

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

К. І. Коцюбівська, Ю. А. Буренніков, І. О. Сивак

**РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ
ВИДАВЛЮВАННІ З ПРОТІТИСКОМ**

Монографія

ВНТУ
2011

УДК 621.983.5
ББК 34.54
К76

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 24.12.2009 р.)

Рецензенти:

В. А. Огородніков, доктор технічних наук, професор

О. В. Нахайчук, доктор технічних наук, професор

Коцюбівська К. І.,

К76 Ресурс пластичності металів при поперечному видавлюванні з протитиском : монографія / К. І. Коцюбівська, Ю. А. Буренніков, І. О. Сивак. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 156 с.

ISBN 978-966-641-417-8

В монографії розглянуто сучасні методи визначення граничних деформацій при холодній пластичній деформації металів методами прикладної теорії деформуємості. Для збільшення пластичності металів запропоновано використовувати протитиск, який створюється твердим середовищем. Розроблено метод оцінки використаного ресурсу пластичності при пластичному деформуванні в умовах об'ємного напруженого стану.

Монографія призначена для інженерно-технічних працівників, науковців та студентів.

УДК 621.983.5
ББК 34.54

ISBN 978-966-641-417-8

© К. Коцюбівська, Ю. Буренніков, І. Сивак, 2011

Зміст

ВСТУП.....	5
1. ДЕФОРМАЦІЇ І НАПРУЖЕННЯ ПРИ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ МЕТАЛІВ.....	6
1.1. Методи дослідження деформованого стану при вели- ких пластичних деформаціях.....	6
1.2. Апроксимація експериментальних даних кубічними сплайн-функціями.....	9
1.3. Визначення напружено-деформованого стану при обробці металів тиском.....	17
2. ЗАЛЕЖНІСТЬ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ ВІД ІСТОРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ.....	23
2.1. Накопичення пошкоджень при пластичній деформа- ції. Критерії деформуємості.....	23
2.2. Залежність пластичності металів від схеми напруже- ного стану при об'ємному напруженому ста- ні.....	28
2.3. Поверхня граничних деформацій.....	31
2.4. Залежність пластичності від схеми напруженого ста- ну при плоскому напруженому стані.....	38
2.5. Вплив третього інваріанта тензора напружень на пластичність металів.....	41
3. ОЦІНКА ДЕФОРМУЄМОСТІ ЗАГОТОВОК ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ.....	46
3.1. Поперечне видавлювання стержневих заготовок з протитиском.....	47
3.2. Визначення напружено-деформованого стану при поперечному видавлюванні суцільних заготовок.....	53
3.3. Визначення величини протитиску.....	65
3.4. Оцінка деформуємості при поперечному видавлю- ванні суцільних осесиметричних заготовок.....	71

3.5. Розв’язок задачі поперечного видавлювання з використанням методу скінченних елементів.....	81
3.6. Напружено-деформований стан та деформуємість заготовок при поперечному видавлюванні з протитиском.....	89
4. ДЕФОРМУЄМІСТЬ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ З ПРОТИТИСКОМ.....	98
4.1. Поперечне видавлювання трубчастої заготовки з протитиском.....	98
4.2. Напружено-деформований стан при поперечному видавлюванні трубчастих заготовок з використанням протитиску.....	101
4.3. Оцінка деформуємісті трубчастих заготовок при поперечному видавлюванні з протитиском.....	105
4.4. Визначення напружено-деформованого стану методом скінченних елементів та оцінка деформуємісті заготовок.....	111
4.5. Експериментальні дослідження формотворення деталей з фланцем при холодному поперечному видавлюванні з протитиском.....	120
4.6. Вплив проміжних відпалів на відновлення ресурсу пластичності при поперечному видавлюванні.....	127
4.7. Методика проектування процесів поперечного видавлювання з протитиском.....	131
ВИСНОВКИ.....	134
ЛІТЕРАТУРА.....	136

ВСТУП

Розвиток сучасних технологій обробки металів тиском характеризується все більш глибоким та всебічним вивченням процесів зміцнення і пластичного розрихлення, які мають місце при пластичній деформації металів. Так як процес пластичного формозмінення необоротний, то фізико-механічні властивості zdeформованого металу в значній мірі залежать від історії навантаження. Сучасний рівень теорії пластичності дозволяє оцінити вплив параметрів процесу пластичного формозмінення на історію навантаження та обумовлену нею інтенсивність процесів накопичення деформаційних дефектів і, на цій основі, розробляти нові та удосконалювати відомі технології обробки металів тиском. Крім того, використовуючи методи теорії пластичності та прикладної теорії деформуємі, можна визначити такі параметри технологічного процесу і закони їх зміни, при яких буде забезпечена необхідна технологічна спадковість деталей, отриманих методами пластичного деформування.

Для оцінки впливу параметрів процесу обробки тиском на ймовірність руйнування та технологічну спадковість необхідно мати інформацію про напружено-деформований стан в металі, що деформується. В даний час теоретичними методами така задача розв'язана тільки для простих випадків навантаження. Тому в монографії розглядаються інженерні, експериментально-розрахункові та чисельні методи визначення напружено-деформованого стану в пластичній області. Для оцінки ймовірності появи макротріщин, обумовлених деформаційними дефектами, величину використаного ресурсу пластичності визначали методами прикладної теорії деформуємі.

В монографії використані матеріали досліджень та розробок, виконаних авторами сумісно з І. С. Алієвим, В. М. Михалевичем, В. А. Огородніковим та Н. А. Шестаковим.

Автори вдячні їм за співробітництво.

1. ДЕФОРМАЦІЇ І НАПРУЖЕННЯ ПРИ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ МЕТАЛІВ

1.1. Методи дослідження деформованого стану при великих пластичних деформаціях

Розв'язок технологічних задач обробки металів тиском базується в основному на теорії пластичності. Однак, використання теоретичних методів дослідження напружено-деформованого стану обмежене недостатнім рівнем обґрунтування вибору тих чи інших реологічних моделей, а також граничних умов. Хоча в роботі [1] відмічається, що при використанні класичних варіаційних методів в даний час можна «розв'язати будь-яку крайову задачу теорії обробки металів тиском з будь-якою (розумною) точністю», але проблема вибору та побудови відповідних координатних функцій залишається невирішеною. Крім того, при наближеному розв'язку задач обробки тиском варіаційним методом не завжди вдається задовольнити умовам повноти та апроксимаційної універсальності [2]. Відкритим залишається питання вибору граничних умов. Граничні умови в формі законів Прандтля або Кулона, а також більш складні моделі [3] мають або наближений, або частковий характер. Тому в обробці металів тиском залишається значною роль експериментальних та експериментально-розрахункових методів досліджень.

Для підвищення ефективності процесів обробки металів тиском необхідний подальший розвиток методів розв'язку крайових задач прикладної теорії пластичності та теорії деформуємості. Важливий внесок у розвиток технологічної механіки та теорії деформуємості зробили І. С. Алієв, Ю. А. Алюшин, Я. Є. Бейгельзімер, В. І. Дорошко, С. І. Губкін, Г. Я. Гун, В. М. Данченко, Г. Д. Дель, А. М. Дмитрієв, В. О. Євстратов, Є. В. Звонарьов, В. Л. Калюжний, А. А. Костава, В. Л. Колмогоров, Ю. Г. Калпін, О. М. Лаптев, Н. Н. Малінін, Є. М. Макушок, В. М. Михалевич, А. А. Нотич, А. Г. Овчінніков, В. А. Огородніков, Є. О. Попов, А. А. Поздєєв, І. П. Рене, О. А. Розенберг, В. Д. Рудь, В. В. Скороход, Г. А. Смірнов-Аляєв, В. І. Стеблюк, Л. Г. Степанський, Д. В. Хван, Є. П. Унксов,

Ю. К. Філіпов, Н. А. Шестаков, М. Б. Штерн, С. П. Яковлев, Р. Дж. Грін, У. Джонсон та інші.

При обробці металів тиском експериментальним шляхом можна визначити переміщення, деформації, інколи швидкості течії і деякі функції напружень. Жоден з існуючих методів не дозволяє безпосередньо заміряти напруження в довільних точках тіла, що деформується. Вдається тільки наближено виміряти напруження на контактній поверхні [4–7] або в окремих точках деформуємого тіла [6] за допомогою спеціальних датчиків. Однак, отримана таким способом інформація має якісний характер [8], що пов'язано із значними похибками вимірювальних пристроїв та усередненням інформації в межах зони контакту матеріалу з вимірювальним пристроєм. Однак, жоден із експериментальних методів не дозволяє отримати прямою обробкою експериментальних даних всі характеристики напружено-деформованого стану. Повний аналіз напружено-деформованого стану передбачає використання експериментально-розрахункових та чисельних методів, які базуються на певних фізико-механічних теоріях пластичної деформації металів.

Найбільше поширення при дослідженнях напружено-деформованого стану отримали методи, в яких використовують визначену експериментально кінематику. Якщо параметри кінематики (переміщення, швидкості течії) відомі, то можна розрахувати компоненти деформації та швидкості і потім, використовуючи теорію пластичної течії та граничні умови, визначити компоненти тензора напружень.

