

УДК 621.983.44.01

## ПАРАМЕТРИ СИЛОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ ІНСТРУМЕНТУ З ОБОЛОНКОЮ ПРИ РОТАЦІЙНОМУ ВИТЯГАННІ ОБОЛОНКОВИХ ДЕТАЛЕЙ БЕЗ НАВМИСНОГО СТОНШУВАННЯ

Вітренко В. О., Чесноков О. В., Чорна В. І.

### PARAMETERS OF THE POWER TOOL INTERACTION WITH THE SHELL AT SPINNING SHELL PARTS WITHOUT DELIBERATE THINNING

Vitrenko V. A., Chesnokov A. V., Chernaja V. I.

*Розглянуто неосесиметричний напружений стан оболонки від локально прикладеного деформуючого зусилля при ротаційній витяжці. Виділено центр деформації і визначені напруги вздовж граней елементарної ділянки, виділеного на поверхні оболонки меридіональними і широтними перетинами. Отримано залежності для визначення напруженого стану металу в осередку деформації. Визначено умови рівноваги на кордоні осередку деформації. Для ідеально-пластичного матеріалу оболонки визначені силові параметри ротаційної витяжки.*

**Ключові слова:** ротаційний витяг, оболонкові деталі, деформації, напруження, сила.

Деталі типу тонкостінні тіла обертання поширені у промисловості. Випускати такі деталі складної форми та дрібносерійно штампуванням економічно не вигідно. Тому застосовують більш гнучкий технологічний процес ротаційну витяжку (РВ), що дозволяє у стислий термін виготовити деталі складної форми з високою точністю.

РВ надто складний процес, достовірно описати його та явища, що відбуваються у системі заготівки-інструмент-обладнання поки що неможливо [1]. Дослідження процесів РВ переважно велись для вирішення конкретних технологічних завдань і у подальшому систематизувались у виді емпіричних залежностей. Способи та процеси РВ різних матеріалів розглянуто у монографії М.І. Могильного [2], що є найбільш цитованою при розгляді РВ.

РВ на відміну від штампування характеризується локальним застосуванням навантаження, що переміщається по гвинтовій лінії. У кожен момент часу має місце деформація лише обмеженого об'єму металу (центра деформації), хоча швидкість обертання заготівки порівняно висока. Локальне натискання деформуючого навантаження на заготівку не дозволяє для аналізу напружено-

деформованого стану центра застосовувати як осесиметричну задачу, що розглядається при формуванні аналогічних оболонок штампуванням.

Унаслідок зосередження деформуючих зусиль на невеликій ділянці оболонки і складності явищ, теоретичні дослідження напруження і деформацій, а також розробка науково-обґрунтованого методу визначення силових і кінематичних параметрів цього процесу утруднені.

У роботах В.М. Моїсеєва [3] і П.Ф. Григор'єва [4] розглянуто схему прикладання деформуючого зусилля до заготівки в процесі формування з урахуванням лише зони контакту заготівки і ролика. Зусилля ротаційної витяжки визначали на підставі методу балансу робіт, застосування якого стало можливим після визначення геометричних параметрів центра деформації і визначення роботи деформацій. Таким чином, теоретичні дослідження зводилися до розв'язку неосесиметричної задачі в площині обертання оболонки, що деформувалася.

Вказані дослідження дозволили наближено визначити деформації в площині обертання деталі і знайти зв'язок між напруженням і деформацією. Розроблена методика аналітичного визначення деформуючих зусиль у функціях основних технологічних чинників в першому наближенні.

У реальному процесі при деформації, оболонки утворюється центр деформації що складається з двох ділянок: вільного вигину (позаконтактною деформацією) і контактної (деформація на поверхні, що контактує з давильним роликом).

Враховуючи реальну схему деформації оболонки, у роботі [1] визначено основні геометричні розміри центра контактної зони деформації при РВ конічної оболонки одним роликом та радіус кривизни позаконтактною зони деформації в перетині головного меридіана на підставі аналізу епюр від елементарних сил,

спричинених широтним та меридіональним напруженням. Визначено площу контактної зони при деформації ідеально-пластичної оболонки та деформації при РВ, нехтуючи пружною деформацією. Отримані результати створюють передумови для уточненого визначення напружено-деформованого стану металу у зоні деформації і більш точного визначення технологічних параметрів РВ.

