

ІІІ. СТВОРЕННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРЕСИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

УДК 621.774

Нахайчук О.В.

Музичук В.И.

(Вінницький національний аграрний університет)

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМУЄМОСТІ І ЯКОСТІ ЗАГОТОВОК В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ

Представлен подход к расчёту граничных деформаций, учитывающий влияние различных инвариантов тензора напряжений на ресурс пластичности в опасных областях деформирования при формообразовании заготовок, немонотонность нагружения и нелинейность накопления повреждений. Данный подход может быть использован для оптимизации и совершенствования исследуемых процессов обработки металлов давлением.

The method is developed near the calculation of scope deformations, taking into account influence of different invariants of tensor of stress on the resource of plasticity in the dangerous regions of deformation at forming of purveyances, non-monotony of loading and non-linearity of accumulation of damages, is developed. A method can be used for optimization and perfection of the explored processes in treatment of metals by pressure.

Вступ

В технологічній практиці широке застосування знайшли феноменологічні теорії, в основі яких лежить гіпотеза про залежність пластичності від історії навантажень, яка задається в просторі напружень. Характеристиками напруженого стану можуть бути його показники, які дозволяють досліджувати траєкторії навантажень не в просторі тензора напружень, а в просторі його інваріантів. Має практичний інтерес проведення досліджень, результати яких дозволяють оцінювати можливості застосування діаграм пластичності, побудованих в умовах плоского або лінійного напружених станів для оцінки деформуємості металів, деформованих в умовах об'ємного напруженого стану. Рішення такої задачі пов'язане з труднощами, що виникають при проведенні спеціальних експериментів в камерах високого тиску. В роботах [1, 2] показано, що залежність пластичності від схеми напруженого стану можна характеризувати двома показниками напруженого стану. Обґрунтовано, що при об'ємному напруженому стані необхідно враховувати вплив на пластичність третього інваріанта тензора напружень [3], представлені результати досліджень залежності пластичності від інваріантів тензора напружень при гідростатичній обробці металів, а також методика побудови об'ємної діаграми пластичності для умов об'ємного напруженого стану. Наведені результати вказаних робіт дозволяють за звичайними діаграмами оцінювати граничну деформацію у випадку об'ємного формоутворення при умовах $\eta = \text{const}$, $\chi = \text{const}$, $H = 0$ (параметр, характеризуючий траєкторію кривизни деформації).

Основна частина

При традиційних дослідженнях процес навантаження задається шістьма функціями часу $\sigma_{ij}(t)$ або п'ятьма функціями $S_{ij}(t)$ і незалежною функцією часу $\sigma(t)$, що приводить до необхідності вивчення великої кількості траєкторій. Встановлено, що при одних і тих же умовах формоутворення траєкторії навантажень для різних матеріалів можуть бути різними, це потребує додаткових досліджень і створення громіздкого математичного апарату для описання кожного із процесів.

В зв'язку з викладеним для завдання траєкторії в просторі напружень ми пропонуємо використовувати два безрозмірні показники напруженого стану [3]:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3}I_2(D_\sigma)} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}; \quad \chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3}I_2(D_\sigma)} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u}. \quad (1)$$

Основна перевага підходу, при якому траєкторія навантаження задається не в шестимірному просторі напружень, а в просторі безрозмірних показників η і χ полягає в тому, що в останньому випадку вид траєкторії навантаження однозначно визначається умовами формоутворення, характерними для досліджуваного процесу, і практично не залежить від механічних властивостей деформованого металу. Це дає широкі можливості для комп'ютерного моделювання і вибирання оптимального матеріалу для виробу, для чого необхідно знати параметри коефіцієнтів апроксимації кривої течії і поверхні граничної пластичності. До того ж такий підхід значно скорочує кількість трудомістких експериментальних досліджень. Ще однією перевагою є те, що як показано в роботах [4, 5, 6], а також в дослідженнях по даній роботі - властивості дослідних матеріалів мало впливають на шляхи деформування в небезпечних областях (областях, найбільш близьких до руйнування) – відхилення становлять не більше 5 %, що узгоджується з результатами, приведеними в роботах для процесів осадження, поперечного видавлювання, холодного висаджування та ін. Побудувавши шляхи деформування для небезпечної області одного дослідного матеріалу, можна в тій же системі координат на той же графік наносити діаграми пластичності інших матеріалів, і за викладеними нижче методиками визначати сумарний використаний ресурс пластичності, тобто доцільність вибору матеріалу для даного процесу.

