УДК 621.7.044

В.К. БОРИСЕВИЧ, докт.техн.наук
І.Ю. МАТЮШЕНКО, канд.техн.наук
О.М. АНДРІЄНКО, канд.техн.наук

РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХПРОЦЕСІВ ІМПУЛЬСНОГО ШТАМПУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ З ЛИСТА З УПРАВЛІННЯМ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИМ СТАНОМ

Дослідження, розробка та освоєння у виробництві нових технологій в різних галузях машинобудування виявили ефективність процесів вибухового штампування деталей з листа, в тому числі складної форми, великих габаритів та з високоміцних матеріалів. Однак існує чимало сплавів, наприклад, титанових, обробка яких в холодному стані викликає великі труднощі, а іноді просто неможлива. Тому виникла необхідність у створенні технологічних процесів імпульсного штампування деталей з високоміцних малопластичних сплавів з управлінням напружено-деформованим станом. Внаслідок багатопараметричності таких процесів виникла потреба у розробці математичної моделі, яка б дозволила автоматизувати проектування оптимальних процесів. По-перше,це дозволить для існуючих технологій підвищити їх коефіцієнт корисної дії, покращити технологічні параметри, що приведе до економії ресурсів та зниження витрат на виробництво. По-друге, дозволить освоїти більш складні техпроцеси для широкої номенклатури деталей, знизити трудомісткість виготовлення та витрати на їх проектування.

Найбільш прийнятною схемою зовнішнього впливу для зазначених процесів виявилося поєднання попереднього нагріву заготовки та подальше штампування деталей за допомогою метання передавального середовища. Розглянуті можливі схеми пристроїв та обладнання, яке реалізує ці схеми. Особлива увага приділяється можливості забезпечення заданого температурного поля по площині заготовок,яке дозволяє отримати необхідні пластичні властивості деформуємого метала. Розглянута можливість використання різних передавальних середовищ та енергоносіїв для нагріву та деформування заготовок. Розглянуте питання впливу характеру прикладеного зовнішнього навантаження для різних кордонних умов на деформований стан нагрітих заготовок.

При зростанні складності деталей, підвищенні їх вартості, необхідності скорочення терміну, вартості освоєння та підвищенні рен-

тобільності процесів імпульсного штампування емпіричні дослідження стають недоцільними. Тому створення надійних алгоритмів для вирішення задач високошвидкісного деформування за допомогою чисельного моделювання дозволить визначити оптимальний характер процесу деформування та відповідні параметри імпульсного силового та температурного полів. Це такі параметри, як величина (або геометричні розміри), кількість та координати розташування зарядів вибухової речовини (ВР) та джерел теплового навантаження.

Розробка моделі багатокритеріальної багатопараметричної оптимізації параметрів технологічних процесів термоімпульсного штампування полягає в слідуючому. Сформульована загальна постановка оптимізаційної задачі у векторній формі, коли рішення повинне задовольнити ряду функціоналів стану заготовки в процесі деформування, зв'язаних між собою за допомогою обумовлених компромісів. Оптимізуємий функціонал проектується на вибраний або заданий напрямок у просторі декількох критеріїв. Тоді рішення в загальній постановці зводиться до визначення оптимального прикладеного до заготовки імпульсного силового J (P_{mnl}) та термічного t (T_{mnl}) навантаження, яке мінімізує функціонал Г. При цьому цільова функція виражається у вигляді квадратичного функціонала Гаусса:

$$\Gamma\left(P_{mnl},\ T_{mnl}\right) = \sum_{m=1}^{m=M}\sum_{n=1}^{n=N} \ae_N \left(\frac{N^{\zeta}_{mn}}{N^{*}_{\zeta}}\right)^{2} + \ae_{\dot{Y}} \left(\frac{\dot{Y}^{\zeta}_{mn}}{\dot{Y}^{*}_{\zeta}}\right)^{2}, \qquad (1)$$

де N^{ζ}_{mn} – довжина нормалі, відновленої в mn-ому вузлі заготовки на ζ-ому кроці ітерації;

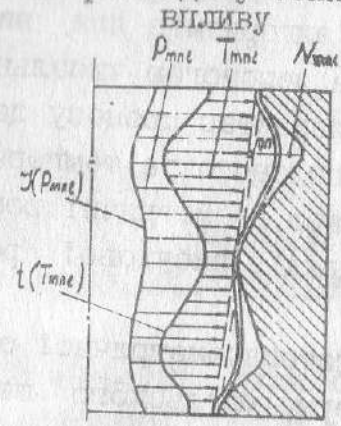
$\dot{Y}^{\zeta}_{mn}$ – швидкість підходу mn-го вузла до поверхні матриці;

$N^{*}_{\zeta}, \dot{Y}^{*}_{\zeta}$ – середні значення зазору між заготовкою та матрицею та швидкості підходу заготовки до матриці.

