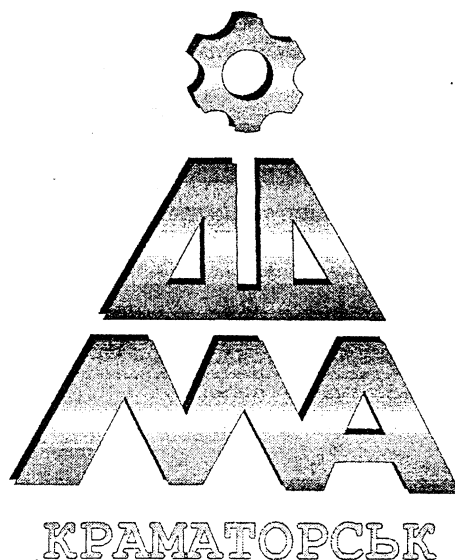


Міністерство освіти і науки України

Донбаська державна машинобудівна академія



**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
І ОБЛАДНАННЯ ОБРОБКИ ТИСКОМ  
В МЕТАЛУРГІЇ І МАШИНОБУДУВАННІ**

Тематичний збірник наукових праць

КРАМАТОРСЬК 2003

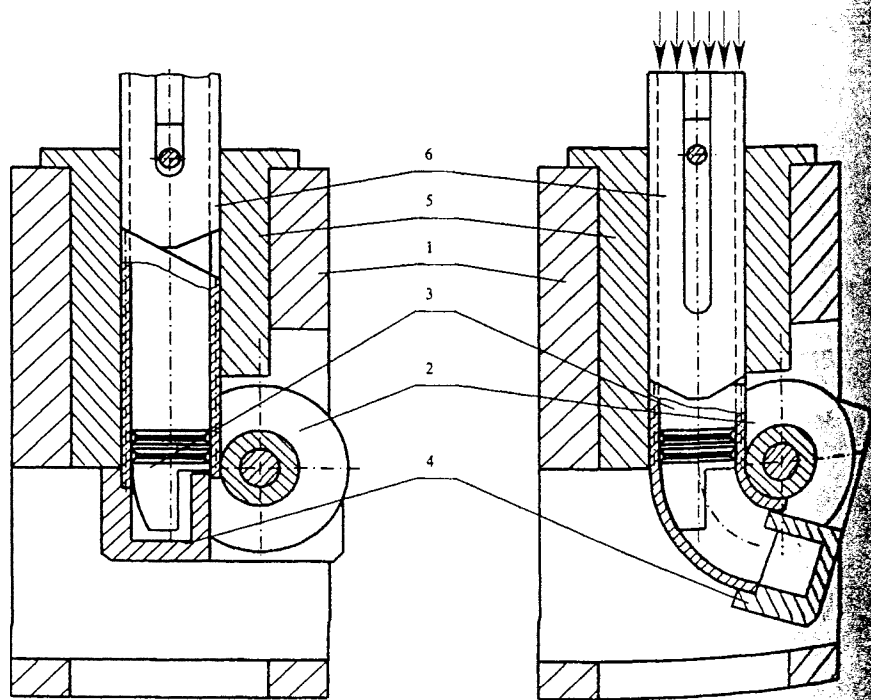
З. А., Грушко О.В., Федотов В.О. (Вінниця, ВДТУ)  
**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН**  
**В ПРОЦЕСІ ФОРМОУТВОРЕННЯ КРУТОЗІГНУТИХ КОЛІН**  
**МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ**

*Зроблені результати розрахунку напружено-деформованого стану крутозігнутих колін, що отримано методом холодного пластичного деформування. Розрахунок виконано за методом ділильних сіток. Інформація про напружено-деформований стан, що приведена в роботі, необхідна для прогнозування технологічного спадщини, залишкових напружень та при оцінюванні міцності отриманих за даним методом колін.*  
*The results of strain condition estimate of sharply curved offsets which are obtained by a method of cold plastic deformation are in the article. The estimate is executed on a method of dividing grids. The information about strain condition is necessary for prediction of a technological heritage, residual stress and at an estimation of offset durability.*