Найбільш поширеним і найстарішим є метод координатних сіток, який використовується для дослідження деформацій як на поверхні, так і у внутрішніх областях зразків. Співвідношення для розрахунків деформацій по zdeформованим координатним сіткам вперше отримані Е. Зібелем і П. О. Пашковим [9]. Рівняння отримані з умови, що вихідна квадратна комірка сітки, нанесеної на головну площину, після деформації перетворюється в паралелограм, а вписане в вихідний квадрат коло – в еліпс. Відповідно до теорії кінцевих деформацій, головні осі еліпса співпадають з напрямками головних осей деформацій, а у відповідності з деформаційною теорією – і з головними осями напру-

жень. І. П. Рене [9] отримав більш загальні формули для випадку, коли вихідна комірка має форму паралелограма, що дуже важливо при поетапному дослідженні процесів пластичного формозмінення. Розглянуті методики є універсальними, вони придатні для досліджень будь-яких матеріалів і довільних умов деформації, мають високу локальність (в плані слабкого впливу похибок в деякій зоні області на результати розрахунків у віддаленій зоні). До недоліків слід віднести високу трудомісткість вимірювань, низьку точність визначення малих деформацій. Отримані результати є усередненими в межах комірки, що дозволяє оцінювати напруження тільки по деформаційній теорії. Крім того, розглянуті методики дають великі похибки, якщо сторони комірки в процесі деформації сильно викривляються.

Тому перспективними і більш точними є методи, в яких процес деформації розбивають на кілька етапів і на кожному із них заміряють координати вузлів ділильної сітки [10]. Потім визначають переміщення вузлів як функції часу і використовують отриману інформацію для визначення поля швидкостей деформацій. Перехід до напруженого стану здійснюється по співвідношеннях теорії течії.

Експериментальна інформація про координати вузлів ділильної сітки має систематичні похибки, пов'язані із особливостями методу вимірювання. Тому математична обробка експериментальних результатів шляхом згладжування повинна відділити випадкові та систематичні похибки від досліджуваної залежності. Операція згладжування нерозривно зв'язана з апроксимацією і може бути виконана для всієї області і локально. В першому випадку вибір апроксимуючих функцій викликає відомі труднощі, оскільки ці функції не можуть бути довільними. Крім хорошої збіжності до апроксимуємих об'єктів, необхідно задовольнити початковим та граничним умовам, відомим із теоретичного аналізу. Врахування граничних умов дозволяє підвищити достовірність апроксимації і обчислення похідних. Врахувати обмеження, які накладаються на апроксимуючі функції, можна шляхом спеціального підбору таких функцій [11]. Вибір функцій досить складна задача, яка ґрунтується на аналізі численних експериментальних даних та технологічних особливостях процесу. Тому результати апроксимації, в більшості випадків, використовуються для того процесу,

на основі аналізу якого вона була отримана. Такий підхід можна вважати ефективним при дослідженні конкретних процесів, так як він дозволяє отримувати результати в аналітичному вигляді і в деяких випадках зменшити об'єм необхідної експериментальної інформації.

Велику універсальність мають алгоритми, в яких експериментальна інформація апроксимується універсальними методами: степеневими багаточленами, рядами Фур'є, сплайнами і т.п. Для пластичних деформацій, де область розрахунків може включати кінцеве число жорстких і пластичних зон, а також для областей із значною локалізацією деформацій, приходиться використовувати апроксимацію високого порядку, яка включає 8–12 членів ряду [12, 13]. Хоча при цьому досягається хороше наближення до функції, що згладжується, обчислення похідних виявляється незадовільним, так як апроксимуюча функція в області розрахунку має деяке число екстремумів, які не пов'язані з особливостями вимірюваних величин. Сплайн-функції [14] вільні від більшості недоліків поліноміальної апроксимації і дозволяють легко забезпечити виконання граничних умов [15–18]. При використанні сплайн-згладжування виникає багато труднощів при побудові багатомірного сплайну, так як такі сплайни важко будувати для областей із складною конфігурацією границь [19–22].

1.2. Апроксимація експериментальних даних кубічними сплайн-функціями

При дослідженні нестационарних процесів пластичної деформації методами координатних сіток значно зростає трудомісткість експериментів і, як наслідок, трудомісткість їх обробки. Це пов'язано з тим, що напружено-деформований стан у даному випадку є функцією не тільки координат, але і часу. Тому процес деформування розбивають на ряд етапів, на кожному з яких експеримент переривають, заготовку витягують із пристрою і заміряють координати вузлів деформованої сітки, нанесеної на меридіональний або інші перерізи заготовки. Наприклад, при осесиметричній деформації експериментальні дані представляють у вигляді таблично заданих функцій (масивів) поточних (ейлерових) координат z , r від початкових (лагранжевих) координат

z_0 , r_0 і часу (номера етапу деформування). Потім заготовку вставляють у пристрій і деформують до наступного етапу.

Компоненти тензора швидкостей деформацій при осесиметричній деформації визначають по спотворенню координатної сітки, нанесеної на меридіональний переріз заготовки по формулах [15, 17]

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_r &= \frac{r}{r_0} \left[\frac{\partial z}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial z_0 \partial t} - \frac{\partial z}{\partial r_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} \right], & \dot{\epsilon}_\phi &= \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial t} \\ \dot{\epsilon}_z &= \frac{r}{r_0} \left[\frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} - \frac{\partial r}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} \right], & & \\ \dot{\gamma}_{rz} &= \frac{r}{r_0} \left[\frac{\partial r}{\partial r_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} + \frac{\partial z}{\partial z_0} \frac{\partial^2 z}{\partial r_0 \partial t} - \frac{\partial r}{\partial z_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z_0 \partial t} - \frac{\partial z}{\partial r_0} \frac{\partial^2 z}{\partial z_0 \partial t} \right].\end{aligned}\tag{1.1}$$

Функції ейлерових координат від лагранжевих $z(z_0; r_0; t)$ і $r(z_0; r_0; t)$ можна отримати шляхом апроксимації експериментальних даних кубічними сплайнами. Експериментальна інформація завжди містить систематичні похибки, обумовлені методом вимірювання і випадкові похибки, викликані випадковим розсіюванням величин, що вимірюються. Математична обробка повинна відокремлювати випадкові похибки від досліджуваної залежності. При цьому виходять з того, що досліджувана функція є неперервною і диференційованою, а випадкові похибки такою властивістю не володіють. Крім вимог точного наближення до об'єктів, які апроксимуються, необхідно забезпечити виконання граничних умов, відомих з теоретичного аналізу процесу (це умови на осі симетрії, на границі пружної і пластичної зон і т.д.). Програмний комплекс з побудови згладжуючих кубічних сплайнів та їх застосування для знаходження кінематики осесиметричної задачі було розроблено в роботах [23, 24, 145, 146]. Інформацію про вихідну і спотворену координатну сітку одержують шляхом її сканування й обробки сканованого зображення ділильної сітки за допомогою розробленого програмного модуля, що дозволяє створити базу даних координат вузлових точок сітки.

Розроблений метод, дозволив підвищити точність вимірювань координат вузлів деформованої ділильної сітки і значно зменшити трудомісткість процесу вимірювання [23, 24, 145, 146]. Функції ейлерових координат від лагранжевих $z(z_0; r_0; t)$ і $r(z_0; r_0; t)$ можуть бути

отримані апроксимацією експериментальних значень $r_{i,j}(t)$ і $z_{i,j}(t)$ виміряних у вузлах сітки i, j . Однак, розв'язок задачі багатомірного згладжуючого сплайну пов'язаний з цілим рядом труднощів, основними з яких є побудова розв'язків для задач зі складною конфігурацією границі. Виходячи з цього спочатку кубічними сплайнами апроксимували залежності $z(z_0, r_0 = \text{const}, t = \text{const})$, $r(z_0, r_0 = \text{const}, t = \text{const})$ і ін., що легко диференціюються і які надалі легко використовувати для визначення компонент тензора швидкостей деформацій, а для розв'язку поставленої задачі використані згладжуючі кубічні сплайни одного аргументу [14]

$$S_i(x) = \sum_{j=0}^3 a_j^i (x - x_i)^j, \quad x \in [x_i, x_{i+1}], \quad i=1, 2, \dots, n-1 \dots \quad (1.2)$$

Критерієм якості апроксимації в цьому випадку є функціонал [14]

$$I(f) = \int_{x_1}^{x_n} |S''(x)|^2 dx + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\rho_i} (f_i - S(x_i))^2, \quad (1.3)$$

де f_i – значення функції, що згладжується, у вузлі, $\rho_i \geq 0$ – вагові коефіцієнти, $[x_1, x_n]$ – область визначення функції $f(x)$.

Задача згладжування формулюється у вигляді мінімізації функціонала (1.3). Структура функціонала (1.3) забезпечує компроміс між вимогами мінімальної кривизни сплайну $S(x)$ і, одночасно, найменшого відхилення сплайну від заданих експериментальних значень. В більшості випадків ці вимоги є суперечливими, тобто наближення кривої до експериментальних точок збільшує кривизну і навпаки. Необхідне співвідношення між цими вимогами забезпечується вибором вагових коефіцієнтів.