Для прикладу, розглянемо процес формоутворення внутрішнього шліцьового профілю на трубній заготовці методом холодного пластичного деформування. В Інституті надтвердих матеріалів АН України розроблений технологічний процес формоутворення внутрішніх шліців в трубних заготовках шляхом їх обтиску матрицею на профільну шліцьову оправку (методом “охоплюючого” протягування) [7]. Суть процесу (рис. 1) полягає в тому, що трубна заготовка 1 разом із розміщеною всередині з мінімальним зазором шліцьовою оправкою 2 по направляючій втулці 3 проштовхується пуансоном 4 через деформуючу матрицю 5, яка розташовується разом з направляючою втулкою в обоймі 6. Після обтиску по всій довжині виробу оправка випресовується. Даним способом формували прямобічний шліцьовий профіль, що відповідає профілю втулки карданного вала рульового керування автомобіля ГАЗ-3307. Процес може бути виконаним на вертикально-протяжних верстатах або на гідропресах і рекомендується як високопродуктивний, що дозволяє отримувати шліцьові втулки підвищеної точності без подальшої чистової обробки в масовому виробництві.

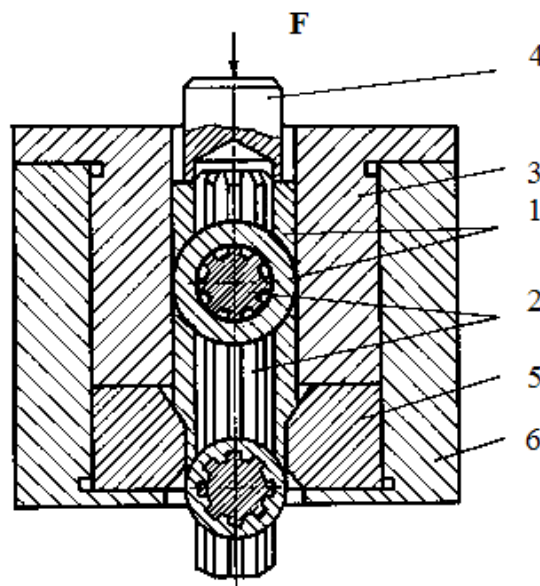


Рис. 1. - Схема процесу формоутворення внутрішніх шліців в трубних заготовках

Однак, в даному процесі осьові і радіальні зусилля досягають порядку 250 кН, а контактні тиски 1ГПа, що може негативно вплинути на довговічність обладнання і оснащення. Шліцьова оправка виготовляється суцільною, тому при виробі шліців або пошкодженні одного з них вона являється непридатною для подальшого використання. Відомо, що при обробці холодним пластичним деформуванням знижується шорсткість поверхні, підвищується її твердість і зносостійкість, створюються залишкові напруження необхідного знака, здійснюється об'ємна пластична деформація всієї товщини деталі, що приводить до підвищення її міцності. Однак, з підвищенням характеристик міцності матеріалу (границі міцності σ_B , граници текучості σ_m , твердості HB) спостерігається зниження пластичних характеристик (відносного подовження δ і відносного звуження ψ).

Виходячи з викладеного, можна зробити висновок, що для даного процесу важливим є всебічне вивчення механіки формоутворення виробів з проведення оцінки їх якості та дослідження можливості вдосконалення самого процесу.

У випадку об'ємного формоутворення поверхня пластичності залежить від історії деформування, яка визначається зміною показників напруженого стану при зростанні накопиченої інтенсивності деформацій. Поверхня пластичності в цьому випадку не є фіксованою і може бути побудована за допомогою критерію деформуємості, що може передбачати положення точки поверхні руйнування з врахуванням історії деформування.

Оцінка технологічної міцності може бути здійснена, якщо відома залежність η від накопиченого ступеня деформації в найбільш небезпечній області деформуємої заготовки, величини характерної деформації і інших параметрів процесу. Останні впливають на напружений і деформований стан в цій зоні. Такими параметрами при вдавлюванні шліца є кут профілю зуба, контактне тертя, вид змащувального матеріалу та інші. Аналіз напруженого стану показав [8], що найбільш небезпечними є області контакту шліца оправки і пластичної області та область наростування (зображена напівколом під шліцем), рис. 3.