Співробітниками Інституту надтвердих матеріалів під керівництвом проф. О. О. Розенберга розроблено спосіб одержання крутозігнутих колін методом холодного пластичного деформування, в основі якого лежить одночасне протягування зі згинанням заневоленої труби. Розроблена на основі цього методу технологія дозволяє одержувати вироби з різних сталей, у тому числі із нержавіючих. Вона має суттєві переваги в порівнянні з іншими за економічністю та екологічністю і за своїми ознаками відноситься до розряду високих. Детальний опис технологічного процесу та пристрою (рис. 1) поданий в роботах [1-4].

Проведені дослідження [2-4] нового способу формоутворення дозволили створити науково обґрунтований розрахунковий апарат, за допомогою якого можна спрогнозувати якість виробів та відповідність стандартам і визначити необхідні параметри технологічного процесу на стадії його проектування, що є важливою умовою впровадження технології в промисловість. Дедалі стає актуальніше питання технологічної спадщини, зокрема у вигляді розрахунку залишкових напружень, розрахунку на статичну міцність та міцність щодо утомленості отриманих деталей та ін.

Для аналізу та побудови відповідних моделей, виходячи із основних передумов сучасної теорії, необхідно мати інформацію про напружено-деформований стан матеріалу не тільки в небезпечних ділянках, на що були направлені більшість робіт по дослідженню нового методу [2-4], а в кожній точці деформованої заготовки. Крім того, велике значення для таких розрахунків має точність, з якою визначались поля напружень та деформацій в пластичній зоні. Суто теоретичні методи, як правило, необхідну точність не



1 – корпус; 2 – ролик; 3 – дорн; 4 – важіль; 5 – гільза; 6 – штовхач  
 Рис. 1 – Схема пристрою формоутворення крутозігнутих колін методом холодного пластичного деформування

забезпечують, що є наслідком великої кількості допущень та гіпотез при побудові моделей. Експериментально-аналітичні методи мають суттєві переваги в цьому сенсі, оскільки експериментальні дані мають достатню точність і вони є реперними точками для подальшого апроксимування з метою побудови узагальнюючих моделей. З нашого погляду, цим вимогам відповідає класичний метод ділильних сіток, за допомогою якого і проведемо детальний аналіз напружено-деформованого стану колін в процесі їх формоутворення.

Для розрахунку напружено-деформованого стану в процесі пластичного формозмінювання колін використовували загальновідому методіку І.П.Ренне, подану, наприклад, в [5].

Для більш повного аналізу процесу здійснено поетапне деформування заготовок колін. На рисунку 2 зображені заготовки коліна  $90^{\circ}45 \times 2,5$  із сталі 20, що деформовані до різних ступенів деформування. Заготовка піддається складному деформуванню – одночасно наявні деформації згину та зсуву, причому в місцях контакту з інструментом, а також в облойних ділянках деформований стан характерний тільки для даного методу згину. Відзначимо, що заготовка знаходиться в умовах нестационарного деформування. Починаючи із самого початку протікання процесу практично весь об'єм металу переходить у пластичний стан, хоча згин заготовки відбувається поступово – починаючи з нижнього кінця заготовки до верхнього.

