

## ДО ПРОБЛЕМИ БЕЗСТРУЖКОВОЇ ОБРОБКИ ФАСОННИХ ОТВОРІВ ДЕТАЛЕЙ

Посвятенко Е.К., доктор технічних наук  
 Нахайчук О.В., доктор технічних наук  
 Музичук В.І., кандидат технічних наук

**Стан питання, методики та результати дослідження.** В технологічній практиці широке застосування знайшли феноменологічні теорії, в основі яких лежить гіпотеза про залежність пластичності від історії навантажень, яка задається у 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 деформівності 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 роботі [1] показано, що залежність пластичності від схеми напруженого стану можна характеризувати двома показниками напруженого стану. Установлено, що при об'ємному напруженому стані необхідно враховувати вплив на пластичність третього інваріанта тензора напружень [2], 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. Результати названих робіт дозволяють за звичайними діаграмами оцінювати граничну деформацію у випадку об'ємного формоутворення при умовах  $\eta = \text{const}$ ,  $\chi = \text{const}$ ,  $H = 0$  (відповідно два безрозмірні показники напруженого стану і параметр, що характеризує траєкторію кривизни деформації).

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 вимагає вивчення великої кількості траєкторій. Встановлено, що при одних і тих же умовах формоутворення траєкторії навантажень для різних матеріалів можуть бути різними, а це потребує додаткових досліджень і створення громіздкого математичного апарату для описання кожного із процесів.

У зв'язку з викладеним для задавання траєкторії в просторі напружень ми пропонуємо використовувати два безрозмірні показники напруженого стану [2]:

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

Основна перевага підходу, при якому траєкторія навантаження задається не в шестимірному просторі напружень, а в просторі безрозмірних показників  $\eta$  і  $\chi$  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 [2, 4, 5], а також у нашому дослідженні – властивості дослідних матеріалів мало впливають на шляхи деформування в небезпечних областях (в 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. Нами розроблено технологічний процес формоутворення внутрішніх шліців в трубних заготовках шляхом їх обтиску матрицею на профільну шліцьову оправку (методом “охоплюючого” протягування) [6]. 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. 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 у масовому виробництві (рис. 2).