Визначення напруженого стану металу в центрі деформації є важливим завданням, вирішення якого дозволяє точніше управляти процесом формоутворення оболонки в процесі витискування. Особливого значення ці параметри набувають при безпорному способі РВ, коли процес проводиться на граничних значеннях стійкості металу оболонки.

Мета роботи полягає у визначенні залежностей силової взаємодії інструменту з оболонкою при ротаційному витяганні без нависного стоншування в процесі формоутворення оболонки під впливом локального натиску давильного ролика для створення передумов уточненого визначення напружено-деформованого стану металу у зоні деформації та зусиль деформації.

При РВ має місце локальний додаток деформуючого зусилля до оболонки. Внаслідок несесиметричного характеру навантажень оболонки у неї виникає дотичне напруження уздовж граней елементарної ділянки, виділеної на поверхні оболонки меридіональними і широтними перетинами.

При відносно малій товщини заготовки (відношення товщини заготовки  $S$  до радіусу деформації  $R_p$  менш 0,2 при  $R_p = \text{const}$ ) на деякій ділянці схему напруженого стану приблизно можна вважати плоскою.

При РВ контактне дотичне напруження на поверхні, спричинене силами тертя, дуже незначне, що дозволяє в більшості випадків вести процес без змащування. Таким чином, при складанні рівнянь рівноваги можна нехтувати елементарними поверхневими силами  $\mu\tau_k$  і не підрозділяти центр деформації на контактну і позаконтактну зони.

Характер дотичного напруження в елементі поверхні, виділеному в центрі двома нескінченно близькими меридіональними перетинами, кут між якими дорівнює  $d\theta$ , і двома широтними перетинами, один з яких перпендикулярний осі обертання, а інший є конічним перетином, нахиленим до першого під кутом  $d\theta$ . Цей елемент представлений на рис. 1. Грані елемента, на які діє нормальне і дотичне напруження, приймемо перпендикулярними до серединної поверхні елемента і, таким чином, без врахування зміни товщина уздовж елемента може бути прийнята постійною і рівною  $S$ .

З рис. 1 витікає, що елементарна ділянка утворена перетином чотиригранної піраміди з вершиною на осі обертання оболонки. Всі чотири

грані піраміди мають кут біля вершини, що дорівнює  $d\theta$ , найбільш коротке ребро завдовжки  $\rho$ , перпендикулярне до осі обертання. Площина грані  $oad$  також перпендикулярна осі. Визначимо сторони елемента:

$$ad = \rho d\theta \frac{\cos \frac{\partial \theta}{2}}{\cos(\mu + \partial \theta)} \cong \frac{\rho d\theta}{\cos \mu}, \quad ab \cong \frac{\rho d\theta}{\cos \nu}, \quad (1)$$

$$cb = \frac{\rho d\theta}{\cos \mu \cdot \cos \xi}, \quad cd = \frac{\rho d\theta}{\cos \mu \cdot \cos \xi},$$

де  $\xi$  - кут нахилу виділеної площі до осі обертання.

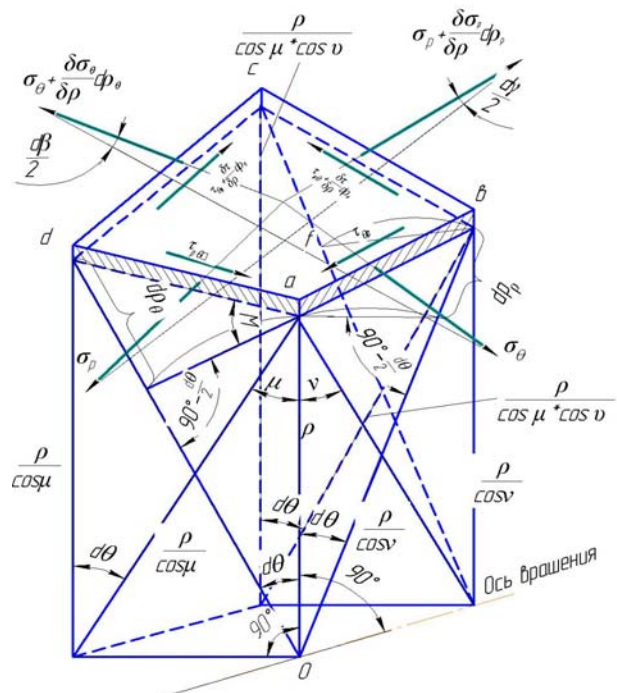


Рис. 1. До визначення напруження в центрі деформації

Складемо рівняння рівноваги елемента оболонки, проектуючи всі сили на головну широту, яке у окремому випадку, коли  $\mu = 0$ , що має місце на головному меридіані і на межі осередку деформації, буде таким:

$$\tau_{\rho\theta}(1 - \cos \xi) - \tau_{\theta\rho}(1 - \cos \xi) + \frac{\partial \tau}{\partial \rho} d\rho = 0 \quad (2)$$

оскільки  $\tau_{\rho\theta} = \tau_{\theta\rho}$ ,  $d\tau = 0$ .