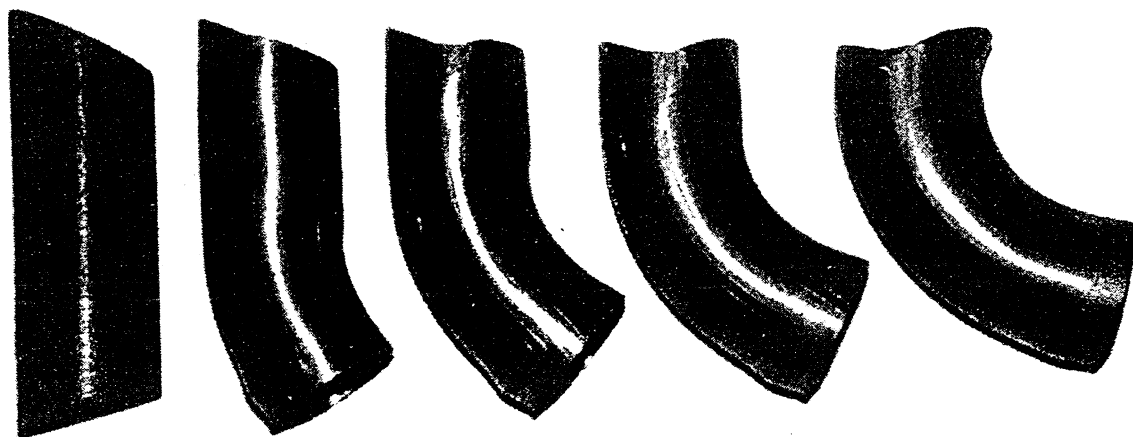


Рис. 2 – Поетапне деформування заготовки коліна  $90^{\circ}45 \times 2,5$  (сталь 20)

При обробці експериментальних даних будемо вважати, що в пластичній області реалізується плоский напружений стан. В процесах листового штампування і вигину труб таке допущення широко застосовується. У низці робіт доведено, що така гіпотеза досить точно відповідає дійсності для більшості процесів листового штампування. Також відзначимо, що при дослідженні напружено-деформованого стану процесу вигину труб з осьовим стискуванням, подібного до розглянутого, автори виходили з гіпотези плоского напруженого стану (літературні посилання подані в роботі [3]).

Компоненти тензора напружень знайдемо за співвідношеннями деформаційної теорії пластичності [6]. Вважаємо, що деформування металу в межах досліджуваної комірки наближене до простого. І припускаємо, що напрямок Z, нормальний до площини комірки ділильної сітки, є головним напрямком тензора деформацій. Тоді, при плоскому напруженому стані:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} e_{\alpha} + \sigma, \quad \sigma_{\theta} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} e_{\theta} + \sigma, \quad \tau_{\alpha\theta} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} e_{\alpha\theta}, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – гідростатичний тиск;  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень;

$e_i$  – інтенсивність логарифмічних деформацій;

$e_{\alpha}, e_{\theta}, e_{\alpha\theta}$  – компоненти тензора логарифмічних деформацій.

$$e_\alpha = e_1 \cdot \cos^2 \varphi_1 + e_2 \cdot \sin^2 \varphi_1, \quad e_\theta = e_1 \cdot \sin^2 \varphi_1 + e_2 \cdot \cos^2 \varphi_1, \\ e_{\alpha\theta} = (e_1 + e_2) \sin 2\varphi_1,$$

де  $\varphi_1$  – кут між першим головним напрямком тензора деформацій Лагранжа і віссю  $X$ .  
Інтенсивність логарифмічних деформацій

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_1 e_2}.$$

Інтенсивність напружень  $\sigma_i$  знайдено за інтенсивністю деформації з кривої течії, що побудована за результатами випробування матеріалу на розтяг, при степеневій апроксимації  $\sigma_i = A \cdot e_i^n$ , де  $A$  і  $n$  – параметри апроксимації.

При двохосьовому напруженому стані  $\sigma_z = 0$ , тоді з умови  $\sigma_z = s_x + \sigma = 0$  з урахуванням умови нестисливості одержуємо  $\sigma = s_x + s_y$  ( $s_x, s_y, s_z$  – компоненти діватора напружень). Отже, у даному випадку:

$$\sigma_\alpha = 2s_\alpha + s_\theta, \quad \sigma_\theta = 2s_\theta + s_\alpha;$$

або

$$\sigma_\alpha = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} (2e_\alpha + e_\theta), \quad \sigma_\theta = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} (2e_\theta + e_\alpha), \quad \tau_{\alpha\theta} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{e_i} e_{\alpha\theta}. \quad (4)$$

Головні компоненти деформації  $e_\alpha, e_\theta, e_{\alpha\theta}$  знайдемо за співвідношеннями, запропонованими І.П.Ренне та приведеними в роботі [5].