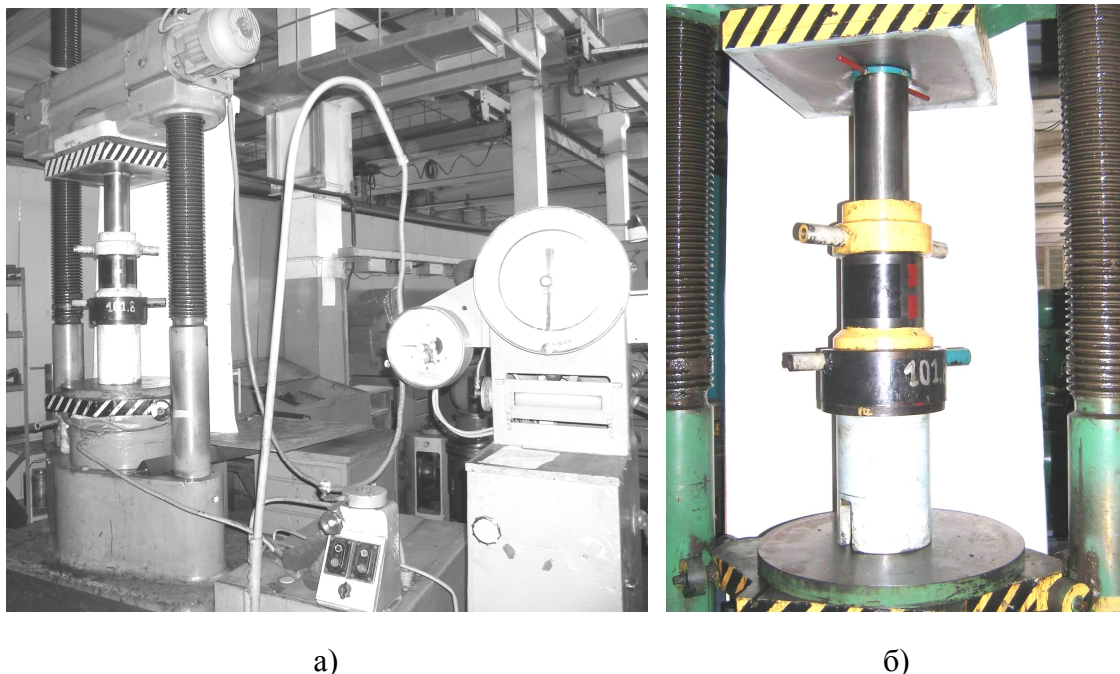


Рис. 2. - Оснащення для редукування шліцьових втулок, встановлене на гідравлічному пресі моделі ПС-200: а – загальний вигляд; б – робоче положення

В цих областях параметр напруженого стану досягає найбільшого (з врахуванням знака) значення, отже ця область є найжорсткішою. В процесі дослідження вивчався рух точок небезпечних областей у фізичній площині за допомогою моделювання на складових

зразках і в площині показників \bar{e}_i ; η ; χ [6]. Так для точки 1 початковим положенням було прийнято таке, як показано на рис. 3. При вдавлюванні на глибину $h = 1,5$ мм вона потрапляє в т. 2, при цьому параметри $e_1 = 0,28$; $\sigma_1 = 610$ МПа; $\sigma_0 = -290$ МПа; $\eta = -1,42$.

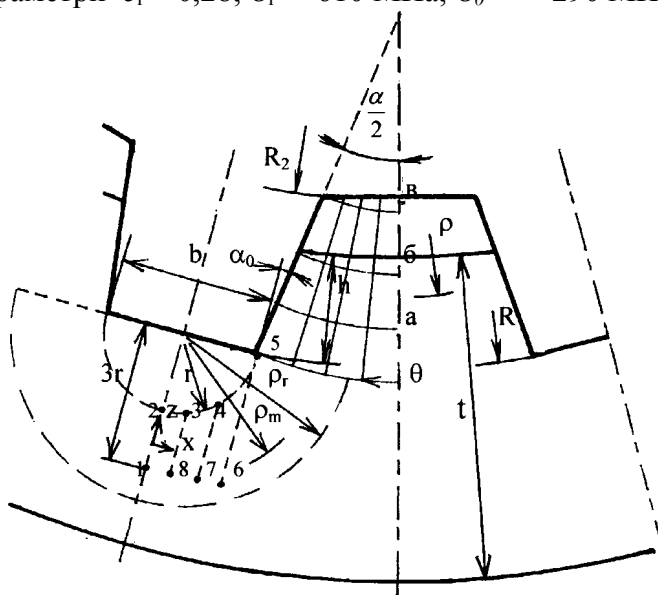


Рис. 3. - Розрахункова схема для визначення напружено-деформованого стану при формуванні внутрішнього шліцевого профілю

