

УДК 621.762.4

### ПОСТАНОВКА ЗАГАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАСТИЧНОГО, ТЕРМІЧНОГО АБО ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ВИРОБІВ МЕТАЛУРГІЇ ТА ТРАНСПОРТУ

**Д. В. Мосьян**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Приведена постановка загальної задачі оптимального механічного, термічного або термомеханічного навантаження при обробці матеріалів із застосуванням методів, керуючих пластичним деформуванням. При описанні початкового та кінцевого стану заготовки враховані змінні параметри, що характеризують внутрішню структуру матеріалу. Функціонал стану заготовки включає й складові, які характеризують монокристалність структури матеріалу заготовки. Цільова функція наводиться у вигляді квадратичного функціонала Гауса. Приведено алгоритм розрахунку оптимального процесу пластичного деформування та принципи його пошуку та побудови.

**Ключові слова:** заготовка, алгоритм, функціонал, оптимізація, критерій, термомеханічне навантаження.

### ПОСТАНОВКА ОБЩЕГО ЗАДАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО, ТЕРМИЧЕСКОГО ИЛИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТАЛУРГИИ И ТРАНСПОРТА

**Д. В. Мосьян**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Приведена постановка общей задачи оптимального механического, термического или термомеханического нагружения при обработке материалов с использованием методов, управляющих пластическим деформированием. При описании начального и конечного состояния заготовки учтены переменные параметры, характеризующие внутреннюю структуру материала. Функціонал состояния заготовки включает и составляющие, характеризующие монокристалльность структуры материала заготовки. Целевая функция выражается в виде квадратичного функционала Гауса. Представлен алгоритм расчета оптимального процесса пластического деформирования и принципы его поиска и построения.

**Ключевые слова:** заготовка, алгоритм, функционал, оптимизация, критерий, термомеханическое нагружение.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** При виробництві виробів різноманітного призначення багато технологічних питань, що пов'язані з освоєнням або оптимізацією процесу, опрацьовуються на початку теоретично з використанням сучасних засобів моделювання та розрахунку. Оптимізаційні задачі, що вирішуються за допомогою математичних моделей конкретних технологічних процесів формозміни підрозділяють на якісно- й кількісно оптимізаційні [1–3]. Перша група моделей пов'язує між собою регульовані  $P_i^{(p)}$ , нерегульовані  $P_i^{(u)}$  ураховані визначальні параметри і параметри відгуку  $U_i$  процесу залежностями монотонного виду. Прикладом якісно-оптимізаційних задач в листовому штампуванні можуть служити залежності [4] для визначення оптимальної товщини мастильного шару, контуру оптимальної заготовки, оптимальної поверхні перетяжного ребра матриці й тиску притиску [5] і т.д. На підставі отриманих залежностей можна розрахувати конкретне значення параметрів процесу й дати якісну оцінку зв'язків.

Кількісно-оптимізаційні моделі дозволяють дати кількісні рекомендації щодо вибору параметрів  $P_i^{(p)}$  у зв'язку з рішенням деякої оптимізаційної задачі. Рішення кількісно-оптимізаційних задач широко представлено в роботах В.К. Борисевича, В.П. Сабелькіна, В.В. Третьяка та ін. [1, 6, 7]. Для отримання оптимального рішення використано метод градієнтів другого порядку. Рішення завдання визначено з умови мінімуму функціонала  $\Phi$ , що характеризує

відмінність між дійсним і необхідним значеннями енергетичного параметра в заданих точках. При формотворчих операціях деталей складної конфігурації, коли величина витяжки велика, визначальними факторами є: питомий імпульс  $I$  і питома енергія  $E$ . При калібрувальних операціях, коли деформаційні параметри незначні визначальним фактором є тиск на заготовку. Вирішенню оптимізаційної задачі в даному випадку передують завдання моделювання процесу імпульсного формоутворення, яка побудована на кінцево-різницевої апроксимації рівнянь механіки суцільних середовищ і критерію текучості Мізеса-Генки при розрахунку пластичної поведінки заготовки. Ця методика дозволяє моделювати і вирішувати комплекс якісних і кількісних оптимізаційних задач. Зокрема, вона знайшла застосування при визначенні оптимальних граничних умов на фланцевої частини заготовки [8, 9] й перетяжному ребрі матриці [5] у рамках гідродинамічної й узагальненої теорії тертя. Однак ці розробки обмежуються процесами гідровибухового штампування. Слід зауважити що ця модель в залежності від об'єкта й задачі оптимізації може бути як якісно-, так і кількісно-оптимізаційною.