Задача зводиться до осесиметричної, розглянутої в літературі, присвяченій витяжці у штампах [5]. Можна вважати, що дотичне напруження з'являється в оболонці при  $\mu \geq 0$ . Оскільки найбільшого значення кут  $\mu$  набуває в точці С (рис. 1) і поступово убуває до нуля вліво і вправо від неї. Якщо врахувати, що кут  $\mu$  в реальному процесі не перевищує  $5\theta$ , то слід

очікувати, що максимальне значення дотичного напруження невелике і в подальших висновках ним можна нехтувати.

Повторне виведення рівняння рівноваги без участі в ньому дотичного напруження дозволяє визначити кут  $b\gamma$ :

$$d\gamma = \frac{\cos \mu}{\cos \xi} \times \frac{d\rho_\theta}{\rho}; \quad (3)$$

Складемо рівняння рівноваги, проектуючи всі сили від нормальних напружень на широту з врахуванням формули (3). Після скорочення та з урахуванням того, що  $\sigma_\rho = \sigma_\theta + \sigma_s$ , після інтегрування отримаємо рівняння:

$$\frac{\sigma_\theta(1-\cos \mu)}{(\sigma_\theta + \sigma_s)(\cos \xi + 1) \frac{\cos \mu}{2 \cos \xi}} + \frac{\ln \left| (\sigma_\theta + \sigma_s)(\cos \xi + 1) \frac{\cos \mu}{2 \cos \xi} \right|}{(\cos \xi + 1) \frac{\cos \mu}{2 \cos \xi}} = \ln \rho + C \quad (4)$$

Зупинимося детальніше на виведенні умови рівноваги на межі центра деформації. З рівняння (2) випливає, що при  $\mu = 0$  дотичне напруження відсутнє. Умова  $\mu = 0$ , як було сказано вище, має місце на межі центра деформації. В цьому випадку напруження  $\sigma_\rho$  і  $\xi_\theta$  можна вважати головним напруженням, тобто  $\sigma_\rho = \sigma_1$  і  $\sigma_\theta = \sigma_3$ . Виберемо нахил площі так, щоб напруження  $\sigma_y$  було спрямоване по дотичній до межі осередку а  $\sigma_x$  нормально до неї. Вісь дії напруження  $\sigma_x$  перетнеться з головним меридіаном під кутом  $\alpha$ . Прийmemo напруження  $\sigma_x$  вздовж всієї лівої межі в будь-якій її точці таким, що дорівнює нулю. Оскільки перехід елементів заготовки з частини заготовки, що не деформується, з радіусом  $\rho_0$  у центрі деформації на межі супроводжується зменшенням радіуса кривизни серединної поверхні, то як граничну умову можна було б прийняти умову, по якій при  $\rho = \rho_0$  (на межі центра деформації) величина  $\sigma_x$  має дорівнювати  $\Delta \sigma_x$ , тобто приросту напруження  $\sigma_x$ , що спричиняється згином елементів заготовки. Проте зміна кривизни серединної поверхні при вимірюванні її вздовж дії  $\sigma_x$  незначна (має менше значення, визначуваного за формулою (8.52) [5] і тому ним можна нехтувати).

