УДК 621.77

Козирєв О.С., ст. викладач
Кагляк О.Д., канд. техн. наук, доцент
Ритіков Є.О., студент
Національний технічний університет України «КПІ ім. І.Сікорського»,
kozyriev.oleksii@lll.kpi.ua

ЗВОРОТНА ТЕПЛОВА ЗАДАЧА ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗГИНАННІ

Процеси формування за допомогою лазера – це процеси, в яких лазерний промінь використовується не для деформації матеріалу, а для зміни параметрів матеріалу бажаним чином для посилення деформації, викликаної іншими механізмами. Прикладами є лазерне свердління, формування, різання або механічна обробка металів. У цих процесах лазер використовується для локального нагрівання матеріалу, що зменшує межу текучості та покращує формувальність матеріалу.

Механізм температурного градієнта (МТГ) є найбільш поширеним механізмом лазерного згинання [1-4]. Завдяки швидкому нагріванню поверхні лазерним променем і повільній теплопровідності в навколишній матеріал листа (зазвичай для товстого листа), крутий температурний градієнт у матеріалі призводить до диференціального теплового розширення (різного для різних шарів) через товщину. Коли матеріал нагрівається, спочатку теплове розширення на нагрітій верхній поверхні більше, ніж на холодній нижній.

Зустрічний згин виникає через створений згинальний момент, що призводить до невеликої пластичної деформації розтягування на нагрітій поверхні. При тривалому нагріванні згинальний момент протидіє зустрічному вигину від лазерного променя, і механічні властивості матеріалу знижуються з підвищенням температури. Коли термічне напруження досягає залежної від температури межі текучості матеріалу (наприклад, для сталі межа текучості змінюється від 400 МПа за нормальних умов до 100 МПа при 1000 ˚С та до 50 МПа при 1500 ˚С) будь-яке додаткове теплове розширення перетворюється на пластичне стиснення, оскільки вільне розширення обмежується навколишнім матеріалом. Під час охолодження матеріал знову стискається у верхніх шарах, і, оскільки він був стиснутий, відбувається локальне вкорочення верхніх шарів листа, і розвивається кут вигину, який згинає зразок у напрямку до лазерного променя. Як правило, МТГ можна використовувати для згинання товстих листів по прямих лініях у напрямку до лазерного променя.

Напруження, що виникають, призводять до деформацій. Стійкість матеріалу до дії термопружних напружень характеризують максимальною величиною локального перегріву T_t,. При напруженому стані ізотропного матеріалу зв'язок між компонентами напружень і деформацій визначається узагальненим законом Гука. Для циліндричної системи координат зв'язок між деформаціями та напруженнями в цьому випадку описується такими рівняннями:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E_M}\left[\sigma_{rr} - \mu_P\left(\sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{zz}\right)\right] + \alpha_T T \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{E_M}\left[\sigma_{\varphi\varphi} - \mu_P\left(\sigma_{rr} + \sigma_{zz}\right)\right] + \alpha_T T \quad (2)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E_M}\left[\sigma_{zz} - \mu_P\left(\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}\right)\right] + \alpha_T T \quad (3)$$

де E_M - Модуль Юнга, μ_p - Коефіцієнт Пуассона, α_T - Коефіцієнт теплового розширення, σ_{ii} - Головні складові тензора напружень, $i = r, z, \varphi$.

Таким чином, задача про пластичну деформацію листового матеріалу в результаті нагрівання рухомим джерелом теплоти переходить в теплову задачу. При цьому, для більш-меньш товстих зразків досягаються невеликі значення числа Пекле $Pe = V / l$, тому теплову задачу можна розглядати, як для нерухомого джерела. Тоді рівняння теплопровідності в кінцево-різнісному вигляді матиме такий вид:

$$T_{i,j,k}^{S+1} = T_{i,j,k} + \frac{\lambda \cdot \Delta t}{c\rho}\left[T_{i-1,j,k} + T_{i+1,j,k} + T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} + T_{i,j,k-1} + T_{i,j,k+1} - 6T_{i,j,k}\right] \quad (4)$$

Теплове джерело вводиться в задачу у дискретній формі, такий підхід дозволяє розрахувати перетворення променів оптичною системою і знайти кількість енергії, яка потрапляє до кожного елементарного об‘єму на поверхні за проміжок часу, який дорівнює шагу апроксимації Δt.

Розрахунки за формулою (4) не вимагають вирішення системи лінійних рівнянь високого порядку і дозволяють швидко знайти параметри нагрівання, які можуть виступати вихідними параметрами моделі. Залишається власне побудувати модель, яку будемо шукати у вигляді поліному поки що невідомого ступеню. Поліном шукатимемо у вигляді:

$$y^{(m)} = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_i^{(2)} x_i^2 + \ldots + \sum b_i^{(m)} x_i^m + \ldots + \sum b_{i(k)j(l)} x_i^k x_j^l \quad (5)$$

Тут m-ступінь полінома, b-невідомі коефіцієнти полінома, всі ступені всіх факторів комбінуються між собою. Алгоритм побудови полінома наступний:

1. Методом найменших квадратів знаходяться коефіцієнти полінома. На першому етапі всі вони вважаються значимими, тобто суттєво впливають на вихідну величину. Для такого виду поліному розраховуємо оцінку максимальної правдоподібності

$$R_S = \frac{\sum (y_i - f_i)^2}{n - N_c}$$

В подальшому, нашою метою буде мінімізація R_S.