Цікава методика вибору раціонального профілю деформуючого інструменту за критерієм мінімуму найбільшого поверхневого навантаження на ділянках контакту із заготовкою. Дослідження спрямовані на зниження ймовірності отримання неякісної продукції та збільшення терміну можливої експлуатації інструменту.

Наведений аналіз дозволяє констатувати факт про можливість опису різними математичними залежностями одних і тих же явищ, процесів і об'єктів. Це дає можливість для варіювання складністю розроблюваних моделей в залежності від тих цілей, для яких вони створюються. Це відкриває широкі перспективи в плані варіювання складністю розроблюваних моделей.

Більшість оптимізаційних технічних завдань зводиться до визначення екстремальних значень деяких параметрів відгуку й величин відповідних або визначальних параметрів. Методи пошуку екстремуму систематизовані в роботах [2].

Безліч завдань оптимізації технологічних процесів витяжки зводиться до умов оптимального розподілу обмеженого ресурсу деякого параметра. До цього класу можна віднести завдання по оптимальному розподілу деформаційних параметрів між переходами витяжки.

Мета роботи – визначення умов оптимального пластичного, термічного або термомеханічного навантаження при обробці заготовок для виробів металургії та транспорту.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** У статті надані підходи, що дозволяють визначити напружено-деформований стан із урахуванням керованого впливу на процес пружно-пластичного деформування.

Процеси обробки металів тиском спрямовані на покращання стану матеріалу в металургійному аспекті внаслідок роздроблення включень, зменшення розмірів зерна та отримання необхідної форми і розмірів заготовки, підвищення експлуатаційних характеристик штампованих деталей у результаті деформаційного наклепу зі зміною структури матеріалу і форми поверхні.

Накопичена енергія деформації при пластичній деформації матеріалів пов'язана з незворотними змінами кристалічної будови, які визначають властивості чутливі до зміни структури, абразивно-ударної стійкості, опору пластичної деформації, дифузійних констант, електричних і магнітних властивостей, релаксаційної здатності та покращання комплексу інших фізико-механічних і експлуатаційних характеристик.

Оптимальний фізико-механічний стан поверхневого шару деталі та її внутрішньої структури проявляється в конкретних умовах виконання технологічних операцій термообробки і пружно-пластичної деформації, найважливішими з яких є: вид термообробки, анізотропія властивостей, розмір зерна, схема напружено-деформованого стану, швидкість і градієнт деформації, монокристалність. Тому розвиток загальної теорії обробки матеріалів побудований на базі багаторівневої багатокритеріальної оптимізації, що охоплює комплекс процесів деформаційного зміцнення, калібрування, формозміни термообробки і плакування є актуальною науково-технічною проблемою.

У цьому дослідженні розглядають технології формозміни, калібрування, ущільнення, зміцнення і плакування. Постановка загального завдання оптимального механічного, термічного або

термомеханічного навантаження при обробці композиційних матеріалів з використанням керованих методів відбувається наступним чином.

Суцільна або дискретна заготовка (листова або об'ємна) описується поверхнею

$$y_3 = S(y_1, y_2, \mu_s, t), \quad (1)$$

де  $y_1, y_2, y_3$  – координати;  $t$  – час;  $\mu_s$  – змінні параметри, що характеризують внутрішню структуру.

Заготовка, що є деякою областю  $W$ , включає систему підобластей, обмежених системою замкнутих поверхонь  $S_i$ . У процесах імпульсної деформації при моделюванні у рамках чисельних методів зручно концентрувати загальну масу елементом заготовки у вузлах. Визначивши кінематику елементів заготовки, переходимо до визначення деформацій. За деформаціями визначають напруження в шарах заготовки.