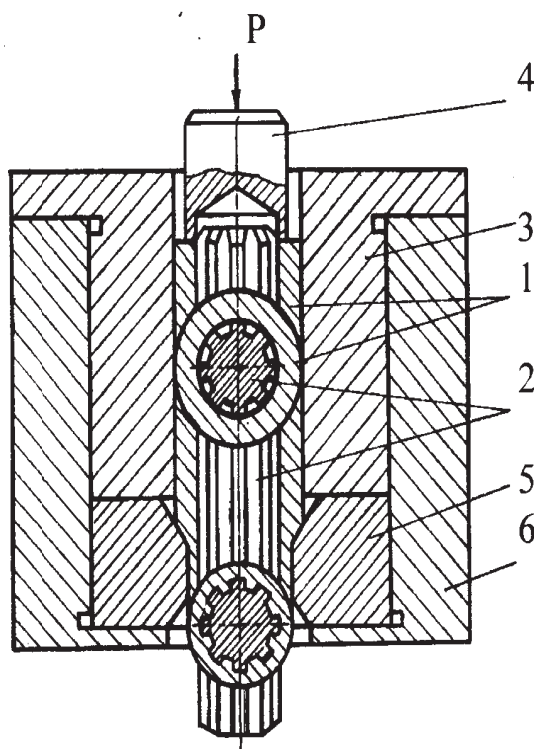


Рисунок 1. – Схема процесу формоутворення внутрішніх шліців в трубних заготовках

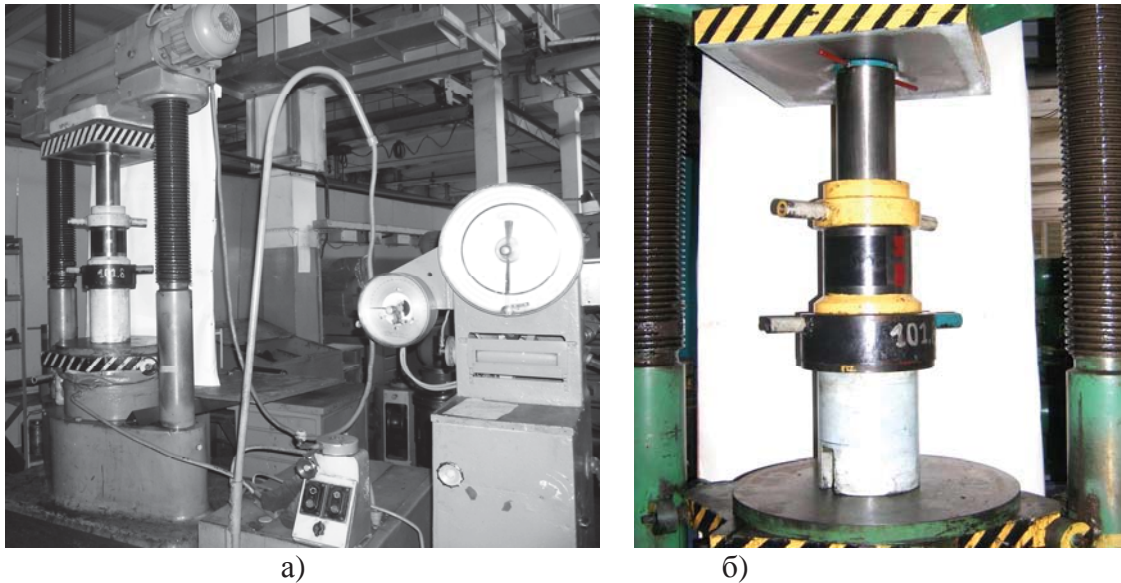


Рисунок 2. – Оснащення для редукування шліцьових втулок, яке встановлене на гідравлічному пресі моделі ПС-200:  
а – загальний вигляд; б – робоче положення

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 стає непридатною для подальшого використання. Відомо, що при обробці холодним пластичним деформуванням знижується шорсткість поверхні, підвищується її твердість і зносостійкість, створюються залишкові напруження необхідного знаку, здійснюється об'ємна пластична деформація всієї товщини деталі, що приводить до підвищення її міцності. Однак, з підвищенням характеристик міцності матеріалу (границі міцності  $\sigma_b$ , границі текучості  $\sigma_t$ , твердості  $HB$ ) спостерігається зниження пластичних характеристик (відносного подовження  $\delta$  і відносного звуження  $\psi$ ).

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 деформівності, що може передбачати положення точки поверхні руйнування з урахуванням історії деформування.

Оцінка технологічної міцності може бути здійснена, якщо відома залежність  $\eta$  від накопиченого ступеня деформації в найбільш небезпечній області заготовки, що деформується, величини характерної деформації та 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 ін. Аналіз напруженого стану показав [7], що найбільш небезпечними є області контакту шліца оправки і пластичної області та область наростування (зображена напівколом під шліцом, рис. 3.)

В цих областях параметр напруженого стану досягає найбільшого (з врахуванням знаку) 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  $\bar{\epsilon}_z$ ;  $\eta$ ;  $\chi$  [5]. Для точки 1 початковим положенням було прийнято таке, як показано на рис. 3. При вдавлюванні на глибину  $h = 1,5$  мм остання

потрапляє у точку 2, при цьому параметри наступні:  $e_1 = 0,28$ ;  $\sigma_1 = 610$  МПа;  $\sigma_0 = -290$  МПа;  $\eta = -1,42$ . При подальших вдавлюваннях точка 1 проходить послідовно точки 3, 4, 5, які обмежують область наростоутворення. Дані для побудови шляху деформування наведені в таблиці 1, в якій подані також дані для області наростоутворення.

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

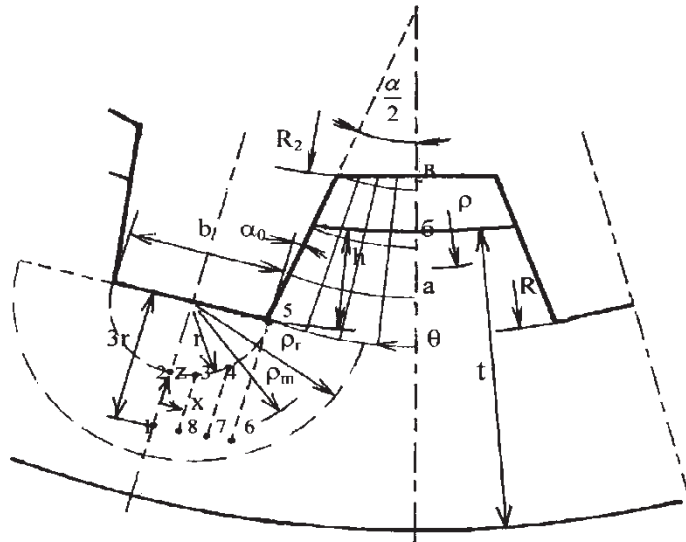


Рисунок 3. – Розрахункова схема для визначення напружено-деформованого стану при формуванні внутрішнього шліцьового профілю