Знаходження коефіцієнтів a_j^i зводиться до розв'язку системи рівнянь з п'ятидіагональною матрицею. Для одержання замкнутої системи рівнянь необхідно задати граничні умови. Застосування сплайн-функцій у задачах обробки металів тиском зручно внаслідок того, що граничні умови часто відомі з постановки задачі.

Наприклад, в осесиметричних задачах на осі симетрії заготовки виконуються умови:

$$\frac{\partial^2 r}{\partial r_0^2} = 0, \quad \frac{\partial r}{\partial z_0} = 0, \quad \frac{\partial z}{\partial r_0} = 0. \quad (1.4)$$

Це дозволяє точно задавати граничні умови, що значно підвищує точність обчислень.

Програма обчислення сплайну (1.2) дозволяє легко виконати ряд операцій над таблично заданими функціями. У програму включена процедура обчислення значень сплайн-функції і її першої і другої похідних у довільній точці області визначення, а також процедура побудови графіка сплайну. Вибір вагових коефіцієнтів ρ_i виконаний за методикою [14]. Тому розроблена процедура, що реалізує ітераційний процес вибору вагових коефіцієнтів. Вагові коефіцієнти вибираються так, щоб забезпечити найбільшу гладкість сплайну і задовольнити умові

$$|f_i - S(x_i)| \leq \delta_i, \quad i=1, \dots, n, \quad (1.5)$$

де δ_i – абсолютна похибка експериментального значення функції f_i (похибка вимірювань координат точки $(r_{i,j}, z_{i,j})$).

Ітераційний процес продовжується доти, поки не буде виконано умову (1.5) для усіх вузлів сплайну.

Інформацію про вихідну і спотворену координатну сітку одержували шляхом її сканування. Обробка сканованого зображення ділильної сітки на будь-якій стадії деформування за допомогою розробленого в [23,24] програмного модуля дозволяє створити базу даних координат вузлових точок сітки. Отримані дані записуються в робочих листах файлу Microsoft Excel і використовуються для подальшої апроксимації. Такий спосіб дозволяє значно зменшити похибку вимірювань координат вузлів координатної сітки δ_i .

У робочому вікні розробленої програми відкривають файл зображення формату *.bmp (рис. 1.1). Натискаючи лівою клавішею мишки на зображенні, вибираються точки ділильної сітки, координати яких необхідно визначити. Порядок задання координат вузлів повинен відповідати інформації приведеній в таблиці експериментальних даних. Отримані координати заносяться у файл електронної таблиці Excel (рис. 1.2).

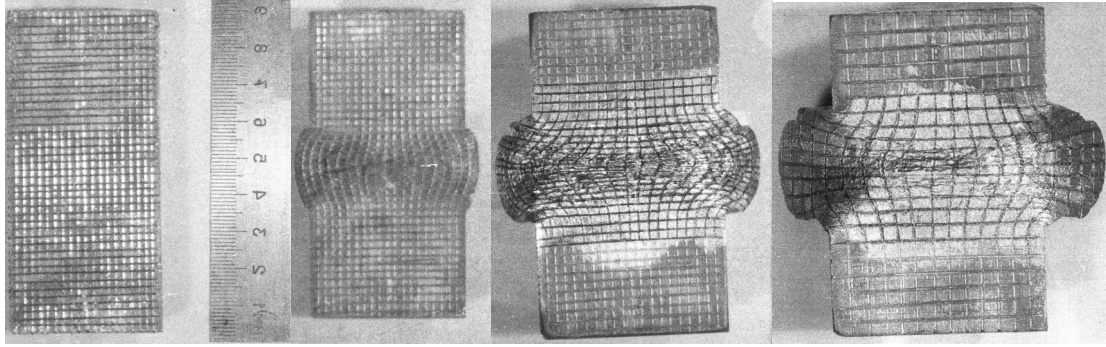


Рис. 1.1. Етапи поперечного видавлювання заготовки

dwl_stage	dwl_row	dwl_col	dwl_x	dwl_y	dwf_koef_x	dwf_koef_y	dwf_x0	dwf_y0
0	1	1	492	194	11	21		
0	2	2	520	242	11	21		
0	3	3	545	302	11	21		
0	4	4	563	362	11	21		
0	5	5	584	446	11	21		
0	6	6	597	522	11	21		
0	7	7	604	640	11	21		
0	8	8	611	730	11	21		
0	9	9	616	838	11	21		
0	10	10	618	930	11	21		
0	11	11	602	1018	11	21		
0	12	12	579	1088	11	21		
0	13	13	561	1136	11	21		
0	14	14	540	1180	11	21		
0	15	15	538	1232	11	21		
0	16	16	536	1276	11	21		
0	17	17	531	1314	11	21		
0	18	18	531	1354	11	21		
0	19	19	524	1396	11	21		
0	20	20	529	1440	11	21		

Рис. 1.2. Файл MS Excel, у якому зберігаються значення координат вузлових точок

При апроксимації отриманих експериментальних даних задаються граничні умови подібні (1.4), а там де граничні умови не відомі можна прийняти $S''(0) = 0$, $S''(n) = 0$. Використовуючи експериментальні дані, можна обчислити значення других похідних функції у вузлах апроксимації за методикою [14], що дозволяє обчислити значення сплайн-функцій у вузлових точках сітки.

Розглянемо в розгорнутому вигляді системи рівнянь, які необхідно розв'язувати при побудові згладжуючого сплайну. У неперіодичному випадку вони мають п'ятидіагональну структуру [14, 23, 24]

$$\begin{aligned}
a_0 M_0 + b_0 M_1 + c_0 M_2 &= g_0, \\
b_0 M_0 + a_1 M_1 + b_1 M_2 + c_1 M_3 &= g_1, \\
c_{i-2} M_{i-2} + b_{i-1} M_{i-1} + a_i M_i + b_i M_{i+1} + c_i M_{i+2} &= g_i, \quad i = 2, \dots, N-2, \\
c_{N-3} M_{N-3} + b_{N-2} M_{N-2} + a_{N-1} M_{N-1} + b_{N-1} M_N &= g_{N-1}, \\
c_{N-2} M_{N-2} + b_{N-1} M_{N-1} + a_N M_N &= g_N.
\end{aligned} \tag{1.6}$$

Коефіцієнти цієї системи визначаються формулами

$$\begin{aligned}
a_i &= \frac{1}{3}(h_{i-1} + h_i) + \frac{1}{h_{i-1}^2} \rho_{i-1} + \left(\frac{1}{h_{i-1}} + \frac{1}{h_i} \right)^2 \rho_i + \frac{1}{h_i^2} \rho_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \\
b_i &= \frac{1}{6} h_i - \frac{1}{h_i} \left[\left(\frac{1}{h_{i-1}} + \frac{1}{h_i} \right) \rho_i + \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{i+1}} \right) \rho_{i+1} \right], \quad i = 1, 2, \dots, N-2, \\
c_i &= \frac{1}{h_i h_{i+1}} \rho_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, N-3,
\end{aligned} \tag{1.7}$$

$$g_i = \frac{z_{i+1}^0 - z_i^0}{h_i} - \frac{z_i^0 - z_{i-1}^0}{h_{i-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1.$$

Якщо згладжуючий сплайн задовольняє умовам $S^{(j)}(0) = S^{(j)}(n) = 0$,
то

$$a_0 = a_N = 1, \quad b_0 = c_0 = c_{N-2} = b_{N-1} = g_0 = g_N = 0. \tag{1.8}$$

Для розв'язку системи (1.6) використано алгоритм розв'язку систем рівнянь з п'ятидіагональними матрицями, заснований на розкладанні матриць системи у вигляді LWL^T , де L – нижня трикутна матриця з одиничною діагоналлю, а W – діагональна матриця з позитивними елементами [14, 23, 24].

Після обчислення M_i із системи (1.6) значення сплайну z_i визначаються співвідношенням:

$$z_i - z_i^0 = \rho_i D_i, \quad i = 0, \dots, N, \tag{1.9}$$

причому

$$D_0 = \frac{1}{h}(M_1 - M_0),$$

$$D_i = \frac{1}{h_i}(M_{i+1} - M_i) - \frac{1}{h_{i-1}}(M_i - M_{i-1}), \quad i = 1, \dots, N-1, \quad (1.10)$$

$$D_N = \frac{-1}{h_{N-1}}(M_N - M_{N-1}).$$

Найбільш важливою задачею при побудові згладжуючого сплайну є вибір вагових коефіцієнтів ρ_i . Відмітимо, що якщо $\rho_i = 0$, то згладжуючий сплайн перетворюється в інтерполяційний. Звідси випливає, що чим точніше задано експериментальні значення координат z_i^0 у вузлах сітки, тим меншими повинні бути вагові множники ρ_i . У практичних задачах звичайно відомі помилки у визначенні величин z_i^0 , тобто $|z_i^0 - z_i| \leq \delta_i$, де z_i – значення сплайну. У цій ситуації природно побажати, щоб згладжуючий сплайн $S(x)$ задовольняв умові (1.5), яку перепишемо у вигляді:

$$|z_i^0 - z_i| \leq \delta_i, \quad i = 0, \dots, N, \quad (1.11)$$

$$\text{або} \quad \rho_i |D_i| \leq \delta_i, \quad i = 0, \dots, N... \quad (1.12)$$

Ці обмеження використовуються для обчислення вагових множників ρ_i . В роботах [23, 24] побудований ітераційний процес, реалізація якого дозволила одержати невідомі M_i і множники ρ_i :

$$(A + 6HR^{(k)}H^T)M^{(k)} = 6Hz^0, \quad (1.13)$$

$$\rho_i^{(k+1)} = \begin{cases} \delta_i / |D_i^k|, & \text{если } D_i^k \neq 0, \\ 0, & \text{если } D_i^k = 0, \end{cases} \quad (1.14)$$

де k – номер ітерації.