2. На другому етапі кожен зі складників перевіряється на значимість. Фактори або їх комбінації по одному видаляються з моделі і після кожного видалення розраховуються R_S. Якщо на черговому кроці він не зменшився, фактор повертають до моделі, і навпаки.

3. Третій етап полягає у спробі повернути раніше відкинуті фактори до моделі, також за допомогою R_S. Не дивлячись на неочевидність третього етапу, все ж стверджуємо його необхідність, яка була підтверджена практично

4. Отже, для ступеню поліному m знайдено його оптимальну форму за критерієм мінімізації R_S. Переходимо до наступного ступеню, $m+1$. Генеруємо модель та повторюємо етапи 1-3, після чого матимемо два конкуруючих значення R_S.

5. Якщо $R_S^{m+1} > R_S^m$, то остаточно приймаємо форму і ступінь поліному m, в іншому випадку збільшуємо ступінь на одиницю і повторюємо кроки 1-3.

Такий підхід дозволяє знайти зв’язок між параметрами, що визначають температурне поле, та деформаціями, причому у відносно простій формі полінома. Виділивши ті фактори що піддаються керуванню, можна вирішити зворотну задачу, коли за необхідними параметрами виробу (кут згину, максимальна/мінімальна температури, ЗТВ тощо) можна визначити діапазон технологічних параметрів обладнання, які забезпечують відповідні параметри виробу.

Список посилань

1. J. Magee, K.G. Watkins, W.M. Steen, Advances in laser forming, Journal of Laser Application 10 (1998) 235–246.

2. H. Frackiewicz, High-technology metal forming, Industrial Laser Review, October (1996) 15217.

3. M. Gremaud, J.D. Wagniere, A. Zryd, W. Kurz, Laser metal forming: process fundamentals, Surface Engineering 12 (3) (1996) 251–259.

4. Z. Hu, M. Labudovic, H. Wang, R. Kovacevic, Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning, International Journal of Machine Tools and Manufacture 41 (2001) 589–607

УДК 621.77

Козирєв О.С., ст. викладач
Кагляк О.Д., канд. техн. наук, доцент
Чухліб С.В., студент
Національний технічний університет України «КПІ ім. І.Сікорського»,
kozyriev.oleksii@lll.kpi.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗГИНАННІ

Використання лазерного випромінювання в процесах формування (згинання) з'явилося в кінці минулого століття і все ще певною мірою знаходиться в стадії розробки. Лазерний промінь робить придатною для промислового використання технологію формування, яке раніше доводилося виконувати вручну через недостатню відтворюваність або гнучкість використовуваного джерела тепла (наприклад, вирівнювання деформації шляхом нагрівання газовим пальником).

З постійним розвитком лазерів з більшою вихідною потужністю, дешевшими системами керування та вищою якістю променя, застосування лазерного випромінювання для обробки матеріалів стає все більш сприятливим. Систематичні дослідження процесів згинання за допомогою лазерного випромінювання розпочато в середині 1980-х років і дослідницька активність продовжує стабільно зростати. Лазерний промінь має гнучкість щодо параметрів обробки, яка майже така ж висока, як і електронний промінь, але без потреби у вакуумі. Енергію, що передається в зразок лазерним променем, можна дуже точно контролювати, якщо необхідно, за допомогою замкнутого циклу керування, що гарантує дуже високу відтворюваність. Розробка нових поколінь лазерів дозволила зробити нові процеси економічними . Високопотужні CO_2, діодні, волоконні та дискові лазери стали ефективними джерелами тепла для обробки більших деталей, тоді як підвищення якості променя дозволяє досягти дуже маленьких лазерних плям на поверхні деталі, а отже, дозволяє обробляти також і маленькі деталі.

Для процесів формування лазерним променем можуть бути використані декілька механізмів термічного формування. Їх можна згрупувати за рушійною силою, яка відповідає за розвиток деформації. Група механізмів, які можна назвати механізмами прямого термічного формування, складається з механізмів, які використовують локальне теплове розширення, якому перешкоджає певна внутрішня або зовнішня сила, і, отже, створює термічну напругу, яка сама по собі призводить до локальної пластичної деформації, якщо межу плинності матеріалу буде локально перевищено. Ці механізми [1]:

- механізм градієнта температури (МГТ);
- механізм точки залишкового напруження;
- обсадний механізм;
- механізм згинання.

Механізм градієнта температури [2] (МГТ) - це механізм термічного формування, який в основному використовується для згинання та формування листового металу. Принцип дії цього механізму показаний на рис.1.

Енергія лазерного променя локально поглинається верхньою поверхнею зразка. Це викликає градієнт температури по товщині зразка в зоні опромінення. Завдяки позитивному коефіцієнту теплового розширення більшості матеріалів теплове розширення в опроміненій області на верхній стороні листа більше, ніж розширення нижньої сторони. Різні розширення викликають згинання листа від лазерного променя (рис. 1 а), зустрічне