Таблиця 1. – Параметри шляху деформування точки 1 та області наростоутворення

Точка 1	$e_z$	0,28	0,3	0,35	0,4	0,45
	$\eta$	-1,42	-1,45	-1,47	-1,49	-1,5
Область наростоутворення	$e_u$	0,0045	0,2	0,28	0,33	0,45
	$\eta$	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5

Таблиця 2. – Дані для побудови площини деформування для точок 2, 5

Результати розрахунку для точки 2								
h, мм	$e_u$	$\sigma_u$ МПа	$\sigma_\rho$ МПа	$\sigma_\theta$ МПа	$\sigma_0$ МПа	$\eta$	$\tau_{\rho\theta}$ МПа	$\chi$
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

Для областей, найбільш близьких до руйнування були побудовані шляхи деформування характерних точок: 1–1; 2–2; 5–5; n–n (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  $e_z$  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  $\eta$  і  $\chi$  і використаного ресурсу пластичності вздовж лінії контакту шліца оправки і пластичної області, а також розбіжність результатів обчислень  $\psi(\chi)$ ,  $\psi(\eta)$ ,  $\psi_{ij}(\chi)$ ,  $\psi_{ij}(\eta)$ .

Більш широко ці дослідження представлені в роботах [6, 7, 9]. З графічних даних випливає, що величини використаного ресурсу пластичності, розраховані з врахуванням впливу  $I_3(T_\sigma)$ , виявилися при різних значеннях  $\eta$  вищими значень  $\psi$ , розрахованих без його врахування. При цьому величина розбіжності залежить від показників  $\eta$  і  $\chi$ . Зі зменшенням  $\eta$  (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 представлені площини деформування і граничні поверхні пластичності для точок 2 і 5, які вказують на достатній запас пластичності виробів.

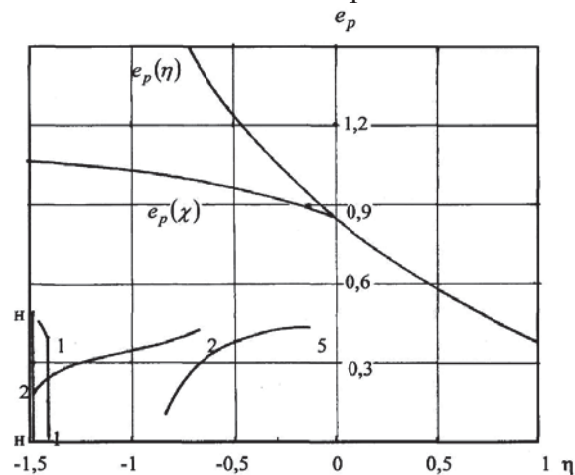


Рисунок 4. – Діаграма пластичності сталі 20X і шляхи деформування небезпечних областей при вдавлюванні шліцьового штампа

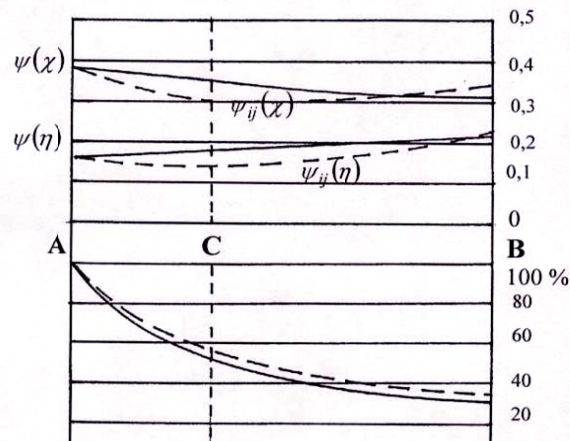


Рисунок 5. – Розбіжність результатів обчислень  $\psi(\chi)$ ,  $\psi(\eta)$  – за критерієм (2);  $\psi_{ij}(\chi)$ ,  $\psi_{ij}(\eta)$  – за критерієм (3)