Матриці A і H мають наступний вигляд

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & r_1 & h_1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & h_1 & r_2 & h_2 & \cdot & \cdot \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cdot & \cdot & h_{N-3} & r_{N-2} & h_{N-2} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & h_{N-2} & r_{N-1} & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1.15)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot \\ h_0^{-1} & -(h_0^{-1} + h_1^{-1}) & h_1^{-1} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & h_{N-2}^{-1} & -(h_{N-2}^{-1} + h_{N-1}^{-1}) & h_{N-1}^{-1} \\ \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1.16)$$

$$R = \begin{bmatrix} \rho_1 & & & & \\ & \cdot & & & \\ & & \cdot & & \\ & & & \cdot & \\ & & & & \rho_N \end{bmatrix}$$

Зв'язок між M_i і z_i визначається матричним рівнянням

$$AM = 6Hz. \quad (1.17)$$

Як початкове наближення приймали $\rho_i^0 = 0$, що відповідає інтерполяційному сплайну зі значеннями $D_i = D_i^0$. Ітераційний процес продовжується доти, поки значення сплайну z_i у вузлах сітки не виявляться в «коридорі», який визначається співвідношенням (1.11).

У роботах [23, 24] оптимальні значення сплайну z_i у вузлах сітки були отримані при значеннях вагових коефіцієнтів, що відповідають похибкам вимірювань $\delta_i \leq 0,01$.

Розроблений програмний модуль використано для апроксимації експериментальних залежностей r від r_0 при $z = \text{const}$ для процесу поперечного видавлювання. Частина отриманих згладжуючих кривих приведена на рис. 1.3. Програма згладжування експериментальних даних за допомогою сплайн-функцій [23, 24] дозволяє по сканованому

зображенню координатної сітки визначати координати точок, згладжувати отримані експериментальні дані і розраховувати компоненти тензора швидкостей деформацій.

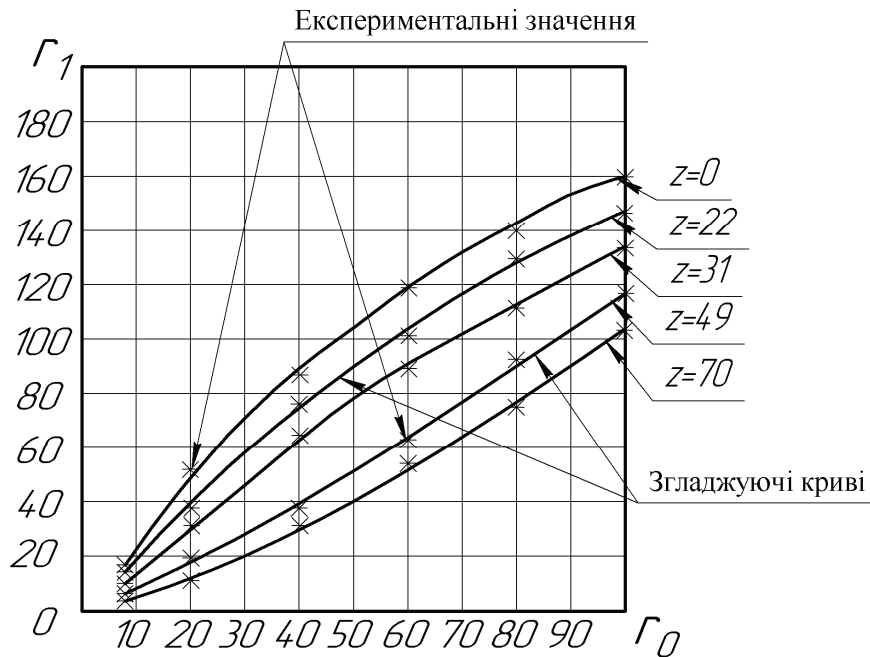


Рис. 1.3. Графіки сплайн-функцій отримані при значеннях вагових коефіцієнтів, що відповідають похибкам вимірів $\delta_i \leq 0,01$

1.3. Визначення напружено-деформованого стану при обробці металів тиском

Визначення полів напружень і деформацій при обробці металів тиском можуть проводитись як на основі розв'язку повної системи рівнянь прикладної теорії пластичності, так і за допомогою експериментально-розрахункових методів.

Задача дослідження напружено-деформованого стану (НДС) в пластично деформованих тілах формулюється, як задача розв'язку системи нелінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних. Однак не кожену задачу ОМТ можна сформулювати в вигляді математичної задачі теорії пластичності, оскільки складність фізичних залежностей і одночасний вплив множини факторів на процес пластичного формозмінення створюють багато труднощів в виборі розрахункової схеми і, крім того, не кожену сформульовану математичну задачу вдається розв'язати відомими методами із достатньою точністю.

Одним із перших був розроблений інженерний метод розрахунків НДС в процесах ОМТ, який заснований на сумісному розв'язку рівнянь рівноваги і пластичності [25–29]. Великий внесок в розвиток цього методу зробили Е. Зібель, Т. Карман, Г. Закс, С. І. Губкін, А. І. Целіков, Є. П. Унксов, М. В. Сторожев, Е. О. Попов та ін. В цьому методі не розглядають кінематику процесу, а обмежуються аналізом тільки силових параметрів. За рахунок припущень відносно характеру розподілу напружень (гіпотези плоских перерізів, радіальної течії Хаара – Кармана та ін.) задача зводиться до статично визначеної і вдається отримати розв'язок в вигляді співвідношень, які описують вплив основних факторів на процес деформування. Цей метод допоміг виконати наукове обґрунтування технологічних процесів та їх удосконалення, але виявився практично непридатним для розв'язку задач теорії деформуємі, в зв'язку з тим, що характеристики, які отримували після розрахунків даним методом часто навіть якісно не співпадають з величинами, отриманими більш точними теоретичними та експериментальними методами [26].

Метод ліній ковзання також можна віднести до традиційних методів розв'язку задач теорії пластичності. Розробці та розвитку цього методу присвячені роботи Р. Хілла [30], В. В. Соколовського [31], С. А. Христіановича [32], У. Джонсона [26], А. Д. Томльонова [33], І. П. Ренне [9], Є. М. Макушка [34] та ін. Цим методом можна розв'язувати задачі, в яких рівняння рівноваги і пластичності створюють замкнену систему диференційних рівнянь гіперболічного типу. Тому цей метод можна використовувати при розв'язку плоских задач і, тільки в окремих випадках, для розв'язку осесиметричних задач [25, 29, 35]. Розв'язки які можуть бути отримані безпосередньо із знання якої-небудь області ліній ковзання, називаються прямими. Коли інформації про форму початкових ліній ковзання недостатньо, то використовують непрямі (обернені та напівобернені) методи [27, 36]. Задача розв'язується методом спроб і помилок або матрично-операторним методом [27]. Цим методом виконано аналіз великої кількості процесів обробки тиском. Однак труднощі які виникають при врахуванні складної реології металу, температурних полів, а також обмеження використання методу для розв'язку осесиметричних та об'ємних за-

дач, привели до необхідності розвитку інших методів, які мають більшу універсальність, хоча також не завжди є точними.

В 60-ті роки минулого століття почав розвиватись метод аналізу процесів обробки металів тиском, заснований на принципі рівності робіт зовнішніх і внутрішніх сил на можливих переміщеннях з використанням варіаційних принципів для пошуку кінематично можливих полів і сил деформування, які задовольняли б заданим умовам навантаження. Основи метода розроблені в роботах І. Я. Тарновського, О. А. Ганаго, А. А. Поздєєва, В. Л. Колмогорова, Л. Г. Степанського, А. Г. Овчіннікова та ін. Варіаційний метод розв'язку задач теорії пластичності оснований на теоремах про екстремальні властивості поля швидкостей деформацій і поля напружень. Разом з дійсними розглядаються статично допустимі поля напружень і кінематично можливі поля швидкостей: перші із них задовольняють умовам рівноваги, пластичності та граничним умовам для напружень; другі – умові нестисливості, сумісності деформацій і граничним умовам для швидкостей. На основі відомих теорем будуються варіаційні функціонали і задача зводиться до пошуку полів, при яких варіаційні функціонали приймають екстремальні значення.