При визначенні деформуючого зусилля, коли всі широтні перетини, що проходять через контактну зону центра, перетинають ліву межу у точках, де  $\alpha$  мало відрізняється від  $\pi/2$ , умову на межі для всіх цих перетинів можна приймати  $\sigma_\rho = \sigma_s$ ;  $\sigma_\theta = 0$ . Це гранична умова і використана

при знаходженні у формулі значення довільної постійної  $C$ :

$$C = \frac{\ln \left[ \sigma_3 (\cos \xi' + 1) \frac{1}{2 \cos \xi'} \right]}{(\cos \xi' + 1) \frac{1}{2 \cos \xi'}} - \ln R'''. \quad (5)$$

Всі широтні перетини, що проходять усередині цієї зони, перетинають ліву межу в точках, де дотичні до межі приблизно можна вважати паралельними головному меридіану, тобто  $\alpha \approx 0$ . Аналогічно визначимо такі напруження:

$$\sigma_\theta = \frac{\left( \frac{\rho}{R'''} \right)^{\frac{\cos \xi + 1}{2 \cos \xi}} \times \left[ \sigma_s (\cos \xi' + 1) \frac{1}{2 \cos \xi'} \right]^{\frac{\cos \xi' \times \cos \xi + 1}{\cos \xi \times \cos \xi' + 1}}}{(\cos \xi + 1) \frac{1}{2 \cos \xi}} - \sigma_s + \frac{\sigma_s \cdot S}{2} \left( \frac{1}{\rho} + \frac{1}{R_{\text{пол}}} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_\rho = \frac{\left( \frac{\rho}{R'''} \right)^{\frac{\cos \xi + 1}{2 \cos \xi}} \times \left[ \sigma_s (\cos \xi' + 1) \frac{1}{2 \cos \xi'} \right]^{\frac{\cos \xi' \times \cos \xi + 1}{\cos \xi \times \cos \xi' + 1}}}{(\cos \xi + 1) \frac{1}{2 \cos \xi}} + \sigma_s + \frac{\sigma_s \cdot S}{2} \left( \frac{1}{\rho} + \frac{1}{R_{\text{пол}}} \right) \quad (7)$$

Оскільки контактним тертям ролика по оболонці нехтуємо, приріст напруження від сил тертя також мале і не враховується. Таким чином, формули (6) і (7) можна вважати допустимими при визначенні напруження на головному меридіані на ділянці контактної зони центра деформації.

Визначимо контактні напруження у осередку деформації. Кривизна оболонки в контактній зоні, вимірювана у напрямі широтних перетинів, визначається кривизною ролика  $R_{\text{пол}}^{-1}$ . При складанні рівняння рівноваги вважатимемо, що радіус ролика в широтному перетині не змінюється. Прийmemo, що величина  $R'_{\text{пол}}$  враховує половину товщини оболонки, тобто  $R'_{\text{пол}} = R_{\text{пол}} + S/2$ .

Вважаємо також, що площина ролика перпендикулярна до серединної поверхні елемента, якщо останній розглядати як плоску площадку.

Складемо рівняння рівноваги елемента, в якому після скорочень і нескладних перетворень знайдемо відоме рівняння Лапласа для випадку РВ. Застосувавши умову пластичності, отримаємо:

$$\sigma_k = - \left[ \sigma_\rho \left( \frac{1}{\rho_{\text{cp}}} + \frac{1}{R_{\text{пол}}} \right) - \frac{\sigma_s}{R_{\text{пол}}} \right] S. \quad (8)$$

Наведені формули для визначення меридіонального, широтного і контактного напруження при визначенні площі контактної зони центра деформації за роботою [1] дозволяють знайти величину деформуючого зусилля. Величину деформуючого зусилля при РВ оболонки з матеріалу, що не зміцнюється, можна визначити за формулою:

$$P = F \cdot \sigma_{\kappa_{cp}} \quad (9)$$

У формулі (9) наведено середнє для всієї контактної площадки значення контактного напруження. Воно може бути вираховане як середнє арифметичне значення контактних напружень на головному меридіані і на головній широті. Середнє меридіональне контактне напруження  $\sigma_{\kappa_{cp}}^M$  можна визначити, якщо підставити напруження  $\sigma_{\rho_{rc}}$ , тобто меридіональне напруження в  $\sigma_{\kappa_{cp}}$  точці з координатою, яка, як було сказано вище, ділить ширину контактної зони навпіл. В цьому випадку:

$$\sigma_{\kappa_{cp}}^M = - \left[ \sigma_{\rho_{rc}} \left( \frac{1}{\rho_{cp}} + \frac{1}{R_{пол}} \right) - \frac{\sigma_s}{R_{пол}} \right] \cdot S \quad (10)$$