Тут $\ae_N + \ae_{\dot{Y}} = 1$. Але для спрощення вирішення задачі оптимізації та скорочення машинного часу приймають для цільової функції $\ae_N = 1$, $\ae_{\dot{Y}} = 0$ без істотного зниження точності розрахункових оптимальних параметрів.

На малюнку 1 наведений розподіл температурного та силового впливу на заготовці при наявності залишкових угинів.

Схема розподілу зовнішнього впливу



Мал.1

В роботі проаналізовані різні методи вирішення оптимізаційних задач та вибраний чисельний метод, як найбільш відповідний теоретичному моделюванню. Приведено порівняння методу градієнтів другого порядку, використуючого другі похідні, та методів пошуку, які не потребують обчислення похідних, зокрема, метод деформуємого многогранника.

Для мінімізації функціонала (1) на сім'ї функцій управління P_{mnl} та T_{mnl} вибирається початковий многогранник, як правило, у вигляді регулярного симплексу з початком координат у центрі ваги. Після цього виконується процедура пошуку такої вершини, в якій величина недоштампування має найменше значення. Одержане основне співвідношення для організації ітераційних процедур для досліджуваного методу:

$$Y^{\alpha i v}_{j\zeta} = Y^{\alpha i x}_{j\zeta} + \varphi_q \left(Y^{\alpha i w}_{j\zeta} - Y^{\alpha i z}_{j\zeta} \right), \qquad (2)$$

(по v,x,w,z –підсумування немає),

де $v = O,P,S,K$; $x = C,\theta$; $w = C,O,H,K$; $z = H,C,\theta$;

φ_q - константа операції; $q = 1,\ldots 4$;

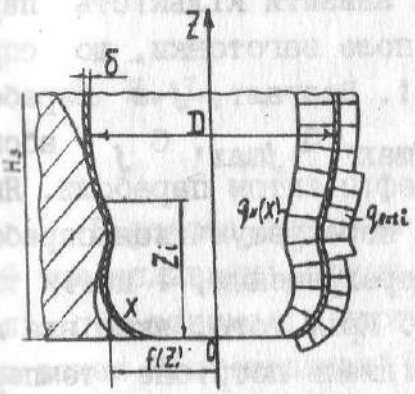
O, P, S–точки відбиття, розтягання та стиснення відповідно.

Внутрішнім циклом при вирішенні задачі оптимізації в наданій постановці виявляється визначення температурних полів, зовнішніх силових полів, динамічного поводження та напружено-деформованого стану деталі при заданих початкових або синтезованих в процесі оптимізації значеннях енергетичних та геометричних параметрів технологічного процесу.

Для визначення характеру впливу наданого температурного поля на розподіл міцнісних та деформаційних властивостей штампованої заготовки розглянута задача нестаціонарної теплопровідності при диференційному нагріві з врахуванням тепловіддачі в матрицю та навколишнє середовище. Задача виявляється осесиметричною з точки зору теплового впливу, заданий розподіл теплового потоку від нагрівача $q_н(x)$ та тепловіддачі в навколишнє середовище $q_{ext\,i}$, до того ж формування i-тих ділянниць робиться відповідно з умовами зовнішнього теплообміну. Виріб припускається термічно тонким, не-

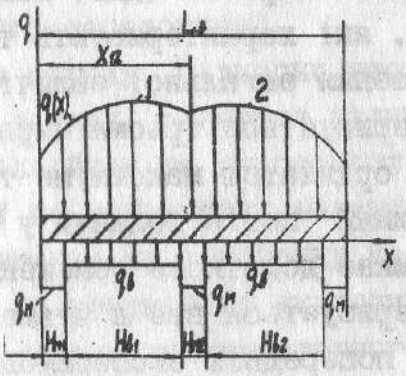
мов переносу тепла в окружному напрямку, коефіцієнт тепловіддачі в повітря постійний в процесі нагріву, відсутня тепловіддача з торців заготовки. На мал.2 приведена схема розрахунку температурного поля заготовки в загальному випадку, а на мал.3 -розподіл теплового навантаження у вигляді перехрещуючихся парабол, істотно спрощуючих оптимізаційну задачу.

