



УДК 621.77.01

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-5

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ШИРОКИХ ФЛАНЦІВ  
НА ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВКАХ МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ**

**Матвійчук Віктор Андрійович**, д.т.н., професор  
**Колісник Микола Анатолійович**, аспірант  
Вінницький національний аграрний університет,

**Viktor Matviychuk**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor  
**Mykola Kolisnyk**, Postgraduate  
Vinnytsia National Agrarian University

*В статті наведено результати розробки і дослідження технологічного процесу формування широких зовнішніх фланців кришок бражних і ректифікаційних колон на листових заготовках методом штампування обкочуванням. З цією метою було розроблено обладнання у вигляді обкочувального пристрою до лоботокарного верстата та автономної обкочувальної установки, які дозволяють формувати конічним валком зовнішні фланці. Обкочувальний блок до лоботокарного верстату передбачає наявність гвинтових пружин для притискання валка до заготовки з оправкою. Обидві установки передбачають можливість зміни кута положення осі обкочувального блоку по відношенню до осі оправки із заготовкою.*

*Дослідження показали, що технологічні можливості процесу обмежуються гофроутворенням стінки фланця. Проведено енергосиловий розрахунок відбортуння зовнішніх фланців конічним валком методом ШО та отримані формули для визначення зусиль деформування. Експериментально підтверджена прийнятна точність даних формул, при цьому спостерігається тенденція до збільшення похибки при збільшенні геометричних розмірів заготовки.*

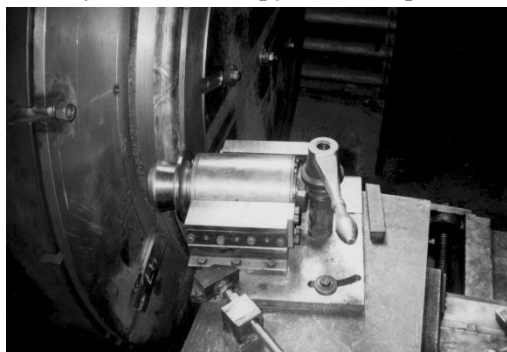
*Для оцінки та розширення технологічних можливостей процесу проведено аналіз формоутворення та деформованого стану заготовок. Оскільки при формуванні зовнішніх фланців методом ШО основною небезпекою є втрата стійкості у вигляді утворення гофрів, то в роботі отримано вираз для визначення максимальної ширини фланця за умови протікання стійкого процесу. При необхідності отримувати більш розвинуті фланці запропоновано на другому етапі забезпечувати потоншення їх стінки шляхом витяжки із застосуванням, при необхідності, нагрівання заготовки індукційним методом.*

**Ключові слова:** штампування обкочуванням, зовнішні фланці, листові заготовки, кришки бражних колон, зусилля деформування, гофроутворення, втрата стійкості.

**Ф. 17. Табл. 1. Рис. 10. Літ. 8.**

### 1. Постановка проблеми

Круглі листові вироби з буртами різної ширини охоплюють значну номенклатуру виробів. При відносно невеликих розмірах такі вироби отримують витяжкою листових заготовок. Для відбортуння великих за розміром кришок і комірців бражних і ректифікаційних колон нами був розроблений процес штампування обкочуванням (ШО), а також спроектовані і виготовлені обкочувальний пристрій до лоботокарного верстата ЛТ2, рис. 1 [1], та обкочувальна установка, рис. 2. Обкочувальним інструментом при цьому слугує конічний ролик.



**Рис. 1.** Обкочувальний пристрій



**Рис. 2.** Обкочувальна установка



В обкочувальному пристрої бокова поверхня конічного ролика проектується у залежності від форми та розмірів бокової поверхні бурта деталі. Рोलік 1 встановлюється, як показано на рис. 3, в гніздо осі 2, при цьому державка 5 розміщується під необхідним кутом до осі оправки на супорті 4, який разом з державкою 5 і роликом 1 підводиться до ділянки заготовки, що відбуртовується. Підпружинення ролика 1 пружними елементами 6 дозволяє запобігати перевантаженням пристрою при радіальному битті поверхні оправки, а також формувати бурти при від'ємному куті нахилу бокової поверхні оправки, що передбачається для компенсації пружинення заготовки.

