лише в зоні, розташованій на деякій відстані від лінії з’єднання, деформація в котрій має однорідний характер.

Методик дослідження напружно-деформованого стану в приповерхневих шарах пластин, що співударяються, нині немає. У цьому плані, ймовірно, найбільш перспективними є застосування методу визначення напружено-деформованого стану з розподіленням твердості, котрий заснований на думці про те, що між твердістю деформованого металу та інтенсивністю напруженого стану існує однозначна функціональна залежність. Метод з успіхом можна застосувати для знаходження меж осередку деформації, якщо він займає лише частину об’єму деформованого тіла, а також визначення ліній різного рівня інтенсивностей деформації (ε_i) та напружень (σ_i) по всьому об’єму тіла.

При тому, що у кожному підшарі ступінь зміцнення різний. Тобто в сфері пластичних деформацій залежності ε_i (ε_i) у кожному підшарі мають свої параметри. Це пов’язане з тим, що в результаті технологічного циклу отримання біметалу має місце неоднорідність структурного, механічного та геометричного характеру. При моделюванні процесу імпульсного деформування шаруватих заготовок деформований шар металу умовно поділяють на три характерні зони:

Зона інтенсивної деформації поверхневих шарів пластин, що співударяються. Пластична деформація в цій зоні й взаємодії між вихідними елементами композиції.

Зона деформації поверхневих шарів пластин, що співударяються. При хвилеподібному профілі лінії з’єднання її характерною особливістю є неоднорідність пластичної деформації в шарах, паралельних зоні зварного шва.

Зона деформації по всій глибині зварених заготовок, характерною особливістю якої є однорідністю деформації металу в шарах, паралельних зоні зварного шва

В даному випадку вибухове навантаження кожного вузла пластини є відома функція часу і координат.

Рішення систем рівнянь динамічної поведінки рухомої та нерухомої пластин здійснюється методом прямої прогонки.

Проводився розрахунок напружено-деформованого стану прямокутних пластин розмірами 0,5×1,5 м^3 сталей Ст3 товщиною 0,08м та 0,8Х18Н10Т товщиною 0,03 м. Рухомою була пластина з легованої сталі. Крок інтегрування за часом $\Delta\tau$=1,76·10^{-6}С. Маса вибухівки дорівнювала масі рухомої (плакуючої) пластини. Швидкість детонації дорівнювала 2000-2200 мс$^{-1}$. Дані розрахунків на кінцевій стадії процесу зварювання наведені у таблиці 1.

Експериментальна перевірка результатів чисельних розрахунків, виконаних з використанням ПЕОМ за розробленим пакетом програм моделювання динамічної поведінки пластин при зварюванні вибухом, дуже складна задача.

Була зроблена спроба оцінити напружений стан за розподілом твердості у деформованих пластинах за методикою Г.Д.Деля і В.А.Огородникова [3]. Для нерухомої пластини (Ст.3) приймався тарувальний графік, побудований в умовах динамічного стискання. Для рухомої (08Х18Н10Т) – динамічного згину, стискання та розтягання.

Таблиця 1

Результати розрахунків на кінцевій стадії процесу зварювання

Відстань від зони з'єднання (мм)	Матеріал	Інтенсивність напруги (чисельний аналіз) МПа	Твердість HV	Інтенсивність напруги методика σ_i=f(HV) (МПа)
0	Ст3	410	460	1020
0,25	Ст3	410	440	1010
0,5	Ст3	410	350	980
0,75	Ст3	410	260	800
1,0	Ст3	560	180	590
1,5	Ст3	560	160	540
2,0	Ст3	560	160	540
0	08Х18Н10Т	1090	460	1120
0,25	08Х18Н10Т	1090	455	1120
0,5	08Х18Н10Т	1090	375	1090
0,75	08Х18Н10Т	1090	374	1090
1,0	08Х18Н10Т	1060	330	1080
1,25	08Х18Н10Т	1060	320	1056
1,5	08Х18Н10Т	1060	320	1056
Початкова твердість	Ст3 08Х18Н10Т		120 180	

Вимір твердості виконувався через 0,5 мм у поперечному перерізі, починаючи із зони з'єднання. Значення HV подані у таблиці 1. Порівняння цих значень інтенсивності напружень, визначених чисельно та знайдених із графіка σ_i = f(HV) свідчать про достовірність отриманих результатів, та досконалість методик [3,4]. Розбіжність результатів пов'язана з особливостями механіко-математичної моделі, для якої напруження розраховуються та усереднюються у межах шарів кожної пластини. Слід додати, що в умовах зварювання вибухом швидке зростання твердості в місці зварювання не є результатом специфічного зміцнення, а пов'язано з процесами деформації. Це тому, що при швидкості детонацій тиск Д=2000÷2500 м/с не перевищує 400-600 МПа. Але подвійний згин рухомої пластини дає змогу для виникнення деякого наклепування.

Висновок. Таким чином, метод визначення напружень за розподілом твердості може бути надійним додатком для розрахунків процесів пластичного деформування особливо в умовах, де важко експериментувати.

УДК 691.2: 502.2

ІНДЕКСИ РОЗВИТКУ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Олійник Р.В., кандидат фізико-математичних наук
Зюзюн В.І.
Ковальова О.В.

Вступ. Дослідження загальних тенденцій та характеру змін надзвичайних ситуацій природного характеру в Україні та прогнозування ризиків, пов'язаних з ними, - важливий інструмент для своєчасного реагування та пошуку оптимальних форм управління екологічною безпекою країни. Створення математичних моделей прогнозування загальних тенденцій та характеру змін надзвичайних ситуацій стає нагальною потребою сьогодення, оскільки відсутній банк надійних статистичних даних та єдиний методологічний апарат, щодо оцінки наслідків від стихійних лих [1]. Серед численних математичних методів, придатних до розв'язання даної проблеми, найбільш ефективним виявився метод запропонований В.Д.Фурасовим [2,3]. Побудова динамічних моделей в умовах обмеженої реально доступної статистичної інформації полягає в побудові множини рівнянь, які сумісні з числовими послідовностями, отриманими в результаті спостережень за розвитком екологічних систем. Це дає можливість дійти до науково обґрунтованих висновків щодо змін загального характеру та тенденцій надзвичайних ситуацій природного походження.