

УДК 621.7.044.2

В. В. Драгобецький, к. т. н., доц.

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ШАРУВАТИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ІМПУЛЬСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Шаруваті металеві композиції знаходять широке застосування у виробництві на підприємствах нафтового, енергетичного, хімічного, транспортного машинобудування, а також у виробництві літальних апаратів, приладо- й кораблебудуванні, радіоелектроніці, інструментальній промисловості та ін. Шаруваті метали мають підвищену надійність, міцність й стійкість до ударних і знакозмінних навантажень, вони технологічніші та економічніші. Тому вдосконалення методів їх оброблення та моделювання технологічних процесів важливе та актуальне. Серед методів отримання шаруватих металів та їх подальшого оброблення для виробництва деталей різної конфігурації наводяться широке застосування імпульсні методи оброблення: магнітоімпульсне та вибухове зварювання та штампування. Ці процеси мають практично необмежені можливості, не вимагають значних витрат на обладнання, забезпечують найвищу міцність зчеплення шарів.

Для розрахунку процесу деформування шаруватих матеріалів, наприклад, листовим штампуванням необхідно оцінювати залишкову пластичність шаруватої заготовки. 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.

Виготовлення шаруватої заготовки зварюванням вибухом супроводжується немонотонним деформуванням. Напруження і деформації під час переміщення рухомої пластини у разі вибухового навантаження змінюють знак. У таких випадках має місце ефект Баушингера. Рухома пластина під дією тиску, що виникає під час розповсюдження детонаційної хвилі, зазнає пластичного згину. Під час зіткнення елементів пластин, залежно від акустичної жорсткості, в останніх виникають стискальні та розтягувальні напруження.

У математичному моделюванні процес розглядається як двостадійний:

- 1) придбання початкової швидкості під час проходження ударної хвилі по пластині і вихід її на вільну поверхню;
- 2) 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, оскільки елементи не узгоджуються з моделлю однорідних шарів. Розрив механічних характеристик призводить до необмеженого зростання нормальних напружень у міжшаровій зоні.

Кожну з пластин покриваємо лагранжевою сіткою $X_1^1 X_2^1$ і $X_1^2 X_2^2$, 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 точки з'єднуються невагомими розтяжними прямими стрижнями.

Кожну пластину розбиваємо на підшари. Ці шари розташовані на однаковій відстані один від одного, працюють у 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 m -го вузла пластини. Для рухомої пластини рівняння мають вигляд

$$\nabla_\gamma M_{mn}^{\gamma\alpha} \cdot Q_{mn}^\gamma R_{\gamma mn}^\alpha + P_{mn}^\alpha = \rho \ddot{w}_{mn}^\alpha;$$

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

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

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

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

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

де Δt — 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.

$$\Delta \epsilon_{mn}^{\alpha\gamma} = \Delta \epsilon_{mn}^{\alpha e} + \Delta \epsilon_{mn}^{\alpha\gamma, p}.$$

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

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

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 $\epsilon_{mn}^{\alpha\gamma}$ приймаємо у вигляді ускладненої моделі Г. Бакхауза [2]

$$\begin{aligned} s_{mn}^{\alpha\gamma} &= \frac{2}{3} \sigma_i(\epsilon_i) \frac{\dot{\epsilon}_{mn}}{\dot{\epsilon}_i} - \frac{1}{3} \int_0^{\epsilon_i} (1 - \beta(\epsilon_j)) \sigma_j(\epsilon_j); \\ \phi(\epsilon_j - \epsilon_j^0) &= \frac{d^2 \epsilon_{mn}}{d\epsilon_j^2}(\epsilon_j) d\epsilon_j, \end{aligned} \quad (5)$$

де σ_i — інтенсивність напружень; $\dot{\epsilon}_{mn}$ — компоненти швидкостей деформацій, $\dot{\epsilon}_i$ — інтенсивність швидкостей деформацій.

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

Для дослідження деформованого стану по товщині 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, що забезпечують між ними нульовий зазор для збереження ділильної сітки під час вибухового плакування.

Метод вставок дозволяє визначити напрям і величину зсувних переміщень шарів металу, але не дає уявлення про величину пластичних деформацій, що реалізуються в приконттактних шарах. То-

му перераховані методи придатні для дослідження зсувної деформації лише в зоні, розташованій на деякій відстані від лінії з'єднання, деформація в якій має однорідний характер.