При подальших вдавлюваннях вона проходить послідовно точки 3, 4, 5, які обмежують область наростоутворення. Дані для побудови шляху деформування наведені в таблиці 1, в якій представлені також дані для області наростоутворення.

В таблицях 1 та 2 представлені дані розрахунку для побудови поверхні (площини деформування) для точок 1, 2, 5 з врахуванням переміщення їх у фізичній площині. Початковим положенням точки 2 була відстань r (рис. 3). При вдавлюванні на глибину $h = 1,5$ мм вона потрапляє на початок збіжного каналу. Подальший розрахунок для неї проводився як для рухомої по межі збіжного каналу. Для точки 5 розрахунок проводився як для рухомої з початку до кінця збіжного каналу.

Таблиця 1

Параметри шляху деформування точки 1 та області наростоутворення

Точка 1	e_i	0,28	0,3	0,35	0,4	0,45
	η	-1,42	-1,45	-1,47	-1,49	-1,5
Область наростоутв.	e_u	0,0045	0,2	0,28	0,33	0,45
	η	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5

Для областей, найбільш близьких до руйнування, побудували шляхи деформування характерних точок: 1-1; 2-2; 5-5; н-н (наростоутворення) (рис. 4). В цьому процесі області 2-2; 5-5 мають складні шляхи деформування, тому нами застосовані критерії, засновані на нелінійній теорії накопичення пошкоджень, які враховують історію деформування у вигляді [9]:

$$\psi = \int_0^{e_i} n \frac{e_i^{n-1}}{e_p(\eta)^n} de_i = 1; \quad (2)$$

де $n = 1 + 0,2 \frac{d\eta}{de_i}$; $e_p(e_i)$ – значення діаграми пластичності, що відповідає значенню e_i

шляху деформування, а також критерій, що враховує тензорний характер накопичення пошкоджень [10]:

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_i} \left(1 - a + 2a \frac{e_i}{e_p(\eta)} \right) \beta_{ij} \frac{de_i}{e_p(\eta)}; \quad (3)$$

$$\psi_{ij} \psi_{ij} = 1, \quad (4)$$

де $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\varepsilon_{ij}}{e_i}$ – напрямний тензор швидкостей деформацій; $a = const$ – деякий коефіцієнт, який підбирається, щоб задовольнити умову (4), яка приймається як умова руйнування.

На рис. 5 представлені результати розрахунку показників напруженого стану η і χ і використаного ресурсу пластичності вздовж лінії контакту шліца оправки і пластичної області, а також розбіжність результатів обчислень $\psi(\chi)$, $\psi(\eta)$, $\psi_{ij}(\chi)$, $\psi_{ij}(\eta)$.

Таблиця 2

Дані для побудови площини деформування для точок 2, 5

Результати розрахунку для точки 2								
h, мм	e_u	σ_u МПа	σ_ρ МПа	σ_θ МПа	σ_0 МПа	η	$\tau_{\rho\theta}$ МПа	χ
1,5	0,28	610	0	-600	-305	-1,5	90	0,22
1,7	0,32	620	100	-510	-200	-1	77	0,366
1,8	0,35	630	120	-510	-190	-0,92	76	0,374
2,3	0,4	650	160	-490	-160	-0,75	73	0,37
2,7	0,45	660	180	-480	-150	-0,67	71	0,36
Результати розрахунку для точки 5								
1,5	0,13	550	120	-430	-150	-0,83	74	0,373
1,8	0,28	610	160	-430	-138	-0,7	69	0,35
2	0,33	630	180	-450	-130	-0,63	67	0,36
2,4	0,4	650	240	-410	-85	-0,4	61	0,316
2,7	0,45	660	300	-360	-13	-0,13	54	0,226