Розроблено ряд варіаційних принципів: віртуальних швидкостей і напружень, віртуальних переміщень і напружень, віртуальних швидкостей, віртуальних напружень, мінімуму повної потужності та ін., які дозволяють ефективно розв'язувати різні класи задач обробки металів тиском. Особливо поширені методи верхньої і нижньої оцінки сил деформування, які мають велике значення для практики [25, 27, 29, 37]. При використанні прямого варіаційного методу наближений розв'язок крайової задачі зазвичай приймають в вигляді лінійної комбінації координатних функцій з варіюємими числовими коефіцієнтами. Ці координатні функції повинні задовольняти заданим граничним умовам для швидкостей (при розв'язку задачі в швидкостях) або для напружень (при розв'язку задачі в напруженнях) [38–41]. Від того, наскільки вдало вибрані координатні функції, залежить точність розв'язку і складність алгоритму. Тому, проблема вибору координатних функцій обмежує використання цих методів.

Однак, варіаційно-енергетичний підхід має значні переваги. Головна із них – це узагальненість підходу. При постановці задачі не ставиться обмежень на реологічні властивості середовища, тобто можна досліджувати моделі від лінійно-пружних до пружно-пластичних з нелінійним зміцненням. Не ставляться також обмеження на геометричні характеристики досліджуваного процесу. Граничні умови в даному методі можуть бути самими різними (однорідними і неоднорідними, періодичними, по Діріхле і по Нейману). Тобто, є можливість варіювати розподілом сил контактного тертя і умовами зовнішнього теплообміну.

Починаючи з 50-х років минулого століття, в зв'язку з бурхливим розвитком обчислювальної техніки, значний розвиток отримали чисельні методи. Всі чисельні методи можна поділити на три групи: сіточні, проекційні та проекційно-сіточні.

Метод сіток (метод скінчених різниць) використовується для чисельного розв'язку диференціальних рівнянь в частинних похідних (в тому числі нелінійних і нестационарних) з початковими та граничними умовами [42]. Метод скінчених різниць дозволяє розв'язати диференціальне рівняння будь-якого типу, однак, він найбільш ефективний при розв'язку еліптичних та параболічних рівнянь в областях простої форми і з граничними умовами по Діріхле [43]. В інших випадках метод скінчених різниць менш ефективний. Другим недоліком методу є складність урахування криволінійних границь досліджуваних областей [44].

При розв'язку задач теорії пластичності метод скінчених різниць використовується для розв'язку задач методом ліній ковзання, а також методом функцій току. В деяких випадках доцільне сумісне використання метода скінчених різниць і варіаційно-енергетичного. При розв'язку задач в варіаційно-різницевій постановці труднощі при апроксимації граничних умов по Нейману зникають. Для врахування криволінійності границі використовують різні варіанти відображення досліджуваної області на іншу правильної форми. В цьому випадку також зростає складність побудови розв'язку.

Під проекційними розуміють велику групу методів чисельного розв'язку, в загальному випадку, операторних рівнянь. При цьому в

ЛІТЕРАТУРА

1. Теорияковки и штамповки / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров, и др.; Под общ. ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с.
2. Рвачёв М. Л. Метод R-функций в задачах теории упругости и пластичности / В. Л. Рвачёв, Н. С. Синекон. – К.: Наук. думка, 1990. – 216 с.
3. Тарновский И. Я. Теория обработки металлов давлением (теория пластичности) / И. Я. Тарновский. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
4. Норицын А. А. Влияние профиля матричной воронки на параметры процесса прямого прессования / А. А. Норицын, И. Л. Акаро, В. И. Перфилов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1971. – № 12. – С. 1–8.
5. Норицын А. А. Оптимизация профиля матриц при прессовании из условия повышения стойкости / А. А. Норицын, И. Л. Акаро, В. И. Перфилов // Исследование и внедрение прогрессивной технологии штамповки. – М.: МАМИ, 1971. – С. 106–116.
6. Прозоров Л. В. Прессование стали и тугоплавких металлов / Л. В. Прозоров. – М.: Машиностроение, 1969. – 244 с.
7. Сафаров Ю. С. К вопросу оптимальной геометрии инструмента при прессовании / Ю. С. Сафаров, В. И. Гаращенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1971. – № 12. – С. 8–11.
8. Унксов Е. П. Методы моделирования процессов обработки давлением / Е. П. Унксов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1975. – № 4. – С. 1–5.
9. Ренне И. П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки / И. П. Ренне. – Тула: ТПИ, 1970. – 146 с.

10. Дель Г. Д. Метод делительных сеток / Г. Д. Дель, Н. А. Новиков. – М. : Машиностроение, 1979. – 144 с.

11. Шэбейк А. Решение на ЦВМ методом визиопластичности задачи осесимметричного прессования через матрицу с криволинейной образующей / А. Шэбейк // Труды американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. – 1972. – № 4. – С. 273–279.

12. Алюшин Ю. А. Стандартные программы расчета процессов пластической деформации на ЭВМ / Ю. А. Алюшин, Б. Н. Березовский, Г. И. Жигулев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1971. – № 6. – С. 1–4.

13. Сегал В. М. Технологические задачи теории пластичности / В. М. Сегал. – Минск : Наука и техника, 1977. – 256 с.

14. Завьялов Ю. С. Методы сплайн-функций / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. Л. Мирошниченко. – М. : Наука, 1980. – 352 с.

15. Огородников В. А. Экспериментально-расчетное определение деформаций в условиях осесимметричного прессования с помощью ЭВМ / В. А. Огородников, В. Д. Покрас // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. – Тула : ТПИ, 1985. – С. 49–55.

16. Михалевич В. М. Программа сглаживания экспериментальных данных кубическими сплайнами / В. М. Михалевич. – К. : УРФАП, 1979. – 29 с.

17. Огородников В. А. Применение сплайн-функций в методе визиопластичности для определения деформаций при выдавливании и волочении / В. А. Огородников, В. М. Михалевич, В. Д. Покрас // Опτικο-геометрические методы исследования деформаций и напряжений и их стандартизация: I Всесоюзный семинар: тезисы докл. – Горький, 1982. – С. 131–132.

18. Акаро И. Л. Сглаживание данных визиопластических исследований бикубическими сплайнами / И. Л. Акаро, В. П. Суслин,

В. И. Перфилов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1983. – № 11. – С. 54–58.

19. Брынза В. В. Комбинированная эйлерово-лагранжевая аппроксимация объемного пластического течения по данным метода координатных сеток / В. В. Брынза, В. К. Воронцов, В. Ю. Лапинер // Оптико-геометрические методы исследований деформаций и напряжений: науч.-техн. сб. – Челябинск : ЧПИ, 1986. – С. 76–78.

20. Аппроксимация полей перемещений при пластической деформации многомерными сплайнами / В. В. Брынза, В. К. Воронцов, В. Ю. Лапинер, А. А. Перченко // Изв. ВУЗов Черная металлургия. – 1986. – № 7. – С. 55–58.

21. Мусіяка В. Г. Основи чисельних методів механіки / В. Г. Мусіяка. – К. : Вища освіта, 2004 – 240 с.

22. Молчанов И. Н. Машинные методы решения прикладных задач. Алгебра, приближение функций / И. Н. Молчанов. – К. : Наукова думка, 1987. – 288 с.

23. Применение кубических сплайн-функций для аппроксимации экспериментальных данных / Е. И. Коцюбивская, И. О. Сивак, С. И. Сухоруков, А. Я. Мысловский // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 124–128.

24. Апроксимація експериментальних даних кубічними сплайн-функціями / К. І. Коцюбівська, В. І. Клочко, С. І. Сухоруков, А. В. Чубатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 3 (66). – С. 21–30.

25. Джонсон В. Механика процессов выдавливания / В. Джонсон, Х. Кудо. – М. : Металлургия, 1965. – 174 с.

26. Джонсон У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор. – М. : Машиностроение, 1979. – 567 с.

27. Унксов Е. П. Теория пластических деформаций / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др.; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 598 с.
28. Унксов Е. П. Инженерная теория пластичности / Е. П. Унксов. – М. : Машгиз, 1959. – 328 с.
29. Томсон Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсон, С. Янг, Ш. Кобояши. – М. : Машиностроение, 1969. – 503 с.
30. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М. : Гостехиздат, 1956. – 407 с.
31. Соколовский В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.
32. Христианович С. А. Некоторые новые вопросы сплошных сред / С. А. Христианович, С. Г. Михлин, Б. Б. Девисон. – М. : Изд-во АН СССР, 1938. – 358 с.
33. Томлёнов А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томлёнов. – М. : Metallurgy, 1972. – 408 с.
34. Красневский С. М. Разрушение металлов при пластическом деформировании / С. М. Красневский, Е. М. Макушок, В. Я. Щукин. – Минск : Наука и техника, 1983. – 173 с.
35. Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М. : Наука, 1969. – 420 с.
36. Ключников В. Д. Математическая теория пластичности / В. Д. Ключников. – М. : МГУ, 1979. – 298 с.
37. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Metallurgy, 1986. – 688 с.
38. Шевченко К. Н. Основы математических методов в теории обработки металлов давлением / К. Н. Шевченко. – М. : Высшая школа, 1970. – 351 с.