Методик дослідження напружено-деформованого стану в приповерхневих шарах пластин, що співударяються, нині немає. У цьому плані, ймовірно, найперспективнішим є застосування методу визначення напружено-деформованого стану за розподіленням твердості, який ґрунтується на гіпотезі, що між твердістю деформованого металу та інтенсивністю напружень існує однозначна функціональна залежність. Метод з успіхом можна застосувати для знаходження меж осередку пластичної деформації, якщо він займає лише частину об'єму деформованого тіла, а також для визначення ліній різного рівня інтенсивностей деформації (ε_j) та напружень (σ_j) по всьому об'єму тіла

При тому у кожному підшарі ступінь зміцнення різний. Тобто в сфері пластичних деформацій залежності $\sigma_j(\varepsilon_j)$ у кожному підшарі має свої параметри. Це пов'язано з тим, що в результаті технологічного циклу отримання біметалу має місце неоднорідність структурного, механічного та геометричного характеру. Моделюючи процес імпульсного деформування шаруватих заготовок, деформований шар металу умовно поділяють на три характерні зони:

1. Зона інтенсивної деформації поверхневих шарів пластин, що співударяються. Пластична деформація в цій зоні сприяє взаємодії між вихідними елементами композиції.
2. 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.
3. Зона деформації по всій глибині зварених заготовок, характерною особливістю якої є однорідність деформації металу в шарах, паралельних зоні зварного шва.

В даному випадку вибухове навантаження кожного вузла пластини є відомою функцією часу і координат.

Розв'язок систем рівнянь динамічної поведінки рухомої та нерухомої пластин здійснюється методом прямої прогонки.

Проводився розрахунок напружено-деформованого стану прямокутних пластин розмірами $0,5 \times 1,5 \text{ м}^3$ сталей Ст3 товщиною 0,08 м та 0,8X18H10T товщиною 0,03 м. Рухомою була пластина з легованої сталі. Крок інтегрування за часом $\Delta t = 1,76 \cdot 10^{-6}$ с. Маса вибухівки дорівнювала масі рухомої (плакуючої) пластини. Швидкість детонації дорівнювала $2000 \dots 2200 \text{ мс}^{-1}$. Дані розрахунків на остаточній стадії процесу зварювання показані у таблиці.

Відстань від зони з'єднання (мм)	Матеріал	Інтенсивність напружень (чисельний аналіз) МПа	Твердість HV	Інтенсивність напружень методика $\sigma_j = f(HV)$, 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	08X18H10T	1090	460	1120
0,25	08X18H10T	1090	455	1120

Відстань від зони з'єднання (мм)	Матеріал	Інтенсивність напружень (чисельний аналіз) МПа	Твердість HV	Інтенсивність напружень методика $\sigma_i = f(HV)$, МПа
0,5	08X18H10T	1090	375	1090
0,75	08X18H10T	1090	374	1090
1,0	08X18H10Г	1060	330	1080
1,25	08X18H10T	1060	320	1056
1,5	08X18H10T	1060	320	1056
Початкова твердість	Ст3 08X18H10T		120 180	

Експериментальна перевірка результатів розрахунків, виконаних з використанням ПЕОМ за зробленим пакетом програм моделювання динамічної поведінки пластин під час зварювання 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 нерухої пластини (Ст.3) приймался тарувальний графік, побудований в умовах динамічного стискання. Для рухої пластини (08X18H10T) — динамічного згину, стискання та розтягування. Вимірювання твердості виконувалося через 0,5 мм у поперечному перерізі, починаючи із зони з'єднання. Значення HV подані у таблиці. Порівняння значень інтенсивності напружень, визначених чисельно та знайдених із графіка $\sigma_i = f(HV)$, 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. Зі швидкістю детонацій $D = 2000...2500$ м/с тиск не перевищує 400...600 МПа. Але подвійний згин рухої пластини сприяє виникненню деякого наклепування.

Таким чином, метод визначення напружень за розподілом твердості може бути надійним доповненням для розрахунків процесів пластичного деформування, особливо в умовах, коли важко проводити експерименти.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Огородников В. А., Сивак І. О., Сивак Р. І. Моделювання процесів немонотонної пластичної деформації // Матеріали п'ятої міжнародної науково-технічної конференції. «Контроль та управління в складних системах» — Том 1. — Вінниця: вид-во ВДТУ, 1999. — С. 195—197.
2. Огородников В. А., Нахайчук О. В., Мазуренко А. Л. Оценка деформируемости при вдавливании клина в полосу конечной толщины // Проблемы трибологии. Хмельницкий, 2000. — № 3. — С. 41—48.
3. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. — М: Машиностроение, 1971. — 200 с.
4. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении: Учеб. пособие / В. А. Огородников. — К: УМК ВО, 1989. — 152 с.

Рекомендована кафедрою технології та автоматизації машинобудування

Надійшла до редакції 15.02.03
Рекомендована до друку 24.03.03

Драгобецький Володимир В'ячеславович — доцент кафедри технології машинобудування.
Кременчуцький державний політехнічний університет