Кінцевий деформований стан у процесах деформації при зміцненні, формозміні, ущільненні, калібруванні та плакуванні визначається виразом:

$$\Delta j = \Delta j(y_1, y_2, y_3, \mu_s).$$

Функціонал стану заготовки наведено у вигляді

$$\Phi_\varepsilon = \int_{(F)} [\varepsilon_p(y_i) - \varepsilon_a(y_i)]^2 dF, \quad (2)$$

$$\Phi_\kappa = \int_{(F)} [(L/d)_o - (L/d)_a]^2 dF, \quad (3)$$

$$L_D = \int_F (\Delta G_n(x_i) - \Delta G_p(x_i))^2 dF, \quad (4)$$

$$L_E = \int_F (E_n(x_i) - E_p(x_i))^2 dF, \quad (5)$$

$$L_Z = \int_F (Z_n(x_i) - Z_p(x_i))^2 dF, \quad (6)$$

$$L_T = \int_F (S(x_i) - D(x_i))^2 dF, \quad (6)$$

де  $\varepsilon_p, \varepsilon_a$  – рівномірне і реалізоване в конкретному технологічному процесі значення інтенсивності деформації;  $(L/d)_o, (L/d)_a$  – оптимальне і реалізоване в конкретному технологічному процесі значення монокристалності.  $\Delta G_n(x_i), \Delta G_p(x_i)$  – необхідне й реалізоване значення різностійкості деталі;  $E_n(x_i), E_p(x_i)$  – необхідне й реалізоване значення логарифмічних швидкостей деформацій;  $Z_n(x_i), Z_p(x_i)$  – необхідне й реалізоване значення пікових значень контактних напруг по координатних осях;  $S(x_i), D(x_i)$  – кінцева конфігурація відштампованої деталі та конфігурація і параметри деталі, установлені кресленням.

Оптимізація щодо рівномірності деформації зумовлена тим, що в цьому випадку при створенні деформацій в оброблюваному матеріалі, що дорівнюють або наближаються до рівномірних, за встановленими нині положеннями, забезпечується максимальна довговічність деталей (межа витривалості) при знакозмінних навантаженнях і зносостійкості, що характерно для ободів коліс і лопаток авіадвигунів. Крім того, при відповідній рівномірній деформації формується комірчаста структура. При такій структурі виробам із тугоплавких металів властива висока формостійкість у процесі експлуатації при

високих температурах, а виробам із важкодеформівних матеріалів і сталей для ободів коліс висока втомна міцність.

Розробка теоретично обґрунтованих комбінованих технологій, що включають імпульсну та статичну обробку тиском при оптимальних параметрах навантаження, дозволило істотно підвищити зносостійкість (у низці випадків у дев'ять разів) та ударну міцність (тріщиностійкість) виробів із твердих сплавів, високоміцних і зносостійких сталей. Найбільш ефективним є застосування цих виробів у гірничовидобувній, металургійній, оборонній промисловості та машинобудуванні для зміцнення деталей гірського устаткування, інструменту, бронезилетів і бронетехніці.

Традиційна технологія отримання виробів із металокерамічних твердих сплавів доповнена технологією імпульсного активування спікання і реакційної здатності компонент сплавів. Традиційно здійснюється ударно-хвильова обробка або порошку, або готового виробу. При імпульсно-статичній обробці заготовки після первинного спікання, тобто пористого матеріалу процес обробки набагато технологічний. Технологічні параметри процесу імпульсно-статичної обробки забезпечують деформацію в межах рівномірної інтенсивності деформацій.

Для низки технологій обробки матеріалів, які пов'язані з динамічною, статичною і термічною дією, є характерним перебіг двох взаємовиключних процесів деформаційного зміцнення і розміцнення оброблюваних матеріалів.

Так, у процесах зміцнення методами пластичної деформації – це максимальна зносостійкість і максимальний приріст межі витривалості; у процесах отримання шаруватих композиційних матеріалів – максимальна зональна і локальна міцність і електро-стійкість. У процесах компактування порошкоподібних матеріалів – максимальна густина, пластичність, зносостійкість і ударна в'язкість; у процесах калібрування та ущільнення конструкцій у багатошаровому виконанні – максимальна тріщиностійкість; у процесах виробництва виробів із тугоплавких матеріалів максимальна формостійкість при термічних діях досягається при оптимальній інтенсивності деформацій на наблизеній або рівній рівномірній деформації та оптимальній структурі матеріалу, яка характеризується кристалічністю. І якщо максимально можливі або граничні значення інтенсивності деформацій визначаються досить точно, то питання встановлення деформацій, що відповідають оптимальним рівномірним, залишається недостатньо вивченим. У процесах компактування порошко-