39. Гун Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – М. : Metallurgia, 1983. – 352 с.
40. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением / В. А. Евстратов. – Харьков : Выща школа, 1981. – 248 с.
41. Победря Б. Е. Численные методы в теории упругости и пластичности / Б. Е. Победря. – М. : Из-во Моск. ун-та, 1981. – 344 с.
42. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М. : Мир, 1986. – 318 с.
43. Самарский А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. – М. : Наука, 1978. – 592 с.
44. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 612 с.
45. Флетчер К. Численные методы на основе метода Гальоркина. / К. Флетчер. – М. : Мир, 1988. – 352 с.
46. Марчук Г. И. Введение в проекционно-сеточные методы / Г. И. Марчук, В. И. Агошков. – М. : Наука, 1984. – 416 с.
47. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 542 с.
48. Oh S. I. Finite element analysis of metal forming problems with arbitrarily shaped dies / S. I. Oh // Int. J. of mechanical science. – 1982. – Vol. 5. – P. 214–217.
49. McMecking R. M. Finite element formulation for problems of large elasto-plastic deformation / R. M. McMecking, J. R. Rice // Int. J. Solids Struct. – 1975. – Vol. 11. – P. 601–616.
50. Гидропрессование труб / В. Ф. Балакин, Г. А. Фень, В. И. Кузьменко и др. – К. : Техника, 1986. – 136 с.
51. Стеблюк В. І. Математичне моделювання процесу витягування з профільної заготовки / В. І. Стеблюк, В. Л. Калюжний, О. В. Калюжний // Вестник НТУУ КПИ. Машиностроение, вып.45. – 2004. – С. 30–33.

52. Стеблюк В. І. Математичне моделювання попереднього профілювання заготовок для витяжки виробів спеціального призначення / В. І. Стеблюк, В. Л. Калюжний, О. В. Калюжний // Технологические системы. – 2002. – № 3 (14). – С. 50–53.

53. Поздеев А. А. Большие упругопластические деформации / А. А. Поздеев, П. В. Трусов, Ю. И. Няшин. – М. : Наука, 1986. – 232 с.

54. Михайлов О. В. Особливості розподілу густини при пресуванні агломерованих нано-порошкових систем / О. В. Михайлов, А. Л. Максименко, М. Б. Штерн // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»), Випуск 20. – Луцьк, травень 2007. – С. 305–310.

55. Михайлов О. В. Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы прессования на распределение плотности. II. Методика моделирования и анализ схем формования / О. В. Михайлов, М. Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 2003. – № 3/4. – С. 7–16.

56. Михайлов О. В. Компьютерное моделирование процесса теплового прессования порошков в жестких матрицах: влияние неравномерности нагрева / О. В. Михайлов, М. Б. Штерн, Ю. А. Панфилов // Порошковая металлургия. – 2006. – № 3/4. – С. 109–213.

57. Матвеев С. А. Возможности конечно-элементного анализа при решении технологических задач обработки металлов давлением / С. А. Матвеев, В. С. Мамутов, К. М. Иванов // Металлообработка. – 2003. – № 1. – С. 23–28.

58. Иванов К. М. Метод конечных элементов в технологических задачах : Учебн. пособие / К. М. Иванов, В. С. Шевченко, Э. Е. Юргенсон. – СПб. : Изд-во ПИМаш, 2000. – 224 с.

59. Степанский Л. Г. Об опытной проверке результатов компьютерного моделирования процессов пластического деформирования / Л. Г. Степанский // КШП–ОМД. – 2001. – № 6. – С. 36–40.

60. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твердого тела / С. Крауч, А. Старфилд. – М. : Мир, 1987. – 328 с.

61. Telles J. C. F. New developments in Elastoplastic Analysis / J. C. F. Telles, C. A. Brebbia // Third international seminar “Boundary Element Method”, Irvin, California, July, 1981. – P. 350–370.

62. Brebbia C. A. Industrial Application of the Boundary Element Method / C. A. Brebbia, M. Y. Aliabadi. – Computational Mechanic Publications, 1993. – 200 p.

63. Trevelyan J. Boundary Elements for Engineers (Theory and Applications) / J. Trevelyan. – Computational Mechanic Publications, 1994. – 228 p.

64. Alexander I. On the Cold Extrusion of Flanges against High Hydrostatic Pressure / I. Alexander, B. Lengyel // I. Inst. Metals. – 1964 – 1965. – Vol. 93, Part 5. – P. 137–145.

65. Kudo H. Investigation into multiaxial extrusion process to form branched parts / H. Kudo, K. Shinozaki // Proc. Int. Conf. Prog. Eng. Tokyo. – 1974. – № 1. – P. 314–319.

66. Алиев И. С. Определение силовых параметров при радиальном выдавливании / И. С. Алиев // Обработка металлов давлением. – Ростов н/Д., 1983. – С. 93–100.

67. Geiger R. Precision forging by means of radial extrusion presses / R. Geiger // 7th International congress Cold Forging. – Birmingham, 1985. – P. 117–125.

68. Пасько А. Н. Холодная объемная штамповка осесимметричных заготовок: монография / А. Н. Пасько. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2004. – 252 с.

69. Воронцов А. Л. Деформированное состояние заготовки при радиальном выдавливании / А. Л. Воронцов // Вестник машиностроения. – 1999. – № 10. – С. 36–40.

70. Qin Y. An approach for the forming of large-thickness-flange components by injection forging / Y. Qin, R. Balendra // J. Mater. Process. Techn. – 2004. – № 2. – P. 153–162.

71. Новожилов В. В. О пластическом разрыхлении / В. В. Новожилов. – Прикладная математика и механика. – 1965. – т. 29. – С. 681–689.

72. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Вища школа, 1983. – 175 с.

73. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.

74. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов : в 3 т., Т.1: Физико-механические основы пластической деформации / С. И. Губкин. – М. : изд. лит. по черной и цветной металлургии, 1961. – 376 с.

75. Бабичков В. А. Об экспериментальных теоретических основаниях механической теории прочности / В. А. Бабичков // Труды МИИТ. – М. : Трансжелдориздат. – 1951. – С. 15–19.

76. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1968. – 272 с.

77. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 229 с.

78. Дель Г. Д. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением / Г. Д. Дель, В. А. Огородников, В. Г. Нахайчук // Изв. вузов. Машиностроение. – 1975. – № 4. – С. 135–140.

79. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.

80. Богатов А. А. Ресурс пластичности при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М. : Metallurgia, 1984. – 144 с.

81. Важенцев Ю. Г. Прочность и пластичность материалов под гидростатическим давлением / Ю. Г. Важенцев. – Томск : ТПИ, 1978. – 87 с.

82. Сивак И. О. Пластичность металлов при холодной пластической деформации / И. О. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ-Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 168–171.

83. Нахайчук О. В. Комплексный подход к оценке деформируемости заготовок в процессах внедрения клина / О. В. Нахайчук // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2003. – С. 110–116.

84. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение.(задачи автотехнической экспертизы) / В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, И. О. Сивак. – Винница : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005. – 204 с.

85. Shtern M. The effect of third invariant of stress tensor on mechanical behaviour of porous bodies / M. Shtern, A. Maydanuyk, A. Cocks // Constitutive equations, Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – V. 41. – 2001. – № 7. - P. 390–398.

86. Shtern M. B. Effect of a Third Invariant on the Properties and Structure of Constitutive Relationships for Powder Materials. /M. B. Shtern, A. V. Kuzmov // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – Volume 42. – № 7–8 (July). – 2003. – P. 329–335.

87. Алиева Л. И. Оценка деформируемости металлов при холодном выдавливании энергетическим методом / Л. И. Алиева // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 346–350.

88. Штерн М. Б. Определение ресурса пластичности порошковых материалов на основе модели пластического течения пористых тел / М. Б. Штерн, В. Д. Дуднов // Порошковая металлургия. – 1999. – № 11/12. – С. 31–40. – 2000. – №1/2. – С. 9–13.

89. Писаренко Г. С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряжённом состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – К. : Наукова думка, 1969. – 211 с.

90. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. – т. 1. – 472 с.

91. Sivas I. O. The evaluation of Deformability of the Porous Bodeis / I. O. Sivas // The Bulletin of Politehnic Institute of Jassi. – 1996. – XLII(XLVI). – № 3 – 4. – P. 607 – 611.

92. Сивак І. О. Оцінка деформованості пористих тіл при обробці тиском / І. О. Сивак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1994. – № 1(2). – С. 79–82.

93. Сивак И. О. Пластичность металла при плоском напряжённом состоянии / И. О. Сивак // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. – Краматорск : ДГМА, 1998. – вып. 4. – С. 254–257.

94. Коцюбивская Е. И. Определение напряжений и деформируемости заготовок при радиальном выдавливании / Е. И. Коцюбивская // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематичний зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 359–364.