На рисунку 4 показано ізолінії інтенсивності логарифмічних деформацій  $e_i$ , нормальних напружень у поперечному  $\sigma_\alpha$  і меридіональному  $\sigma_\theta$  перерізах труби, дотичних напружень  $\tau_{\alpha\theta}$ , показника напруженого стану  $\eta$  і складової деформації уздовж осі  $\alpha - e_\alpha$  на умовній розгортці відштампованої заготовки, яка показана на рис. 3. Однозначне положення кожної точки коліна визначається двома кутами:  $\alpha$  і  $\theta$ . Внаслідок симетрії на рисунках показана тільки половина розгортки.

Показник напруженого стану  $\eta$  відповідно до робіт В.О.Бабичкова і Г.О.Смирнова-Аляєва визначено співвідношенням

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_i} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} = \frac{\sigma_\alpha + \sigma_\theta}{\sigma_i}, \quad (5)$$

де  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень;  $\sigma$  – середнє нормальне напруження.

З рисунків видно, що заготовка знаходиться в умовах складного і нерівномірно розподіленого напружено-деформованого стану. На бічних поверхнях заготовки спостерігаються

деформації зсуву та дотичні напруження, причому їх максимальне значення досягається на серединній зоні з краю заготовки ( $70^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$ ,

$40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$  (див. рис. 4)). Отже очікується, що дана зона може бути небезпечною з погляду руйнації. У

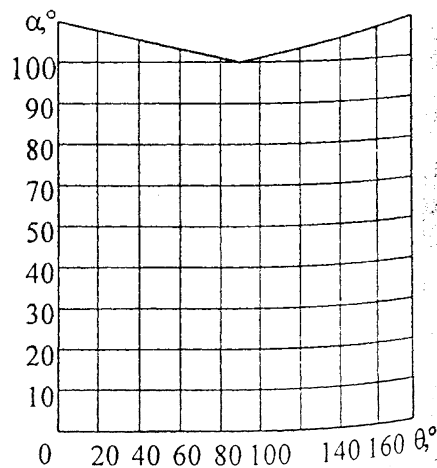
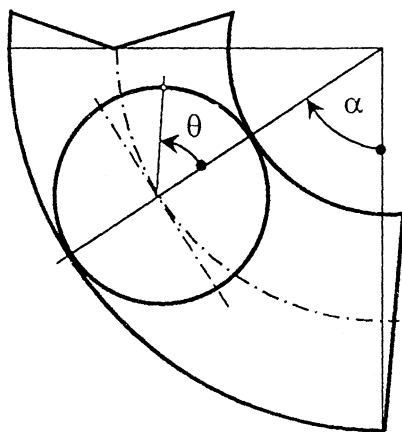