Вигляд ролика обкочувальної установки показано на рис. 4.

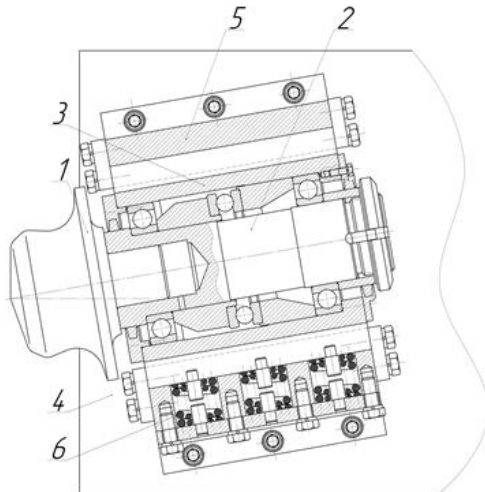


Рис. 3. Блок обкочувального ролика до лоботокарного верстата ЛТ2

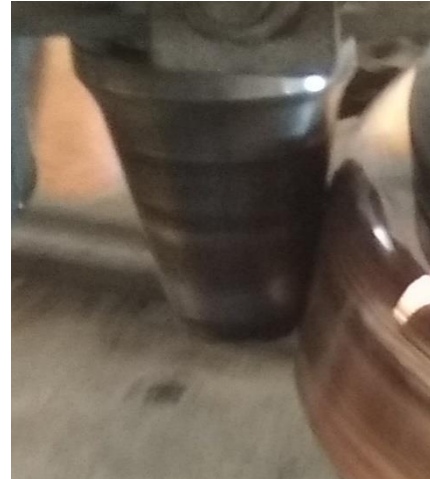


Рис. 4. Вигляд ролика обкочувальної установки

Перевагою даного процесу є його простота, а також висока продуктивність при забезпеченні необхідної якості виробів. Разом з тим, проблемним у разі формоутворення розвинутих зовнішніх фланців є втрата стійкості заготовки у вигляді утворення гофрів.

## 2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Формування розвинутих фланців на листових металах здійснюється шляхом ротаційної витяжки [2] з потоншенням стінки за рахунок витиснення металу. Витиснений метал умовно зображений на рис. 5 заштрихованими надлишковими трикутниками. Як видно зі схеми, частина трикутника, яка припадає на дно деталі, змінюється мало, а частина яка утворює стінку зазнає найбільших змін. Згортання фланця відбувається завдяки тому, що будь-який елемент деформованої ділянки, проходячи при наявності вигину через осередок деформації, отримує витяжку в результаті деформації поперечного стиску.

При цьому заготовка діаметром  $D$  може перетворюватися в циліндр діаметром  $d$  і довжиною  $L$  при наявності обертового руху  $n$  і поступального  $S_{об}$ . А оскільки обсяг металу при цьому не змінюється, то при витяжці довжина деталі  $L$  становитиме:

$$L = h_{\phi}(D-d)/2d = h_{\phi}(K+1)/2, \quad (1)$$

де  $h_{\phi} = (D - d)/2$  – висота фланця,  $K = D/d$  – ступінь витяжки. При  $K=2$ ,  $L=1,5 h_{\phi}$ .

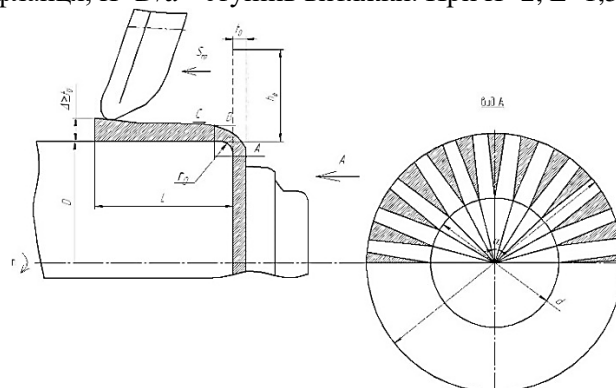


Рис. 5. Схема формування фланця з уточненням стінки

### 3. Мета і завдання досліджень

Метою роботи є забезпечення формування широких фланців на виробках з листової заготовки методом ШО.