Схема розрахунку температурного поля в загальному вигляді



Мал.2

Розподіл теплового навантаження у вигляді перехрещуючихся парабол



Мал.3

Крайова задача теплопровідності в одномірній нестаціонарній постановці має вигляд:

$$\frac{\partial T_i(x,\tau)}{\partial \tau} = a\,\frac{\partial^2 T_i(x,\tau)}{\partial x^2} + \frac{a}{\lambda\delta}\,(q_H(x) - q_{ext_i}) \quad , \qquad (3)$$

де $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ - коефіцієнт температуропровідності матеріалу;

λ, c, ρ - коефіцієнт теплопровідності, питома тепломісткість, щільність матеріала заготовки.

Рішення рівняння (3) повинно задовольняти крайовим умовам:

$$T_i(x,0) = T_0, \quad i = 1,\ldots,N ;$$

$$\left.\frac{\partial T_1}{\partial x}\right|_{x=0} = \left.\frac{\partial T_N}{\partial x}\right|_{x=H_3} = 0 ; \qquad (4)$$

$$T_i\Big|_{x=H_i} = T_{i+1}\Big|_{x=H_i} ; \quad \left.\frac{\partial T_i}{\partial x}\right|_{x=H_i} = \left.\frac{\partial T_{i+1}}{\partial x}\right|_{x=H_i}$$

$$H_i = \int_0^{z_i} \sqrt{1+(f')^2}\,dz \; ; \quad i = 1,\ldots,N-1 \; ,$$

де H_3 - висота заготовки; H_i - висота зон контакту.

В роботі приведені залежності для визначення величини q_{exti} при контакті заготовки з матрицею (тепловіддача в метал) та з по-

вітряною порожниною (складний теплообмін):

$$q_{ext_i} = \begin{cases} q_{B_i} = \alpha \cdot (T_i - T_0) ; \\ q_{M_i} = \dfrac{2}{\sqrt{3}} \dfrac{\lambda_M}{\delta \sqrt{F_{OM}}} (T_i - T_0) \end{cases} . \qquad (5)$$

де λ_M , F_{OM} – коефіцієнт теплопровідності та число Фур'є для матеріала матриці.

Подання підведеного теплового потока $q_H(x)$ у вигляді перехрещуючихся парабол (див. мал.3) дозволяє знизити кількість параметрів, які характеризують температурне поле заготовки, що спрощує рішення загальної задачі оптимізації. Взагалі, j-а парабола характеризується трьома параметрами: X_{jmax}, Q_{jmax}, C_j – абсцисою та ординатою максимума та вільним коефіцієнтом параболи. Якщо підводимий потік поданий у вигляді двох перехрещуючихся парабол, то виникає додаткове обмеження в місці перехрещення, і потік тоді характеризується вже п'ятьма параметрами. Крім того, якщо вже відомо з попередніх експериментальних досліджень потрібне температурне поле заготовки, то використуючи зв'язок між інтегральною характеристикою поля та зовнішнім тепловим навантаженням, одержуємо ще одне обмеження на вибір характерних коефіцієнтів парабол. В цьому випадку задача зводиться до чотирьохпараметричної. В роботі наведені рекомендації по вибору обмежень параметрів задачі оптимізації для вже дослідженої та нової номенклатури деталей.

Рішення крайової задачі (3) – (4) проводилося в безрозмірному вигляді за допомогою чисельного методу кінцевих різностей. Надані рекомендації по вибору координатно-часової сітки при заданих умовах задачі.

При вирішенні задачі оптимізації імпульсне силове навантаження виявляється однією з функцій управління. Тому розробка методики розрахунку зовнішнього навантаження при штампуванні за схемою радіального метання передавального середовища є важливою задачею дослідження. В основу розрахунків покладена добре зарекомендована методика визначення взаємодії силового навантаження з заготовкою при підводному вибусі. Силове навантаження в загальному випадку характеризується такими параметрами, як кількість, величина зарядів ВР, та координати їх розташування по відношенню до заготовки. Використуючи одержані експоненціальні залежності величини максимального тиснення та сталої згасання у фронті ударної хвилі від наданих параметрів для оболонкових деталей, а також до-