$$\Gamma(F_{klmn}) = \sum_i^k \sum_l^L \lambda_e \left[ \frac{\varepsilon_{\ell k}}{\varepsilon_p} \right]^2 + \lambda_k \left[ \frac{(L/d)}{(L/d)_o} \right]^2 + \left( \frac{S_p}{S_k} \right)^2 \lambda_1 + \left( \frac{E_{max}}{E_{min}} \right)^2 \lambda_2 + \left( \frac{\Delta Z_p}{\Delta Z} \right)^2 \lambda_3 + \left( \frac{C_p}{C_{min}} \right)^2 \lambda_4 + \left( \frac{\partial_p}{\partial_{min}} \right)^2 \lambda_5 \quad (9)$$

де  $\varepsilon_{\ell k}$  – інтенсивність деформацій у  $\ell k$  – вузлі заготовки;  $(L/d)$  – середнє значення монокристалічності;  $F_{klmn}$  – поле координат керування; де  $S_p$ ,

подібних матеріалів, калібрування та ущільнення багатошарової стінки – визначається тиск перепресування. У процесах отримання шаруватих композиційних матеріалів існують інтервали параметрів, за яких відбувається міцне зчеплення шарів. Такого типу завдання вирішуються шляхом отримання заданих вихідних параметрів при оптимізації процесів обробки матеріалів.

Одним зі шляхів, за яким розглянуте завдання оптимізації в просторі декількох критеріїв  $\Phi_e, \Phi_k$ , ґрунтується на проектуванні оптимізованого функціонала  $\Phi$  на обраний або заданий напрямок

$$\Phi = \lambda_e \cdot \Phi_e + \lambda_k \cdot \Phi_k + \lambda_1 L_D + \lambda_2 L_F + \lambda_3 L_Z + \lambda_4 L_T + \lambda_5 L_C + \lambda_6 L_3, \quad (7)$$

де  $\lambda_e$  і  $\lambda_k$  – вагові коефіцієнти,  $\lambda_e + \lambda_k = 1$ ;  $L_C, L_3$  – вартісний та екологічний критерії;  $\lambda_1 \dots \lambda_6$  – вагові коефіцієнти;  $\lambda_1 \dots \lambda_6 > 0$  і  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 = 1$ .

У процесах холодної пластичної деформації, як буде показано далі, гранична рівномірна деформація відповідає оптимальній кристалічності (стапельності), і в цьому випадку немає сенсу використовувати другий член функціонала (7), тобто  $\lambda_e = 1$ ;  $\lambda_k = 0$ .

У процесах термічної обробки деформації незначні. У цьому випадку  $\lambda_e = 0$ ;  $\lambda_k = 1$ . При термомеханічній обробці  $\lambda_e \neq 0$ ;  $\lambda_k \neq 0$ .

При термічному впливі компонента деформації від інтенсифікуючих впливів має вигляд:

$$(\Delta \varepsilon_{i,\eta,\tau}^{\alpha,k,l})^l = Q_T T_{i,\eta,\tau} \delta^{k,l}, \quad (8)$$

де  $Q_T$  – коефіцієнт лінійного розширення;

$T_{i,\eta,\tau}$  – температура;

$$\delta^{k,l} = \begin{cases} 1, & \text{при } k = l; \\ 0, & \text{при } k \neq l. \end{cases}$$

Внутрішнім циклом, при розв'язанні завдань визначення потрібних параметрів конкретних технологій обробки, є визначення напружено-деформованого стану заготовки. Конкретизація цих завдань розглянута далі.