Завданням дослідження є розробка процесу формування на листових заготовках методом ШО розвинутих зовнішніх фланців, встановлення факторів, що обмежують технологічні можливості процесу і на основі аналізу зусиль забезпечення виготовлення якісних кришок бражних і ректифікаційних колон.

### 4. Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставленої мети були проведені дослідження з формування фланців на виробках з листової заготовки методом ШО. На рис. 6 показані листові заготовки під обкочування, а на рис. 7 процес формування зовнішнього фланця кришки бражної колони.



Рис. 6. Вигляд листових заготовок під обкочування



Рис. 7. Процес формування методом ШО зовнішнього фланця кришки бражної колони

Проведемо енергосиловий розрахунок відбортуння зовнішніх фланців конічним валком методом ШО.

Розкладемо зусилля  $\bar{P}$ , яке діє із боку заготовки на валок на дві складові: одна складова  $P'_y$  паралельна осі обертання валка, інша  $P'_x$  – перпендикулярна цій осі (рис. 8). При визначенні зусилля деформування  $\bar{P}$  введемо такі позначення його складових:  $P_y$  – паралельна осі обертання заготовки, інша  $P_x$  – перпендикулярна цій осі. Кут між осями обертання валка та заготовки – кут  $\alpha$ . Тоді, відповідно рис. 6, складові повного зусилля  $P'_x$  та  $P'_y$  через  $P_x$  та  $P_y$  запишуться у вигляді

$$P'_x = P_x \cdot \cos \alpha + P_y \cdot \sin \alpha; \quad (2)$$

$$P'_y = P_y \cdot \cos \alpha - P_x \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

Розглянемо сили, які діють у перерізі, що проходить через вісь обертання валка перпендикулярно до супорта верстата (рис. 9).

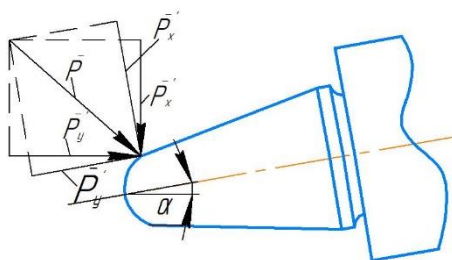


Рис. 8. Розкладання повного зусилля, що діє на валок вздовж осі обертання валка та вздовж осі обертання заготовки

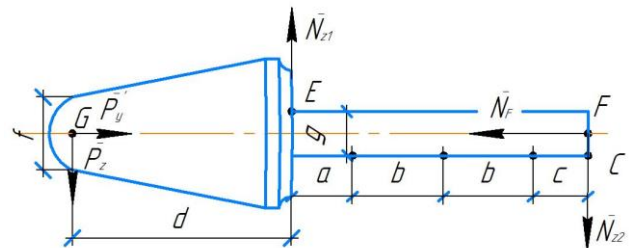


Рис. 9. Сили, що діють на розкочувальну голівку у перерізі, що перпендикулярний супорту верстата

З рівнянь рівноваги знайдемо реакції поверхонь  $N_{z1}$  та  $N_{z2}$



$$N_{z1} = \frac{a+2b+c+d}{a+2b+c} \cdot P_z; \quad (4)$$

$$N_{z2} = \frac{d}{a+2b+c} \cdot P_z. \quad (5)$$

У перерізі, що паралельний супорту верстата, в залежності від співвідношення  $P'_x$  та  $P'_y$  можливі два варіанти дії сил на корпус розкочувальної головки (рис. 10 а,б). Для обох випадків складено рівняння рівноваги і визначено складові зусилля.