Оскільки перепад діаметрів  $2R^m$  і  $2r_c$  у реальному процесі незначний, можна прийняти, що зміни меридіонального напруження  $\mathcal{G}_\rho^M$  уздовж широти в контактній зоні малі і, не вираховуючи значення  $\mathcal{G}_\rho^M$  на лівій межі контактної зони центра деформації, можна прийняти, що:

$$\sigma_{\kappa_{cp}} \cong \sigma_{\kappa_{cp}}^M \quad (11)$$

Напруження  $\sigma_{\rho_{rc}}$  в (10) можна визначити з формули (7). Проте прирости напруження від згину по широті  $\sum \Delta \sigma_\theta$  слід прийняти за формулою:

$$\sum \Delta \sigma_\theta = \frac{\sigma_s \cdot S}{4} \left( \frac{1}{\rho_{cp}} + \frac{1}{R_{пол}} \right), \quad (12)$$

оскільки в межах контактної зони ще не відбувається повторне розпрямлення елементів оболонки з радіуса  $R_{пол}$  до  $R \approx \infty$  і потім до  $R = r_c$ . З урахуванням наведеного формула (7) запишеться так:

$$\sigma_{\rho_{rc}} = \frac{\left( \frac{r_c}{R^m} \right)^{\frac{\cos \xi + 1}{2 \cos \xi}} \left[ \sigma_s (\cos \xi' + 1) \frac{1}{2 \cos \xi} \right]^{\frac{\cos \xi' \cos \xi + 1}{\cos \xi \cos \xi' + 1}}}{(\cos \xi + 1) \frac{1}{2 \cos \xi}} + \frac{\sigma_s \cdot S}{4} \left( \frac{1}{r_c} + \frac{1}{R_{пол}} \right) \quad (13)$$

$$\xi = \varphi_1 + \frac{\delta \rho}{2} = \frac{\xi + \varphi_1}{2};$$

$$\xi' = \frac{\xi + \varphi_1}{2} + \gamma = \frac{\xi + \varphi_1}{2} \arcsin \left[ \sin \frac{\xi + \varphi_1}{2} + \frac{S_{pez}}{\rho_{cp}} \cos \varphi_1 \right]. \quad (14)$$

Використання формул (13) і (14) показує, що в діапазоні подач, застосованих в РВ без особливої шкоди для точності можна приймати  $\sigma_{\rho_{rc}} \cong \sigma_s$ . Це витікає з факту, що при  $\xi \rightarrow \xi'$  і  $r_c \rightarrow R^m$  перший доданок в правій частині формули (13) прагне до значення  $\sigma_s$ . З додаванням до нього параметра  $\sum \Delta \sigma_\theta$  величина  $\sigma_{\rho_{rc}}$  стає приблизно рівною  $\sigma_s$ . Тому для практичних розрахунків можна у формулі (8) прийняти  $\sigma_\theta = 0$ , а середнє контактне напруження

$$\sigma_{\kappa_{cp}} = - \frac{\sigma_s \cdot S}{\rho_{cp}} \quad (15)$$

Зусилля деформації, результуючий вектор якої пройде з центра кола радіуса  $\rho_{cp}$  через тачку з координатою  $r_c$ , визначимо за формулою (9). Причому напруження  $\sigma_{\kappa_{cp}}$  можна приймати за формулою (15). Проекція зусилля Р на вісь обертання Рх визначиться за формулою:

$$P_x = P \cdot \sin \frac{\xi + \varphi_1}{2}; \quad (16)$$

а на напрям, перпендикулярний осі обертання –

$$P_y = P \cdot \cos \frac{\xi + \varphi_1}{2}; \quad (17)$$

При суворому визначенні напрямку вектора зусилля Р слід враховувати той факт, що кут між площиною головного меридіана і цим вектором не дорівнює нулю, а дорівнює  $\frac{\delta \theta}{2}$ .

Центр тиску дещо зміщений в ліву контактну зону, тобто існує не така, що дорівнює нулю проекція сили Р на вертикальну площину. Проекція ця  $P_z$ , як показано в численних роботах, на порядок менше за свою величиною від двох інших складових, отже в розрахунках її можна не брати до уваги.

#### Висновки.

1. Визначення напруженого стану металу в центрі деформації, виконано на підставі аналізу граней елементарної ділянки, виділеної на поверхні оболонки меридіональними і широтними перетинами, утвореними перетином чотиригранної піраміди з вершиною на осі обертання оболонки.

2. Наведені формули для визначення меридіонального, широтного і контактного напруження при відомій площі контактної зони центра деформації дозволяють знайти величину деформуючого зусилля.