Більш широко ці дослідження представлені в роботах [6, 8]. З графічних даних випливає, що величини використаного ресурсу пластичності, розраховані з врахуванням впливу $I_3(T_\sigma)$, виявилися при різних значеннях η вищими значень ψ , розрахованих без його врахування. При цьому величина розбіжності залежить від показників η і χ . Зі зменшенням η (зростанням гідростатичного тиску) збільшується вплив $I_3(T_\sigma)$ на величину граничної деформації. Слід зазначити, що при певних рівнях гідростатичного тиску, коли його значення за модулем наближається до межі текучості матеріалу на зсув, вплив $I_3(T_\sigma)$ зменшується. Подальше зростання тиску приведе, ймовірно, знов до зростання впливу $I_3(T_\sigma)$. На рис. 6 і 7 представлені площини деформування і граничні поверхні пластичності для точок 2 і 5, які вказують на достатній запас пластичності виробів.

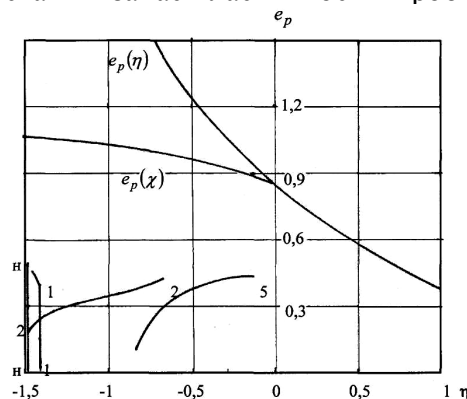


Рис. 4. - Діаграма пластичності сталі 20Х і шляхи деформування небезпечних областей при вдавлюванні шліцьового штамп

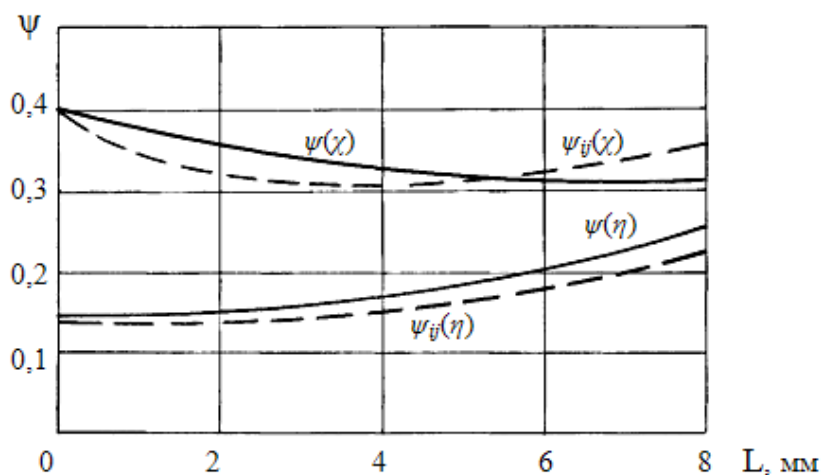


Рис. 5. - Розбіжність результатів обчислень $\psi(\chi)$, $\psi(\eta)$ за критерієм (2); $\psi_{ij}(\chi)$, $\psi_{ij}(\eta)$ за критерієм (3)

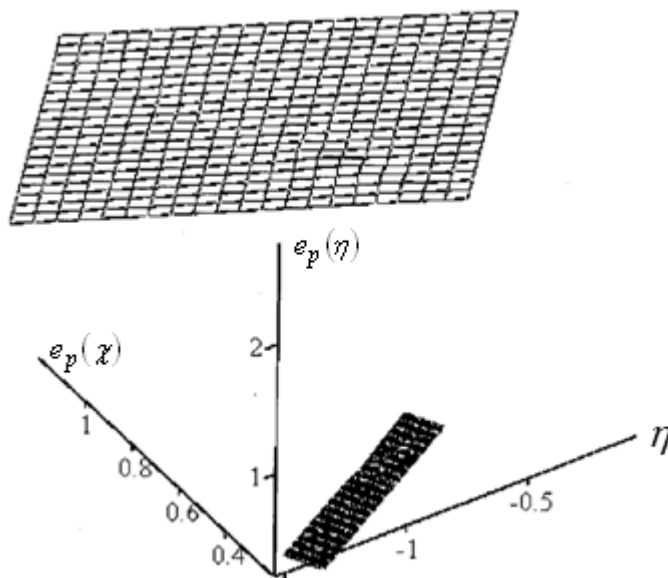


Рис. 6. - Площина деформування точки 2 ($\bar{e}_u = f(\eta, \chi)$) і гранична поверхня $e_p = f(\eta, \chi)$