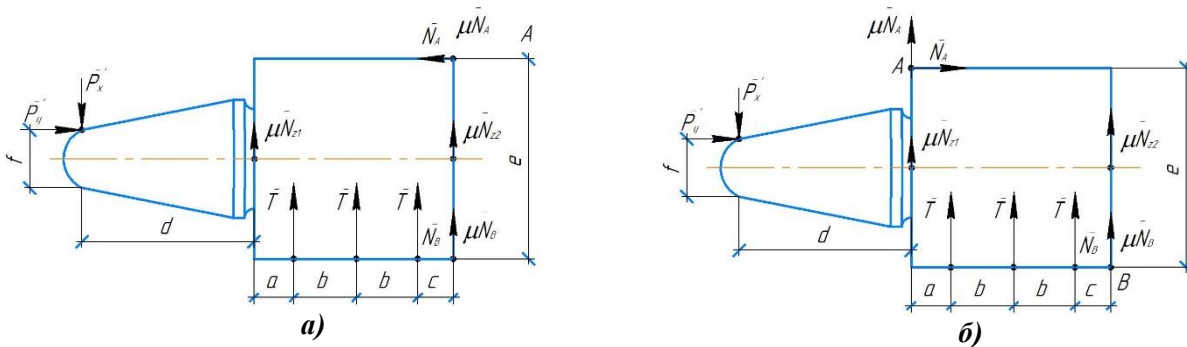


Рис. 10. Сили, що діють на розкочувальний блок у перерізі, що паралельний супорту верстату

Для варіанту навантаження, що зображений на рис. 8а, отримаємо такі співвідношення

$$P'_x = 3T + \mu(N_A + N_B + N_{z1} + N_{z2}); \quad (6)$$

$$N_B = \frac{P'_y \cdot \left(\frac{e-f}{2}\right) + (P'_x - \mu P'_z) \cdot (d+a+2b+c) - 3T(c+b)}{e}; \quad (7)$$

$$N_A = P'_y - \frac{P'_y \cdot \left(\frac{e-f}{2}\right) + (P'_x - \mu P'_z) \cdot (d+a+2b+c) - 3T(c+b)}{e}. \quad (8)$$

Для другого варіанту навантаження (див. рис. 5б) з рівнянь рівноваги отримаємо

$$P'_x = 3T + \mu(N_A + N_B + N_{z1} + N_{z2}); \quad (9)$$

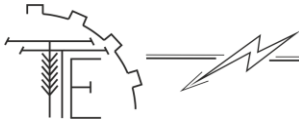
$$N_B = \frac{P'_y \cdot \left(\frac{e-f}{2}\right) + P'_x d + 3T(a+b) + \mu d P'_z}{e - \mu(a+2b+c)}; \quad (10)$$

$$N_A = \frac{P'_y \cdot \left(\frac{e-f}{2}\right) + P'_x d + 3T(a+b) + \mu d P'_z}{e - \mu(a+2b+c)} - P'_y. \quad (11)$$

І в першій і в другій схемі навантаження при забезпеченні коефіцієнта тертя  $\mu = 0,03 \dots 0,05$  введенням між поверхнями тертя графітного змащування при визначенні поперечного зусилля  $P'_x$  можна знехтувати другим доданком.

Для розрахунку точок дотику заготовки до оправки і інструмента  $x_A$ ,  $x_B$  використаємо методику, що запропонована у роботі [3] з врахування, що відстань між оправкою та валком  $t$  є не постійною величиною, а шукається виходячи із рівняння (11).

Задача визначення точок дотику набуває вигляду



$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} = -\frac{x_A}{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}; \\ & \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} \cdot \left[ x_B - \frac{s}{2} \times \right. \\ & \left. \times \cos \left( \arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R - x_B} \right) \right] + \left[ \sqrt{R_M^2 - x_A^2} - R_M + \right. \\ & \left. + \frac{s}{2} \cdot \sin \left( \arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A} \right) - \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} \times \right. \\ & \left. \times \left( x_A + \frac{s}{2} \cdot \cos \left( \arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A} \right) \right) \right] = -\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2} - \\ & \left. - h + R_n - \frac{s}{2} \cdot \sin \left( \arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R - x_B} \right) \right]; t = t_0. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