95. Сивак И. О. Оценка пластичности металлов при холодной пластической деформации / И. О. Сивак, Е. И. Сивак, С. И. Сухоруков // Известия ТулГУ. Серия: Механика твердого деформируемого тела и обработка металлов давлением. – Тула : ТулГУ, 2007. – Вып. 2. – С. 114–121.

96. Пат. 63208А України, G01N3/28. Спосіб випробування металевих зразків для визначення граничної пластичної деформації /

І. С. Алієв, І. Г. Савчинський, Л. І. Алієва, К. І. Сивак (Україна). – № 2003021779; Заявл. 28.02.2003; Опубл. 15.01.2004, Бюл. №1.

97. Огородников В. А. Диаграммы пластичности и особенности их построения / В. А. Огородников, И. Ю. Кирица, В. И. Музычук // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 251–255.

98. Огородников В. А. Влияние гидростатического давления на пластичность при сложном нагружении / В. А. Огородников, И. О. Сивак // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – №11 – С. 33–37.

99. Костава А. А., Сивак И. О. Условие разрушения материалов деформируемых при высоких гидростатических давлениях / А. А. Костава, И. О. Сивак // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – № 13 – С. 3–6.

100. Буренников Ю. А. Применение промежуточных отжигов для улучшения механических характеристик заготовок, получаемых при поперечном выдавливании / Ю. А. Буренников, Е. И. Сивак, Л. И. Алиева // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 384–387.

101. Сивак И. О. Пластичность металлов при объёмном напряжённом состоянии / И. О. Сивак, Е. И. Коцюбивская // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ–Хмельницький : ДДМА, 2007. – С.73–76.

102. Коцюбивская Е. И. Влияние промежуточных отжигов на механические характеристики заготовок, получаемых при поперечном выдавливании / Е. И. Коцюбивская, В. А. Огородников, И. О. Сивак // Наукові нотатки: міжвузівський збірник. – Луцьк : ЛДТУ, 2007. – С. 203–205.

103. Сивак И. О. Поверхность предельной пластичности / И. О. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в

металургії і машинобудуванні: тематич.зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – С. 9–15.

104. Буренников Ю. А. Зависимость пластичности от схемы напряжённого состояния при плоском напряжённом состоянии / Ю. А. Буренников, И. О. Сивак, Е. И. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 272–274.

105. Коцюбивская Е. И. Пластичность металлов при плоском напряжённом состоянии / Е. И. Коцюбивская, Л. И. Алиева // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: междунар. научн.–техн. конф.: тезисы докл. – Санкт-Петербург : БГТУ „Военмех”, 2005. – С. 86–90.

106. Коцюбивская Е. И. Решение задачи деформируемости для плоского напряженного состояния / Е. И. Коцюбивская // Застосування теорії пластичності в сучасних технологіях обробки тиском і автотехнічних експертизах: міжнар. наук.–техн. конф.: тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – С. 123 – 125.

107. Нахайчук О. В. Оценка пластичности металлов при объёмном напряжённом состоянии / О. В. Нахайчук, Р. И. Сивак // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – №5. – С. 149–152.

108. Костава А. А. Влияние объёмной схемы напряжённого состояния на пластичность / А. А. Костава, В. А. Огородников, И. Г. Савчинский // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. – Тула : ТПИ, 1977. – Вып. 4. – С. 126–135.

109. Нахайчук О. В. Методы расчёта процессов холодной обработки давлением / О. В. Нахайчук // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 119–123.

110. Umform- und Zerteiltechnik / Manuskript. Herausgeber: Prof. R. Neugebauer / Chemnitz : Fraunhofer-institut IWU, 2005. – 632 p.

111. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием / Под ред. В. М. Авдеева, В. В. Риса, А. М. Шелестеева. – Л. : Политехника, 1991. – 351 с.

112. Ренне И. П. Холодное выдавливание алюминиевых сплавов / И. П. Ренне, Ю. В. Подливаев. – Тула : ТГУ, 2000. – 336 с.

113. Fereshteh-Saniee F. A. New CAD system for finisher die design of an axisymmetric forging component with arbitrary profile / F. Fereshteh-Saniee, B. A. Daneshzad-Moghaddam // J. Mater. Process. Technol. – 2004. – № 6. – P. 157–163.

114. Ковка и штамповка: Справочник в 4 т. / Под ред. Е. И. Семенова и др. – М. : Машиностроение, 1987. – Т.3: Холодная объемная штамповка / Под ред. Г. А. Навроцкого. – 384 с.

115. Кузнецу-штамповщику: Справочное пособие / Под ред. Л. Н. Соколова. – Донецк : Донбасс, 1986. – 144 с.

116. Feldmann Heinz D. Kaltmassivumformung / D. Feldmann Heinz // VDI-Z. Integr. Prod. – 2001. – № 1. – P. 63–70.

117. Lange K. Cold forging today and tomorrow / K. Lange // 7-th International Congress Cold Forging. – Birmingham, 1985. – P. 3–14.

118. Geiger R. Precision forging by means of radial extrusion presses / R. Geiger // 7 th International congress Cold Forging. – Birmingham, 1985. – P. 117–125.

119. Артес А. Э. Алюминиевые сплавы в производстве деталей механизмов и машин (Штампованные поковки): методические указания / А. Э. Артес. – М. : МГТУ «Станкин», 2004. – 56 с.

120. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, С. С. Яковлев, Я. А. Соболев – Тула : Машиностроение–1, 2003. – 427 с.

121. Савчинский И. Г. Современные тенденции развития методов изотермического пластического деформирования / И. Г. Савчинский // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і

машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 154–156.

122. Строганов Г. Б. Сверхпластичность при обработке материалов давлением / Г. Б. Строганов, О. А. Кайбышев, О. Х. Фаткуллин. – М. : Изд-во МААТИ-РГТУ, 2000. – 93 с.

123. Einsatzpotenzial des Tixschmiedens // Technica. – 2002. – № 10. – S. 12–16.

124. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Харьков : Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 144 с.

125. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием / Под ред. В. М. Авдеева, В. В. Риса, А. М. Шелестеева. – Л. : Политехника, 1991. – 351 с.

126. Спусканюк В. З. Развитие теории и методов гидроэкструзии / В. З. Спусканюк // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 206–215.

127. Бейгельзимер Я. Е. Физическая механика гидростатической обработки материалов / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Б. М. Эфрос. – Донецк : Изд-во Дон. физ.-техн. ин-та им. А. А. Галкина НАН Украины, 2000. – 192 с.

128. Артес А. Э. Холодная объемная штамповка в мелкосерийном и серийном производстве / А. Э. Артес. – М. : НИИМАШ, 1982. – 58 с.

129. Гафуров Р. М. Прогрессивные технологии холодной объемной штамповки в ОАО “ГАЗ” / Р. М. Гафуров, Ф. П. Михаленко // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – № 4. – С. 14–18.

130. Spezialist für die Kaltmassivumformung // Umformtechnik. – 2001. – № 2. – P. 30–32.

131. Бирбраер Р. А. Повышение эффективности производства на примере изготовления заготовок корпусов автомобильных свечей /

Р. А. Бирбраер, И. Ф. Брыкин, Е. Ю. Горбунов // КШП-ОМД. – 2004. – № 6. – С. 17–19.

132. Jontschew R. Mit einem Gegendruck-Werkzeug Kegelformige Bouteile formen / R. Jontschew // Maschinenmark. – 2000. – № 37. – P. 36–38.

133. Пат. 19832503 Германия, МПК В 21 К 1/76. Verfahren zum Herstellen eines rotationssymmetrischen Formteils und zugehöriges Werkzeug : Пат. 19832503 Германия, МПК В 21 К 1/76 / Sinner R., Bretting W. (Германия); INA Walzlager Schaeffer/ – № 19832503.7; Заявл. 20.07.98, Опубл. 27.01.00.

134. Хван Д. В. Повышение эффективности в обработке металлов давлением / Д. В. Хван. – Воронеж : Изд-во Воронежского ун-та, 1995. – 224 с.

135. Kudo H. Cold forging of hollow cylindrical components having an intermediate flange – Ubet analysis and experiment / H. Kudo, B. Avitzur, T. Yoshiki // CIRP Annalen. – 1980. – № 1. – P. 129–133.

136. Формообразование фланцев при холодном выдавливании осесимметричных деталей / И. С. Алиев, Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, И. Г. Савчинский // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 221–225.

137. Дмитриев А. М. Прогнозирование утяжин при штамповке / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // Справ. инж. ж. – 2004. – № 11. – С. 29–32.

138. Алиев И. С. Прогнозирование дефектообразования при выдавливании / И. С. Алиев, К. Крюгер // Теория, технология оборудования и автоматизация обработки металлов давлением, резанием: сб. науч. тр., Вып. 1. – Тула : ТулГУ, 1999. – С. 87–90.

139. Валиев Р. З. Парадокс интенсивной пластической деформации металлов / Р. З. Валиев, И. В. Александров // Доклады РАН. – 2001. – № 6. – С. 34 – 37.