олідні дані для процесів імпульсного штампування метанням у разових басейнах, одержимо залежності для розрахунку силового навантаження:

$$P(\bar{G},\bar{H},\bar{L},\tau) = P_m(\bar{G},\bar{H},\bar{L}) * k_p(\bar{G},\bar{H},\bar{L}) * \exp(-\tau/(\theta(\bar{G},\bar{H},\bar{L}) * k_\theta(\bar{G},\bar{H},\bar{L}))), \quad (6)$$

де $P_m(\bar{G},\bar{H},\bar{L})$, $\theta(\bar{G},\bar{H},\bar{L})$ – максимальне тиснення та стала згасання для підводного вибуху;

$k_p(\bar{G},\bar{H},\bar{L})$, $k_\theta(\bar{G},\bar{H},\bar{L})$ – коефіцієнти перерахунку для штампування за схемою радіального метання передавального середовища;

$\bar{G}$, $\bar{H}$, $\bar{L}$ – величина заряду, відносна висота розташування заряда, відносна величина зазору між басейном та заготовкою .

В роботі наведені рекомендації по розрахунку величини P_m та θ при впливанні імпульсного навантаження на заготовку не по нормалі, при взаємодії системи зарядів, по розрахунку указаних величин в зонах "затінювання" для широкого діапазона характерного співвідношення відстані від заряду до заготовки до радіусу заряда.

При відомому розподілу імпульсного силового та термічного навантажень по поверхні заготовки при заданому сполученні характерних параметрів оптимізаційної задачі визначено динамічну поведінку штампованої заготовки. В кінцево-різнісній моделі динамічного розрахунку вибирається інерційна система координат $Y^j (j = 1,2,3)$, в якій задається положення заготовки, якщо моделюється перший перехід, або напівфабриката, якщо моделюється подальші переходи вибухового штампування. З середньою поверхнею заготовки зв'язується система лагранжевих координат $X^\alpha (\alpha = 1,2)$. При цьому використовується вузлова схема, в якій усі шукані величини визначаються у вузлових точках розрахункової сітки. В процесі імпульсного деформування заготовки припускається виконання першої частини гіпотез Кірхгофа-Лява.

Записані рівняння рівноваги та моментів, а також рівняння руху для кожного m-ого вузла заготовки у випадку осесиметричного силового та термічного впливу з врахуванням фізичного закону $\sigma^{дин}_{a,m}(\varepsilon_m, \dot{\varepsilon}_m, T_m)$, який доповнює систему рівнянь деформованого стану. Фізичний закон визначається на кожному кроці для конкретного матеріалу з врахуванням деформаційного, кінематичного усталення та термічного розусталення та визнається відомою функцією.

Визначення деформацій по товщині заготовки проводиться по чотирьох прошарках, де сконцентрований матеріал і які роблять при плоскому напруженому стані.

Тензор приросту деформацій на кожному кроці інтегрування розкладається на пружну, пластичну та термічну компоненти. Тензор пружних деформацій зв'язаний з тензором напружень через узагальнений закон Гука, пластичні компоненти зв'язані з напруженнями через закон текучості, термічні компоненти пропорціональні коефіцієнтам теплового поширення. Функція текучості використується у формі Мізеса-Генкі.

Вирішення системи рівнянь деформованого стану з врахуванням фізичного закону ведеться за явною схемою з дотриманням обмежень на крок інтегрування по часу. Зміна товщини заготовки визначається з використанням закону збереження об'єму елементарної чарунки при умові нестиснення матеріалу. За допомогою розробленого алгоритму вектор напруження при пластичному деформуванні підтримується на поверхні текучості.

Наведені рекомендації по вибору просторово-часової сітки для конкретних деталей, враховується пружне та термічне розвантаження. На кожному кроці оцінюється можливість руйнування за допомогою діаграм межового стану, які одержані з умов двухосного розтягання.

Таким чином, розроблені модель імпульсного деформування з управлінням напружено-деформованим станом заготовки, а також модель багатокритеріальної багатопараметричної оптимізації параметрів процесу імпульсного штампування дозволять створити алгоритм розрахунку параметрів і надати рекомендації по проектуванню технологічних процесів імпульсного штампування деталей складної конфігурації, великих габаритів та з високоміцних листових матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баум Ф.А. Физика взрыва. - М.: Наука, 1975. - 704 с.
2. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. - М.:Мир, 1975. - 458 с.
3. Борисевич В.К.,И.Ю.Матюшенко и др. Расчет основных технологических параметров процесса импульсной штамповки крупногабаритных высокоточных листовых деталей двойной кривизны.- Кузнечно-штамповочное производство, 1996, № 4, с.5-9