Обернена задача визначення потрібного керованого силового, кінематичного і термічного навантаження зведена до розв'язку задачі математичного програмування. При цьому цільова функція виражається у вигляді квадратичного функціонала Гауса:

$S_k$  – показники різностінності деталі, що реалізуються в процесі формозміни та задані експлуатаційними вимогами;  $E_{max}, E_{min}$  – максимальні й мінімальні значення логарифмічних швид-

костей деформації; при цьому  $E_{N_j(x_i)}$  – середнє значення логарифмічних швидкостей деформації, що відповідає ідеальному процесу формозміни, при цьому  $E_{P_j(x_i)}$  – середнє значення логарифмічних деформацій, що відповідає процесу формозміни, що реалізується;  $\Delta Z_p, \Delta Z_{min}$  – реалізоване й мінімальне значення кореня кубічного з суми кубів пікових значень контактних напруг по координатним осям. При цьому  $\Delta Z_{N_j(x_i)}$  – мінімальне значення кореня кубічного з суми кубів пікових значень контактних напруг по координатним осям, а  $\Delta Z_{P_j(x_i)}$  – реалізоване значення кореня кубічного з суми кубів пікових значень контактних напруг по координатним осям;  $C_p, C_{min}$  – технологічна собівартість ( $p$  – реалізована й  $min$  – мінімальна);  $\mathcal{E}_p, \mathcal{E}_{min}$  – екологічні втрати, реалізовані в прийнятому технологічному процесі формозміни;  $\lambda_1 - \lambda_5$  – вагові коефіцієнти.

Функціонал мінімізується на сімействі  $\Gamma(F_{klmn}, T_{klmn})$ . Тут при значенні підрядкового індексу координат  $Y_\alpha, \alpha=1, F_{klmn} = P_{klmn}, \alpha=2, F_{klmn} = T_{klmn}$ , де  $P, T$  – функції керування за силовими та термопараметрами. Вважаємо, що подібність силових імпульсів зберігається. Тоді напрям пошуку визначається за  $F_{klmn}$ , похідні  $\Gamma(F_{klmn})$  за  $F_{klmn}$  визначаються чисельно. У кінцевому підсумку значення силової, кінематичної та термічної дії, прикладеної до заготовки, визначається з виразу:

$$F_{klmn}^{S+1} = F_{klmn}^S - (\nabla^2 \Gamma(F_{klmn}^S))^{-4} \nabla \Gamma(F_{klmn}^S)$$

де  $\nabla^2 \Gamma(F_{klmn}^S)$  – кубічна матриця других частинних похідних

$$\nabla^2 \Gamma(F_{klmn}^S) = \left\| \nabla_{ab}^2 \Gamma(F_{klmn}^S) \right\|,$$

$$\nabla_{ab}^2 \Gamma(F_{klmn}^S) = \left\| \frac{\partial^2 \Gamma(F_{klmn}^S)}{\partial F_{klmn}^S \cdot \partial F_{klmb}^S} \right\|, \quad (10)$$

де  $\nabla \Gamma(F_{klmn}^S)$  – матриця градієнтів першого порядку.

У загальній проблемі задача забезпечення необхідним керованим силовим, кінематичним і тепловим навантаженням є найбільш важливою. Вона розглядається як задача оптимізації третього рівня після визначення кінематики поведінки до оптимальних потрібних параметрів, у результаті розв'язання якої визначаються:

по-перше, можливість забезпечення встановлених на попередньому етапі градієнтів і рівні керованих силових, кінематичних і термічних навантажень; по-друге, при позитивній відповіді на перше питання – конкретні параметри керованого силового, кінематичного навантаження і теплових джерел, їх кількість на четвертому рівні.

Ітераційні процедури відбуваються в модифікованому симплекс-варіанті найшвидшого спуску та деформованого багатогранника.

Головною складністю при використанні методу найшвидшого спуску є його залежність від вибору

масштабу оптимізованих параметрів. Оскільки для низки технологічних процесів гіперпростір виявляється дуже витягнутим, тобто утворює "хребет" або "яр", то процедура збіжності занадто повільна. Для прискорення збіжності застосовується оптимізація величини кроку і симплекс-модифікація, проте ефективнішим є застосування методу деформованого багатогранника, оскільки тут немає необхідності у визначенні похідних, і форма його автоматично масштабується у напрямку задоволення технології розв'язуваної задачі.