140. Бейгельзимер Я. Е. Физическая механика гидростатической обработки материалов / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Б. М. Эфрос. – Донецк : ДонФТИ, 2000. – 192 с.

141. Огородников В. А. Деформируемость металлов при холодной объёмной штамповке / В. А. Огородников // Пути совершенствования технологии холодной объёмной штамповки и высадки: Всесоюзн. науч.-техн. конф: тезисы докл. – Омск. – 1978. – С. 17 – 19.

142. Огородников В. А. Феноменологические аспекты развития проблемы деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников, И. О. Сивак // Вопросы теории пластичности в современной технологии: Всесоюзный симпозиум: тезисы докл. – М. : МГУ. – 1985. – С. 15–16.

143. Прозоров Л. В. Прессование металлов жидкостью высокого давления / Л. В. Прозоров, А. А. Костава, В. Д. Ревтов. – М. : Машиностроение, 1972. – 152 с.

144. Исследования пластичности металлов под гидростатическим давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, В. Ф. Шишминцев, Ю. А. Аксенов // Физика металлов и металловедение. – 1978. – т. 45, вып. 5. – С. 1089–1094.

145. Влияние высоких давлений на вещество. В 2-х т. / В. И. Зайцев, В. В. Токий, Б. И. Береснев и др.; под. ред. Б. И. Береснева. – К : Наук. думка, 1987.– 256 с. (т.1), 232 с. (т.2).

146. Калюжний В. Л. Математичне моделювання процесу холодного видавлювання з протитиском стаканів методом скінчених елементів / В. Л. Калюжний // Наукові вісті національного технічного університету України „КПІ”. – 2001. – № 4. – С. 88–93.

147. Калюжний В. Л. Холодне видавлювання порожнин штампів, пресформ та ливформ в умовах високих гідростатичних тисків в осередку деформації / В. Л. Калюжний // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ-Хмельницький : ДДМА, 2002. – С. 66–68.

148. Виготовлення заготовок карбувальних штампів холодним пресуванням / М. П. Стародуб, В. І. Стеблюк, В. Л. Калюжний та ін. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 226–230.

149. Алиев И. С. Теоретический анализ процесса выдавливания фланцев с противодавлением / И. С. Алиев // Физика и техника высоких давлений. – 1990. – Вып. 34. – С. 42–46

150. Овчинников А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах / А. Г. Овчинников. – М. : Машиностроение, 1983. – 200 с.

151. Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 6. – С. 1–4.

152. Ермаков М. З. Производство профилей из алюминиевых сплавов / М. З. Ермаков, В. И. Фейгин, Н. А. Сухоруков. – М. : Металлургия, 1977. – 264 с.

153. Алиев И. С. Систематизация информации для разработки процессов выдавливания в разъемных матрицах / И. С. Алиев, А. И. Лобанов, О. К. Савченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА. – 2001. – С. 194–198.

154. Буренніков Ю. А. Напружено-деформований стан та граничне формозмінення при радіальному видавлюванні / Ю. А. Буренніков, К. І. Коцюбівська // Вісник ВПІ. – 2006. – № 4 (67). – С. 63–72.

155. The influence of non-monotonic loading on plasticity during the process of radial extrusion with contour upsetting / Y. A. Burennikov, I. O. Sivak, K. I. Kotsubivska, S. Z. Yablonska // Tehnomus XIII Tehnologii si produse noi in constructia de masini, Editura Universitatii Suceava. – Suceava, 2005. – P. 211–216.

156. Алиев И. С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – №2. – С. 7–9.

157. Носаков А. А., Солодун Е. М., Алиева Л.И. Прогнозирование дефектов типа утяжин при точной штамповке выдавливанием / А. А. Носаков, Е. М. Солодун, Л. И. Алиева // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ-Хмельницький : ДДМА, 2002. – С. 105–110.

158. Поперечное выдавливание пористой заготовки с использованием гидростатического давления / Ю. А. Буреников, Л. Г. Козлов, Е. И. Сивак, Р. И. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич. збірник наукових праць. – Краматорськ-Хмельницький : ДДМА, 2002. – С. 159–162.

159. Deformability of workpieces in the process of lateral extrusion using hydrostatic pressure / Y. A. Burennikov, I. Sivak, L. Kozlov, K. Sivak // Bulletin of the polytechnic institute of Iassy, Tomul XLVIII(LII), Fasc. 3–4. – 2002. – P. 199–203.

160. Алиев И. С. Моделирование процесса радиального выдавливания фланцев с применением противодействия / И. С. Алиев, Е. Г. Жбанков, Е. И. Коцюбивская // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 53 – 58.

161. Алиев И. С. Оценка пластичности металла при поперечном выдавливании с противодействием / И. С. Алиев, Е. И. Сивак // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров: 49-я Международная научно-техническая конференция ААИ, 23-24 марта 2005 г. : – тезисы докл. – М. : МГТУ «МАМИ», 2005. – С. 19–20.

162. Борисов Р. С. Выдавливание с дополнительными воздействиями на деформируемую заготовку / Р. С. Борисов, Е. И. Коцюбивская // Интеллект молодых – производству 2005:

IV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і спеціалістів, 14–18 листопада 2005 г.: – тези докл. – Краматорськ : АО «НКМЗ», 2005. – С. 67–68.

163. Жбанков Я. Г. Радіальне видавлювання порожніх виробів за допомогою протидавлення / Я. Г. Жбанков, Е. І. Коцюбівська // Технологія – 2006: ІХ Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, 13-14 квітня 2006 р. : – тези докл. – Сєвєродонецьк, 2006. – С. 11.

164. Simulation process of friction of rough surfaces / I. O. Sivak, V. V. Savulyak, S. I. Sukhorukov, K. I. Sivak // Bulletin of the polytechnic institute of Iassy. – 2001. – Tomul XLVII(LI), Fasc. 1–2. – P. 191–194.

165. Надаи А. Пластичность и разрушение твёрдых тел / А. Надаи. – М : Издательство ИЛ, т. 1, 1954. – 647 с., т. 2, 1969. – 863 с.

166. Программный комплекс для моделирования двумерных процессов пластического течения при обработке металлов давлением. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки / А. В. Власов, Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, В. А. Демин // Министерство образования РФ. – ОФАП. – Номер гос. рег. 50200400053.

167. Сторожев–М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

168. Пат. 68115А України, В21К21/00. Спосіб виготовлення деталей з наскрізним отвором / Л. І. Алієва, І. Г. Савчинський, О. І. Лобанов, К. І. Сивак (Україна). - № 2003109157; Заявл.10.10.2003; Опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7.

169. Капорович С. В., Алиева Л. И., Михеенко Д. Ю. Численное математическое моделирование распределений напряжений и деформаций при поперечном выдавливании осесимметричных деталей с относительно тонким фланцем / С. В. Капорович, Л. И. Алиева, Д. Ю. Михеенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич.зб. наук. пр. – Краматорськ-Хмельницький : ДДМА, 2002. – С. 66–68.

170. Пат. 67977А України, В21К21/00. Спосіб видавлювання порожнистих деталей / І. С. Алієв, І. Г. Савчинський, Л. І. Алієва, К. І. Сивак (Україна). – № 2003077078; Заявл. 28.07.2003; Опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7.

171. Богатов А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М. : Металлургия, 1984. – 144 с.

172. Алиев И. С. Пластичность металла при многократной холодной деформации с промежуточными отжигами / И. С. Алиев, И. О. Сивак, Р. И. Сивак // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: сб. нач. тр. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Вып. 4. – С. 203–207.

173. Огородников В. А. О влиянии истории деформирования на восстановление запаса пластичности при деформировании с промежуточной термообработкой / В. А. Огородников, О. Л. Гайдамак, А. О. Гайдамак // Тяжёлое машиностроение. – 2006. – № 3. – С. 11–13.

174. Оценка использованного ресурса пластичности при комбинированном выдавливании с промежуточными отжигами / И. О. Сивак, В. А. Огородников, Р. И. Сивак, И. С. Алиев // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машино-будуванні: зб. наук. пр. – Краматорськ–Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 165–167.

175. Сивак И. О. Применение промежуточных отжигов для улучшения технологического наследия заготовок, получаемых при поперечном выдавливании / И. О. Сивак, Ю. А. Буренников, Е. И. Сивак // Машинобудування та металообробка – 2003: Перша Міжнар. наук.–техн. конф.: тези доп. – Кіровоград. – 2003. – С. 210–211.

176. Огородников В. А. Оценка безотказности и долговечности деталей машин на основе теории деформируемости / В. А. Огородников, Н. В. Бабак, Е. И. Сивак // Захист металургійних машин від поломок: міжвуз. темат. зб. наук. пр. – Маріуполь : ПДТУ, 2002. – Випуск № 6. – С. 56–60.

Наукове видання

**Коцюбівська Катерина Іванівна
Буренніков Юрій Анатолійович
Сивак Іван Онуфрійович**

**РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ З ПРОТИТИСКОМ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено К. Коцюбівською

Підписано до друку 01.06.2011 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 18,02
Наклад 100 прим. Зам № 2011-116

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.