де  $R_M$   $R_n$  – радіуси заокруглень оправки і інструмента;  $s$  – товщина заготовки;  $h$  – подача інструмента;  $t_0$  – початкова відстань між оправкою та інструментом;

Під час експерименту фіксували найбільше значення поперечного зусилля та подачу при цьому і порівнювали його із розрахунковим. Експеримент проводили при виготовленні циліндричних виробів із круглої заготовки товщиною 3 мм, матеріал заготовки мідь М01. При цьому валок залишався незмінним, а варіювався діаметр циліндричної заготовки та радіус заокруглення оправки. Таким чином виготовлялись циліндричні деталі діаметром 200, 300, 600 мм. Експериментальні дані зазору між валком та оправкою і поперечного зусилля, що діє на розкочувальний валок внесено до таблиці 1. Для порівняння у таблицю 1 внесені дані розрахунку поперечного зусилля та похибка між експериментальними та розрахунковими даними.

Таблиця 1

Значення зазору та поперечної складової зусилля деформування

Діаметр деталі, мм	Величина зміни зазору, мм	Попередній натяг пружин, мм	Експериментальне значення поперечної складової зусилля, Н	Розрахунок поперечної складової зусилля, Н	Похибка, %
200	1.68	3	3168	3544	11.9
300	2.15	3	3486	3972	13.9
600	2.21	5	4880	5710	17

Таким чином, спостерігається тенденція до збільшення похибки при збільшенні геометричних розмірів заготовки.

Складки, які утворюються на зовнішніх фланцях, обумовлені дією колових напружень стиску, так як для утворення складок на фланці затрачається менше енергії, ніж при обтискуванні. З іншої сторони, якщо деталь має дуже велике стоншення, то при нахилі фланця вперед і назад необхідно менше енергії, ніж для збільшення діаметра в радіальній площині.

У роботі [4] досліджено НДС на периферії фланця під час ротаційної витяжки. Згідно з цією роботою у фланці реалізується об'ємний деформований стан:

$$\varepsilon_z = -\frac{2B}{D}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\rho = -\frac{\varepsilon_z}{2} = \frac{B}{D},$$

де  $B \approx \frac{D-d}{2}$  - ширина фланця.

Тоді максимальну ширину фланця за умови протікання стійкого процесу без утворення гофрів можна визначити за методикою [5]:



$$B_{\max} = \left( \frac{1}{\cos \sqrt{-c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}}} - 1 \right) \cdot \frac{D}{2}, \quad (14)$$

$$\text{де } c_1 = \frac{19}{30} \cdot c_2; \quad c_2 = \frac{1}{\frac{631}{3150} + \frac{4 \cdot \sigma_s \cdot D^2 \cdot (1-\nu)^2}{20 \cdot E \cdot s^2}}.$$

Таким чином максимальна ширина фланця обмежується саме небезпекою утворення гофрів (14). Зміщений об'єм металу може бути визначено виразом:

$$V_{zm} = (t_0 \pi / 4) (D^2 - d^2) - (D - d) \pi d t_0 / 2, \quad (15)$$

де  $t_0$  – товщина вихідної заготовки.

$$V_{zm} = (t_0 \pi / 4) (D^2 - d^2) - (D - d - 2d) (t_0 \pi / 4) (D - d)^2. \quad (16)$$

Ступінь деформації визначається формулою

$$\varepsilon = V_{zm} / V, \quad (17)$$

де  $V$  – об'єм заготовки.

Зазначена ступінь деформації змінюється в межах від 0 до 1.

Стійкість і продуктивність процесу залежить від наступних факторів: ступеня деформації, подачі, частоти обертання заготовки, геометричних характеристик робочої поверхні інструмента, радіуса торцевої частини оправки, кута нахилу осі ролика до осі оправки, діаметра ролика, змащення, охолодження.

У разі недостатньої жорсткості обладнання ШО при витяжці з потоншенням стінки слід передбачати збільшення кута нахилу осі обкочувального ролика та нагрівання заготовки. При необхідності формування методом ШО особливо широких фланців розробляється індукційна установка для їх нагрівання з метою ефективного перерозподілу матеріалу (див. рис. 5).