Рис. 3 – Заготовка коліна та половина її умовної розгортки

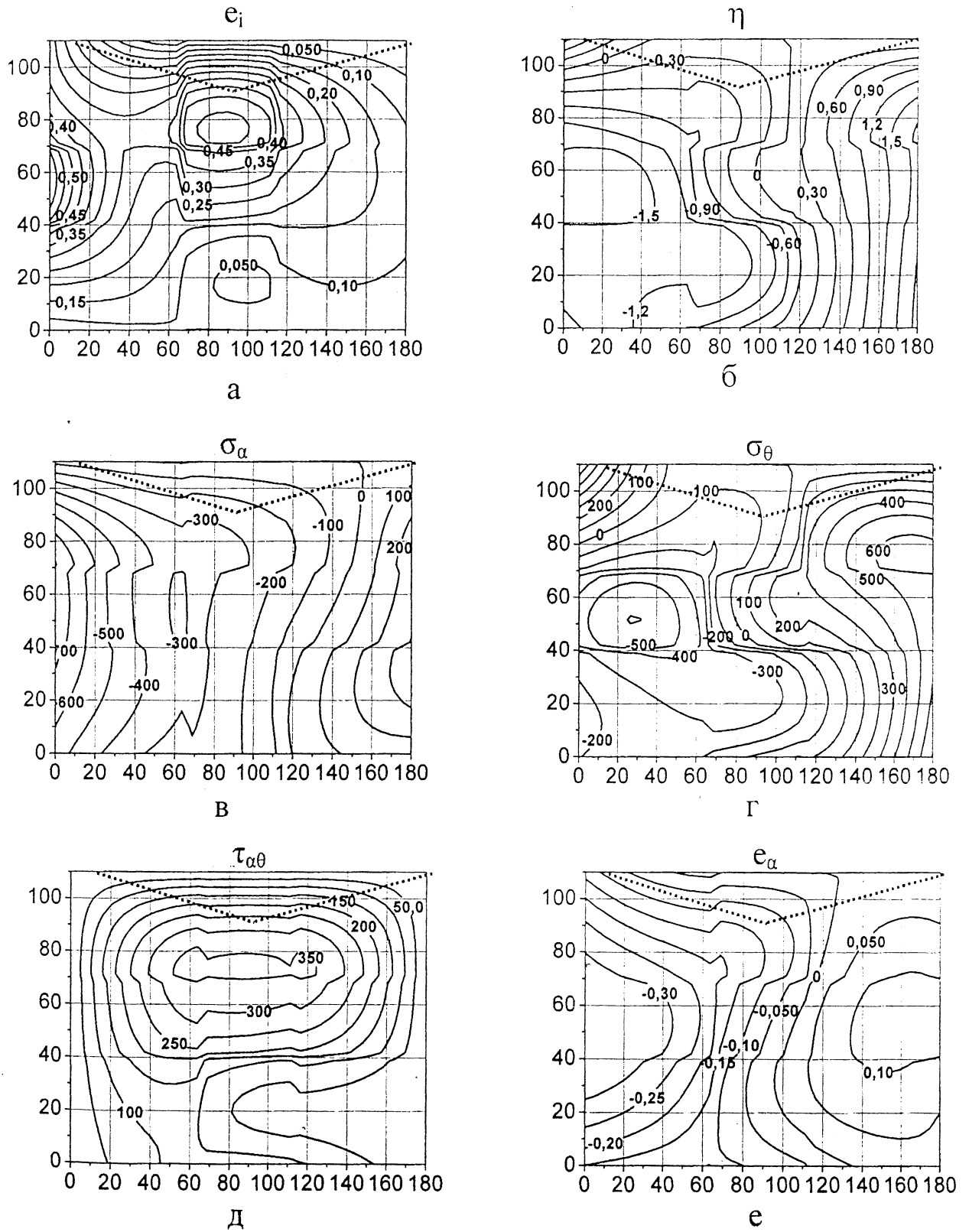


Рис. 4 – Ізолінії на умовній розгортці коліна  $90^\circ 45 \times 2,5$  (сталь 20):

- а) інтенсивності деформацій  $e_i$ ;
- б) показника напруженого стану  $\eta$ ;
- в), г), д) напружень  $\sigma_\alpha, \sigma_\theta, \tau_{\alpha\theta}$  відповідно, МПа;
- е) складової деформації  $e_\alpha$ .

ршинні згину ( $20^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ ,  $170^\circ \leq \theta \leq 190^\circ$ ) та в облойній ділянці ( $\alpha \geq 90^\circ$ ,  $\theta \approx 0^\circ$ ) спостерігається розтягування поздовжніх і поперечних волокон відповідно, отже ця зона також небезпечна з погляду руйнації і критичного стоншення. У внутрішній зоні ( $20^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ ,  $-10^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ ) спостерігається наявність стискальних напружень – тому ця область небезпечна через можливу втрату стійкості оболонки у вигляді гофрування.