У нашому випадку головна мета полягає в обґрунтуванні прийнятих технологій і є лише піделементом у загальній проблемі створення ефективних конструкцій. Вибраний підхід – розробка принципів проектування процесів оптимальної обробки виробів із конструкційних матеріалів. Пошук оптимального техпроцесу та принципів його побудови включає наступні етапи:

1. Вибір на множині схем технологічних процесів конкретно заданого.
2. Виявлення основних параметрів виробу, що впливає на технологічний процес та експлуатаційні характеристики деталей.
3. Розробка методу та алгоритму розрахунку напружено-деформованого стану при формоутворенні.
4. Вибір і визначення критеріїв оптимальності технологічного процесу.
5. Установлення взаємного зв'язку між критерієм оптимальності та основними параметрами технологічного процесу.
6. Пошук екстремуму за критерієм оптимальності.
7. Визначення оптимальної технологічної схеми для виробництва необхідних деталей.

Основними характеристиками технологічного процесу виготовлення деталей із тугоплавких і композиційних матеріалів і тонкостінних профілів будуть наступні:

1. Граничне значення інтенсивності рівномірної деформації  $\mathcal{E}_p$ .
  2. Структура матеріалу заготовки на конкретному етапі технологічної схеми.
- При характеристиці деталі з тугоплавких матеріалів доцільно обмежитися двовимірним простором з координатами  $\mathcal{E}_p$  і  $L/d$  – показник монокристалності. Для тонкостінних профілів  $S_p, E_{max}$ . Для конкретної деталі на множині виробів відповідає точка  $A$  з координатами  $\mathcal{E}_p$  і  $L/d$  або  $S_p, E_{max}$ . Цій точці відповідає технологічний процес виготовлення даної деталі. Якщо характеристики деталі потрапляють у середину області, яка обмежує можливість виготовлення такого класу деталі, то їх виробництво за вибраною технологічною схемою можна здійснити. У випадку, коли характеристики деталі не потрапляють у середину області, необхідно розширювати область параметрів технологічного процесу. Для цього можна використовувати силову, кінематичну та температурну інтенсифікації. Визначення  $\mathcal{E}_p$  неможливе без розрахунку деформованого стану заготовки.

Для розрахунку напружено-деформованого стану

і визначення кінцевої формозміни заготовок за заданих параметрів силового навантаження розроблено загальну математично-механічну модель та алгоритм. Граничні умови враховують характер міжшарової взаємодії та охоплюють різні варіанти обробки тиском. Для розрахунку процесів деформування ди-

сперсних, суцільних і шаруватих композиційних матеріалів, а також матеріалів із різними вкрапленнями, застосовуються специфічні розрахункові сітки, що враховують ці особливості. На рис. 1 наведено базову блок-схему алгоритму процесу деформування заготовки.