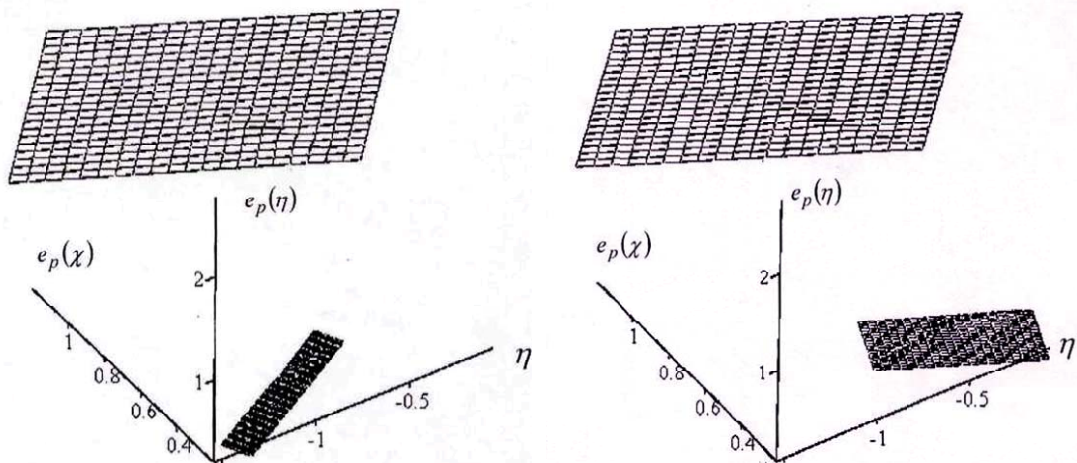


Рисунок 6. – Площини деформування областей, близьких до руйнування (точки 2, 5) –  $\bar{e}_u = f(\eta, \chi)$ ) і граничні поверхні  $e_p = f(\eta, \chi)$

**Висновки та перспективи.** Побудовані площини деформування і граничні поверхні пластичності показали на достатній запас пластичності; обґрунтовано, що при побудові траєкторії навантаження в просторі безрозмірних показників  $\eta$  і  $\chi$  її вид однозначно визначається умовами формоутворення, характерними для досліджуваного процесу і практично не залежить від механічних властивостей металу, що деформується; 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 формування 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.

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

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Огородников В.А., Исследование процессов сложного деформирования в малоотходной технологии объёмной штамповки / В.А. Огородников, И.О. Сивак // Тр. Республ. НТК – Кишинёв, 1982. – С. 122–123.
2. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
3. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В.А. Огородников. – К.: УМК 130, 1989. – 152 с.
4. Огородников В.А., Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації. Монографія / В.А. Огородников, В.І. Музичук, О.В. Нахайчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 179 с.
5. Нахайчук О.В. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування: Монографія. / О.В. Нахайчук, О.О. Розенберг, В.А. Огородников та ін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 158 с.
6. Нахайчук О.В. Розвиток принципів та методів дослідження процесів холодного пластичного деформування / О.В. Нахайчук, Е.К. Посвятенко // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ, 2012. – Вип. 9. – С. 149–155.
7. Посвятенко Е.К. Застосування ХПД в процесах зі складним навантаженням та немонотонним деформуванням / Е.К. Посвятенко, О.В. Нахайчук // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2012. – Вип. 25. – С. 39–43.
8. Огородников В.А., Напряжённо-деформированное состояние при формировании внутреннего шлицевого профиля методом обжатия на оправке / В.А. Огородников, И.Г. Савчинский, О.В. Нахайчук // Тяжёлое машиностроение. – 2004. – №12. – С. 31–33.
9. 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.
10. Дель Г.Д. Пластичность деформированного металла / Г.Д. Дель // Физика и техника высоких давлений. – 1983. – № 11. – С. 28–32.

## РЕФЕРАТ

Посвятенко Е.К., Нахайчук О.В., Музичук В.І. До проблеми безстружкової обробки фасонних отворів деталей / Едуард Карпович Посвятенко, Олег Вікторович Нахайчук, Василь Іванович Музичук // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ – 2013. – Вип. 27.

У статті розглянуто процес формування внутрішнього шлицьового профілю на трубній заготовці методом холодного пластичного деформування.

Об'єкт дослідження – технологічний процес обробки фасонних отворів деталей холодним пластичним деформуванням.

Мета роботи – удосконалення розрахунку граничних деформацій при отриманні фасонних отворів деталей холодним пластичним деформуванням з наступною практичною перевіркою теоретичних результатів.

Метод дослідження – редукування шлицьових деталей.