Аналогічні графіки отримано для колін  $90^\circ 89 \times 4,5$ ,  $90^\circ 57 \times 4$ ,  $90^\circ 45 \times 2,5$  із сталі 20 та X18H9T. Графіки мають подібну до зображених на рис. 3 форму.

З метою перевірки припущення про розташування небезпечних зон розрахуємо використаний ресурс пластичності для різних точок коліна. Для розрахунків використано критерій В.А.Огороднікова, Г.Д.Деля, В.Г.Нахайчука [6], який враховує нелінійне накопичення пошкоджуваності і шляхи навантаження металу

$$\Psi = \int_0^{e_i} \left( 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i} \right) \cdot \frac{e_i \cdot 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i}}{\left[ e_p(\eta(e_i)) \right]^{1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i}}} de_i \leq 1. \quad (6)$$

Розрахунок використаного ресурсу пластичності у вигляді ізоліній зображений на рисунку 5. Матеріал найбільш ушкоджений в зонах, де найтемніші місця діаграми.

#### Висновки

Отримані результати використано для розрахунку ресурсу пластичності, прогнозування втрати стійкості заготовки за критерієм гофрування, в розрахунку залишкової пластичності матеріалу, та осового зусилля деформування. Детальна інформація про напружено-деформований стан, що приведена в роботі, необхідна для прогнозування технологічної спадщини, залишкових напружень та при оцінюванні міцності отриманих за даним методом колін.

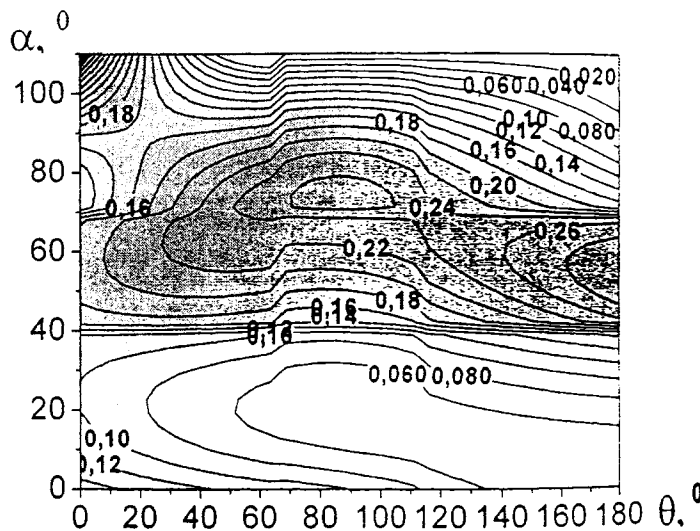


Рис. 5 – Ізолінії використаного ресурсу пластичності матеріалу коліна  $45 \times 2,5$  (сталь 20)

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Розенберг О. А., Мельниченко В. В., Студенец С. Ф. Новая технология получения крутоизогнутых стальных отводов методом холодного пластического деформирования // Изв. АИИ Украины, спец. выпуск отделения "Тяжелого и транспортного машиностроения". – 1998. – С. 96–102.
2. Грушко О. В. Механіка формозмінювання крутозігнутих колін новим методом холодного пластичного деформування як основа оцінки якості деталей: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.05 / Вінницький держ. технічний ун-т. – Вінниця, 2000. – 17с.
3. Огородніков В.А., Нахайчук О.В., Грушко О.В., Нахайчук В.Г. Механіка деформування в процесі виготовлення крутозігнутих трубчастих заготовок // Вісник ВПІ. – 2000. – №2(29). – С. 66–71.
4. Огородніков В.А., Грушко О.В. Моделирование процесса формообразования крутоизогнутых отводов на основе теории деформируемости // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тем. зб. наук. пр. – Краматорськ. – 2000. – С. 5–10.
5. Ренне И.П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом деформационных сеток в процессах обработки металлов давлением. – Тула: ТПИ, 1979, – 96 с.
6. Дель Г.Д. Технологическая механика. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.