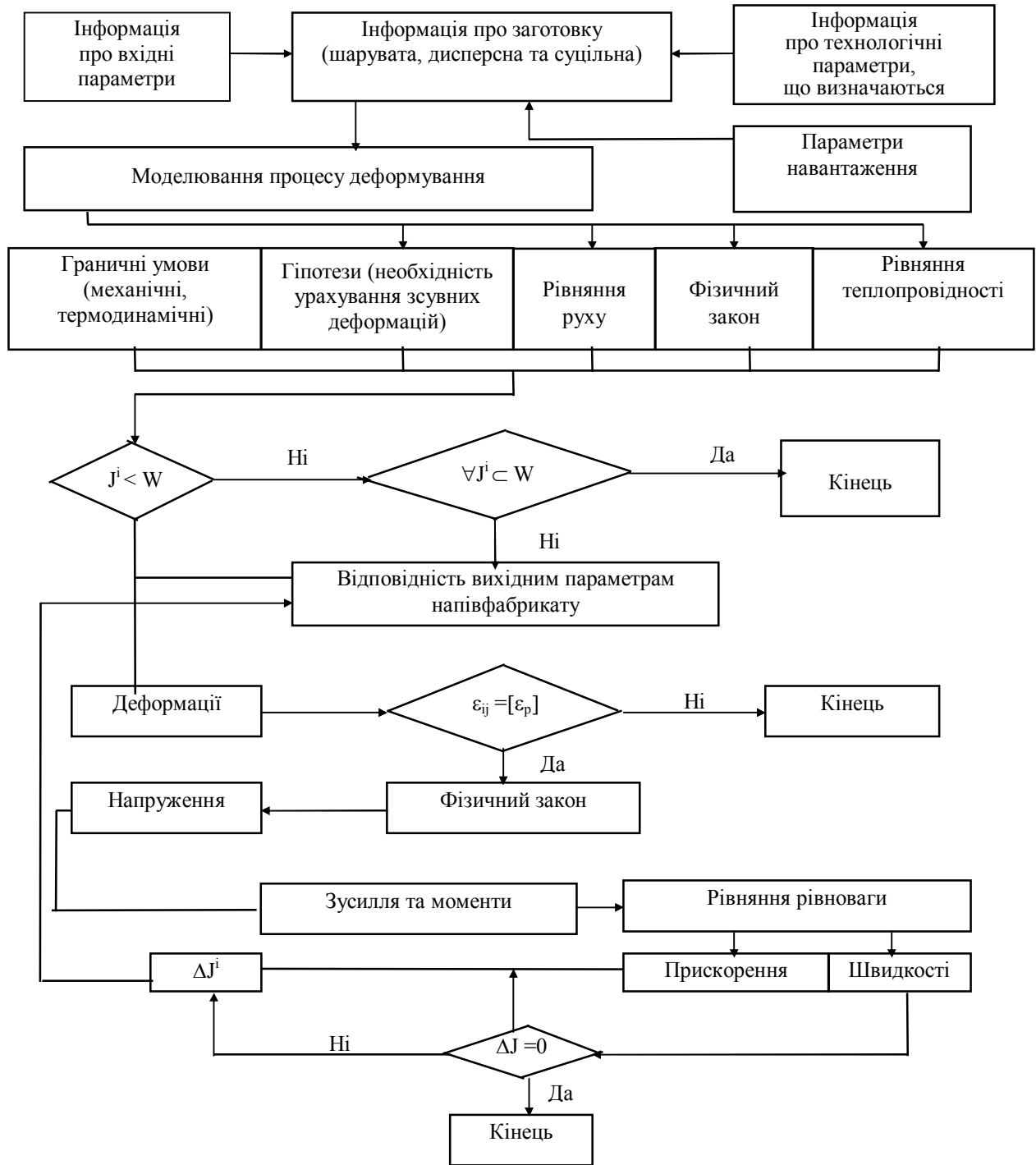


Рисунок 1 – Алгоритм розрахунку процесу деформування

При математичному описі досліджуваних процесів попередньо здійснюється ідеалізація об'єкту дослідження та формування групи, що визначають технологічні параметри  $T_i$ , вплив яких на досліджувані параметри результатів  $J_i$  необхідно встановити.

Далі здійснюється вибір фізичного закону, що зв'яже визначальні технологічні параметри і дослі-

джувані параметри результатів функціями  $F_i [T_i (\epsilon_p, L/d), J_i (\epsilon_p, L/d)]$ . Фізичні закони, що випливають із законів збереження, не вичерпують інформації про процес, і в більшості випадків у процесах обробки металів тиском не дають повного замикання системи рівнянь  $\sum F_i = 0$ . Функції зв'язку  $F_i$ , що містять інформацію про механічні,

фізичні, термодинамічні та інші закони в розглянутих процесах обробки, вирізняються лише ступенем ідеалізації об'єкту. Основні відмінності мають місце при використанні конкретних рівнянь стану оброблюваних матеріалів, законів зв'язку між тензорами деформацій і швидкостей деформацій.

Так, при моделюванні процесу деформування шаруватої заготовки необхідно врахувати істотне зміцнення навколошовної зони, а отже, і зміну динамічної межі плинності по товщині заготовки. При розгляді процесу спікання необхідно враховувати відмінність пористості в зовнішніх і внутрішніх зонах. На етапі реалізації завдання чисельно розв'язується система рівнянь. У кожному конкретному процесі формоутворення вибирається від розташування вузлів різницевої схеми і типів комірок сітки.