3. Визначено зусилля деформації конічної оболонки з матеріалу, що не зміцнюється, на вісь обертання і перпендикулярну осі обертання. Створені передумови для уточненого керування процесом формоутворення.

#### Література

1. Чесноков О. В. Визначення геометрії осередку деформації при ротаційній витяжці оболонкових деталей без навмисного стоншування / О. В. Чесноков, В. І. Чорна, О. М. Набокін // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2012. – № 6 (93). – С. 13 – 17.
2. Могильный Н. И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках / Могильный Н. И. – М.: Машиностроение, 1983. – 190 с.
3. Моисеев В. М. Исследование процесса многопереходной ротационной вытяжки из конических заготовок. Дис. канд. техн. наук. - Ворошиловград, 1979. - 188 с.
4. Григорьев П. Ф. Исследование процесса тепловой ротационной вытяжки оболочек из нержавеющей стали аустенитного класса. - Дис. канд. техн. наук. – Ворошиловград, 1980. - 222 с.
5. Сторожев М. В. Теория обработки материалов давлением: учебник для вузов / Сторожев М. В., Попов Е. А. – М.: Машиностроение. 1977, – 423 с.

#### References

1. Chesnokov O.V. Vyznachennja geometrii oseredku deformacii pri rotacijnij vitjazhki obolonkovih detalej bez navmishnogo stonshuvannja / O.V. Chesnokov, V.I. Chorna, O.M. Nabokin // Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija. – 2012. – № 6 (93). – S. 13–17.
2. Mogil'nyj N.I. Rotacionnaja vytjazhka obolochkovykh detalej na stankah. - M.: Mashinostroenie, 1983. - 190 s.
3. Moiseev V.M. Issledovanie processa mno-goperehodnoj rotacionnoj vytjazhki iz konicheskikh zagotovok. Dis. kand.tehn. nauk. - Voroshilovgrad, 1979. - 188 s.
4. Grigor'ev P.F. Issledovanie processa tep-loj rotacionnoj vytjazhki obolochek iz nerzhaveju-shhjih stalej austenitnogo klassa. - Dis. kand. tehn. nauk. - Voroshilovgrad, 1980. - 222 s.
5. Storozhev M.V., Popov E.A. Teorija obrabotki materialov davleniem. Uchebnik dlja vuzov. – M.: Mashinostroenie. 1977, - 423 s.

#### Витренко В. А., Чесноков А. В., Черная В. И. Параметры силового взаимодействия инструмента с оболочкой при ротационной вытяжке оболочковых деталей без преднамеренного утонения

*Рассмотрено не осесимметричное напряженное состояние оболочки от локально приложенного деформирующего усилия при ротационной вытяжке. Выделен центр деформации и определены напряжения вдоль граней элементарного участка, выделенного на поверхности оболочки меридиональными и широтными сечениями. Получены зависимости для определения напряженного состояния металла в очаге деформации. Определены условия равновесия на границе очага деформации. Для идеально-пластичного материала оболочки определены силовые параметры ротационной вытяжки.*

**Ключевые слова:** ротационная вытяжка, оболочковые детали, деформации, напряжения, сила.

#### Vitrenko V. A., Chesnokov A. V., Chernaja V. I. Parameters of the power tool interaction with the shell at spinning shell parts without deliberate thinning

*Non-axis-symmetrical tension state of the shell as to locally applied deforming effort at rotary extractor has been investigated. The centre of deformation has been singled out and tensions along edges of elementary part of the selected area on the shell by meridional and latitudinal crosspieces have been defined. Dependences for definition of metal tension state in environmental deformation have been obtained. Conditions of balance at the verge of deformation environment have been defined. Power parameters for rotary extractor at ideally plastic material have been defined.*

**Key words:** rotary extractor, shell parts, deformation, tension, power.

**Вітренко Володимир Олексійович** – д. т. н., проф., завідувач кафедри технології машинобудування та інженерного консалтингу, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Луганськ, Україна, e-mail: tm@snu.edu.ua.

**Чесноков Олексій Вікторович** – д. т. н., проф., завідувач кафедри технологій виробництва і професійної освіти, ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка», Луганськ, Україна, e-mail: kafipd@luguniv.edu.ua.

**Чорна Валентина Ігорівна** – аспірант кафедри технології машинобудування та інженерного консалтингу, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Луганськ, Україна, e-mail: tm@snu.edu.ua.

Рецензент: **Даніч В. М.**, д. т. н., професор.

Статтю подано 24.03.14