Авторами удосконалено процес досліджень наступним чином. Побудовані площини деформування і граничні поверхні пластичності показали на достатній запас пластичності; обґрунтовано, що при побудові траєкторії навантаження в просторі безрозмірних показників  $\eta$  і  $\chi$  її вид однозначно визначається умовами формоутворення, характерними для досліджуваного процесу і практично не залежить від механічних властивостей металу, що деформується; 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 формування внутрішнього шлицьового 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.

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

Результати статті можуть знайти застосування у машинобудуванні.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ШЛІЦЬОВІ ОТВОРИ, ПЛАСТИЧНІСТЬ, РЕДУКУВАННЯ, ТЕНЗОР НАПРУЖЕНЬ.

#### ABSTRACT

Posviatenko E.K., Naxajchuk O.V., Muzychuk V.I. The problem of chipless machining parts shaped holes / Eduard Posviatenko, Oleg Naxajchuk, Vasyl Muzychuk // Herald of the National Transport University. - K.: NTU - 2013. - Issue. 27.

In the article it is describes the process of the internal spline profile on the tube blank by cold plastic deformation.

The object of study - the technological processing of shaped holes parts cold plastic deformation.

Purpose – to improve the calculation of the boundary deformation in the preparation of shaped holes parts cold plastic deformation, followed by a practical test of the theoretical results.

The method of research – reducing splined components.

The authors improved the research process as follows. Built plane deformation plasticity and the boundary surface showed an adequate supply of plasticity, justified that in the construction of loading trajectory in the space of dimensionless parameters  $\eta$  and  $\chi$  its kind uniquely determined by the conditions of formation, characteristic of the process is virtually independent of the mechanical properties of deformed metal, identified areas of deformation which are closest to the destruction in terms that take into account the impact of the first and third invariants of the stress tensor (side area, and the profile of depressions on the process of the internal spline profile), which used the plasticity resource reaches values of  $\psi = 0,34 \dots 0.4$ . From the standpoint of safety factors, such calculations should be made taking into account the indicator that takes into account the influence of the third invariant of the stress tensor.

In the study of cold plastic forming processes involving complex non-monotonic deformation, the model should be used taking into account the non-linear damage accumulation.

Results film can find application in mechanical engineering.

**KEY WORDS:** SPLINED HUB, PLASTICITY, REDUDUTSIROVANIE, THE STRESS TENSOR.

#### РЕФЕРАТ

Посвятенко Э.К., Нахайчук О.В., Музычук В.И. К проблеме бесстружечной обработки фасонных отверстий деталей / Эдуард Карпович Посвятенко, Олег Викторович Нахайчук, Василий Иванович Музычук // Вестник Национального транспортного университета. - К.: НТУ – 2013. - Вып. 27.

В статье рассмотрен процесс формирования внутреннего шлицевого профиля на трубной заготовке методом холодного пластического деформирования.

Объект исследования – технологический процесс обработки фасонных отверстий деталей холодным пластическим деформированием.

Цель работы – усовершенствование расчета граничных деформаций при получении фасонных отверстий деталей холодным пластическим деформированием с последующей практической проверкой теоретических результатов.

Метод исследования – редуцирование шлицевых деталей.

Авторами усовершенствован процесс исследований следующим образом. Построенные плоскости деформирования и граничные поверхности пластичности показали достаточный



запас пластичности; обосновано, что при построении траектории нагружения в пространстве безразмерных показателей  $\eta$  и  $\chi$  ее вид однозначно определяется условиями формирования, характерными для исследуемого процесса практически не зависит от механических свойств деформируемого металла; определены области деформирования, которые являются наиболее близкими к разрушению по показателям, учитывающих влияние первого и третьего инвариантов тензора напряжений (боковая область и область впадин профиля относительно процесса формирования внутреннего шлицевого профиля), в которых использованный ресурс пластичности достигает значений  $\psi = 0,34 \dots 0,4$ . С позиций обеспечения запаса прочности подобные расчеты следует производить с учетом показателя, учитывающего влияние третьего инварианта тензора напряжений.

При исследовании процессов холодного пластичного формообразования, сопровождающихся сложным немонотонным деформированием, следует применять модели, учитывающие нелинейный характер накопления повреждений.

Результаты статьи могут найти применение в машиностроении.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ШЛИЦЕВЫЕ ОТВЕРСТИЯ, ПЛАСТИЧНОСТЬ, РЕДУДУЦИРОВАНИЕ, ТЕНЗОР НАПРЯЖЕНИЙ.