**ВИСНОВКИ.** Розроблені принципи побудови та створено багатofункціональну оптимізаційну модель напружено-деформованого стану для розрахунку технологічних параметрів процесів формозміни, ущільнення, калібрування та плакування із підвищеним ступенем уніфікації стосовно різних типів заготовок, деформувальних зусиль і оптимальних деформацій, а також комплексу задач вибору раціональних схем силової та термічної інтенсифікації.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Розен В.В. Цель – оптимальность – решение (математические модели принятия оптимальных решения). – М.: Радио и связь. 1982. – 168 с.
2. Импульсная обработка металлов давлением:

#### GENERAL STATEMENT OF JOB OPTIMUM PLASTIC, THERMAL OR THERMOMECHANICAL LOADING DURING MACHINING FOR PRODUCTS METALURG AND TRANSPORT

**D. Mos'pan**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Shows general statement of the problem of optimal mechanical, thermal and thermomechanical loading when processing materials using control methods, plastic deformation of it. In describing the initial and final state of the workpiece into account variables characterizing the internal structure of the material. The functional status of the workpiece includes the components characterizing the structure of a single-crystal-forming, the blank material. The objective function is expressed as a quadratic Gaussian functional-tion. An algorithm for calculating the optimal process of plastic-deformirova and principles of its research and construction.

**Key words:** purchase, the algorithm functionality, optimization criterion, thermomechanical loading.

#### REFERENCES

1. Rozen, V.V. (1982), Tsel – optimalnost – reshenie (matematicheskie modeli prinyatiya optimalnykh resheniya) [The goal – the best – solution (mathematical models of optimal solutions)], Radio i svyaz, Moscow, USSR.
2. *Impulsnaya obrabotka metallov davleniem: sbor. statey* [Pulse Metal Forming: collection. articles], (1977), ed. V.C. Borisevich, Mashinostroenie, Moscow, USSR.
3. Gulyaev, Yu.G., Chukmasov, S.A., Guba, A.V. (1986), *Matematicheskoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem* [Mathematical modeling of metal forming processes], Naukova Dumka, Kyev, Ukraine.
4. Ryzhkov, E.V., Averkiev, V.I. (1980), [Process optimization machining], Naukova Dumka, Institute of super-hard materials, Kyev, Ukraine.
5. Dragobetsky, V.V. (2002), "Practice and prospect of creating advanced technologies pulse metalworking", *Proceedings of the International Scientific-Technical Conference "Mechanical Engineering and Technosphere XXI Century"*, in 3 vol., september 9–15,

сбор. статей / Под ред. В.К. Борисевича. – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.

3. Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А., Губинский А.В. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.

4. Рыжков Э.В., Аверкиев В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. – К.: Наукова думка, АН УССР. Ин-т сверхтвердых материалов, 1980. – 256 с.

5. Драгобецкий В.В. Практика и перспективы создания прогрессивных технологий импульсной металлообработки //Сборник трудов междунар. науч.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века», в 3-х т., 9–15 сентября. 2002 г., Севастополь. – Донецк: Дон НТУ, 2002. – Т. 1. – С. 187–191.

6. Кузьменко В.И., Балакин В.Ф. Решение на ЭВМ задач пластического деформирования: справочник. – К.: Техніка, 1990. – 136 с.

7. Вдовин С.И. Методы расчета и проектирования на ЭВМ процессов штамповки листовых и профильных заготовок. – М.: Машиностроение, 1988. – 160 с.

8. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 542 с.

9. Драгобецкий В.В. Тепловые процессы при совмещении операций сварки и штамповки взрывом // Системные технологии. Математические проблемы технической механики: сбор. науч. трудов. – Вып. 4 (21). – Днепропетровск, 2002. – С. 89–94.

Sevastopol, DonNTU, Donetsk, vol. 1, pp. 187–191.

6. Kuzmenko, V.I., Balakin, V.F. (1990), *Reshenie na EVM zadach plasticheskogo deformirovaniya: spravochnik* [The solution of problems on the computer of plastic deformation: handbook], Tekhnika, Kyev, USSR.

7. Vdovin, S.I. (1988), *Metody rascheta i proektirovaniya na EVM protsessov shtampovki listovyih i profilnyih zagotovok* [Methods of calculation and Designing of a computer-stamping process of sheet and procure blanks], Engineering, Moscow, USSR.

8. Vasidzu, K. (1987), *Variatsionnyie metody v teorii uprugosti i plastichnosti* [Variational methods in the theory of elasticity and plasticity], ed. from English, Mir, Moscow, USSR.

9. Dragobetsky, V.V. (2002), "Thermal processes in the combined operations of welding and stamping explosion", *System technologies. Mathematical problems of technical mechanics: collection of scientific papers*, iss. 4 (21), pp. 89–94.

Стаття надійшла 30.04.2015.