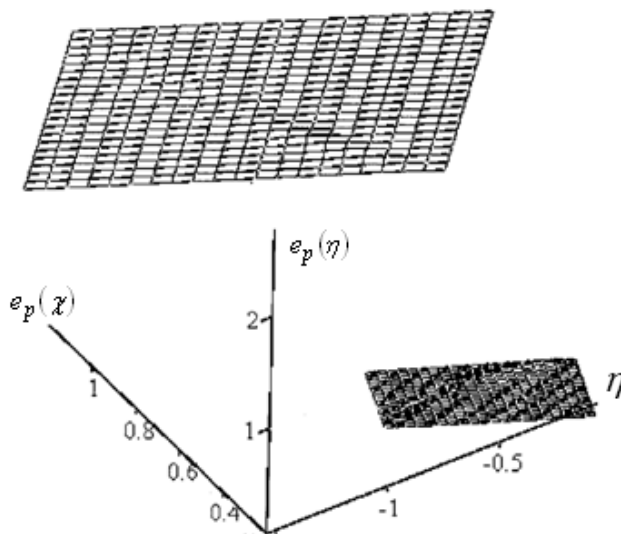


Рис. 7. - Площина деформування точки 5 ($\bar{e}_i = f(\eta, \chi)$) і гранична поверхня $e_p = f(\eta, \chi)$

Висновки

1. Побудовані площини деформування і граничні поверхні пластичності показали на достатній запас пластичності для процесу формоутворення внутрішнього шліцьового профілю; обґрунтовано, що при побудові траєкторії навантаження в просторі безрозмірних показників η і χ її вид однозначно визначається умовами формоутворення, характерними для досліджуваного процесу і практично на залежить від механічних властивостей деформованого металу; визначені області деформування, найбільш близькі до руйнування за показниками, що враховують вплив першого та третього інваріантів тензора напружень (бокова область та область впадин профілю стосовно процесу формоутворення внутрішнього шліцьового профілю), в яких використаний ресурс пластичності досягає значень $\psi = 0,34 \dots 0,4$. З точки зору забезпечення запасу міцності подібні розрахунки необхідно проводити з врахуванням показника, який враховує вплив третього інваріанта тензора напружень.

2. При дослідженні процесів холодного пластичного формоутворення, які супроводжуються складним немонотонним деформуванням, необхідно застосовувати моделі, які враховують нелінійний характер накопичення пошкоджень.

Література

1. Богатов А.А., Мижирецкий О.И., Шимшинцев В.Ф. Исследование пластичности металлов под гидростатическим давлением // Физика металлов и металловедение. – 1978. Т. 45, вып. 5. – С. 1089–1094.
2. Огородников В.А., Сивак И.О. Исследование процессов сложного деформирования в малоотходной технологии объёмной штамповки // Тр. Республ. НТК “Современные методы малоотходной и безотходной технологии в машиностроительном производстве”. – Кишинёв, 1982. – С. 122–123.
3. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. – К.: УМК 130, 1989. – 152 с.
4. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
5. Огородников В.А., Музичук В.І., Нахайчук О.В. Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 179 с.
6. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування: Монографія. / О.В. Нахайчук, О.О. Розенберг, В.А. Огородников, А.Д. Крицький, В.В. Мельниченко, С.Ф. Студенець. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 158 с.
7. Розенберг О.А., Траченко Б.П. Формообразование шлицевых отверстий в трубных заготовках методом холодного пластического деформирования // Технология и организация производства. – 1991. – № 2. – С. 20–23.
8. Огородников В.А., Савчинский И.Г., Нахайчук О.В. Напряжённо-деформированное состояние при формировании внутреннего шлицевого профиля методом обжатия на оправке // Тяжёлое машиностроение. – 2004. – №12. – С. 31–33.
9. Дель Г.Д., Огородников В.А., Нахайчук В.Г. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением // Изв. вузов. Машиностроение. – 1975. – № 4. – С. 135–140.
10. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – № 11. – С. 28–32.