## 5. Висновки та пропозиції

Методом ШО досліджено виготовлення зовнішніх фланців кришок бражних і ректифікаційних колон з використанням листових заготовок. Для оцінки та розширення технологічних можливостей процесу проведено аналіз формоутворення та деформованого стану заготовок. До основного фактору, що обмежує технологічні можливості, відносяться втрата стійкості стінки фланця у вигляді гофроутворення. Отримано формули для визначення зусиль обкочування.

При формуванні зовнішніх фланців основною небезпекою є утворення гофрів, тому в роботі отримано вираз для визначення максимальної ширини фланця за умови протікання стійкого процесу. При необхідності отримати більш розвинуті фланці запропоновано усувати гофроутворення шляхом потоншення стінки з використанням її нагрівання індукційним методом.

### Список використаних джерел

1. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Краєвський В. О. Розробка маловідходних процесів формування тонкостінних циліндричних деталей. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* (Донбаська державна машинобудівна академія). Краматорськ: ДДМА. 2004. С. 281–286.
2. Могильный Н. И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках. М. : Машиностроение. 1983. 190 с.
3. Краєвський В. О., Матвійчук В. А., Михалевич В. М. Математична модель згинання смуги. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* (Донбаська державна машинобудівна академія). Краматорськ : ДДМА. 2006. С. 103–108.
4. Баркая В. Ф. Формоизменение листового металла. *Металлургия*. 1976. 264 с.
5. Баркая В. Ф., Рузанов Ф. И. Определение критической ширины фланца при ротационной обкатке цилиндрических оболочек. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1973. №10. С. 15–17.
6. Калетник Г. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Київ. «Хайт-Тек Прес». 2013. 528 с.
7. Круглов Е.П., Павлов А.Ф., Шканов И.Н. Основы выбора заготовок и нормирование расхода материалов: Учебное пособие. Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 1998. 184 с.



8. Исаевич Л. А., Сидоренко М. И., Гуринович В. А., Шиманский А. В. Расчет усилия деформирования при пластическом формоизменении отбортованного фланца в трубной заготовке. *Вестн. БНТУ*. 2007. № 3. С. 10–15.

#### References

- [1]. Matviychuk, V.A., Mikhalevich, V.M., Kraevsky, V.O. (2004). *Development of low-waste processes of formation of thin-walled cylindrical parts. Improvement of processes and equipment of pressure treatment in metallurgy and machine building* (Donbass State Machine-Building Academy). Kramatorsk: DSEA. 281–286. [in Ukrainian].
- [2]. Matviichuk, V. A., Aliyev, I. S. (2009). *Sovershenstvovanie processov lokal'noj rotacionnoj obrabotki davleniem na osnove analiza deformiruемости металлов: Monografiya [Improvement of processes of local rotary pressure treatment on the basis of the analysis of metal deformability: Monograph]*. Kramatorsk: DGMA [in Ukrainian].
- [3]. Kraevsky, V.O., Matviychuk, V.A., Mikhalevich, V.M. (2006). *Mathematical model of strip bending. Improvement of processes and equipment of pressure treatment in metallurgy and machine building* (Donbass State Machine-Building Academy). Kramatorsk: DSEA. 103–108. [in Ukrainian].
- [4]. Barkaya, V.F. (1976). *Form change of sheet metal*. Metallurgy. [in Russian].
- [5]. Barkaya, V.F., Ruzanov, F.I. (1973). Determination of the critical width of the flange during rotational running-in of cylindrical shells. *Forging and stamping production*. 10. 15–17. [in Russian].
- [6]. Kaletnik, G. (2013) *Osnovy inzhenernykh metodiv rozrakhunkiv na mitsnist i zhorstkist [Basic engineering methods of rozrakhunkiv on the city and the market]*. Kiev: "High-Tech Press"[in Ukrainian].
- [7]. Kruglov, E.P., Pavlov, A.F., Shkanov, I.N. (1998). *Fundamentals of the choice of blanks and rationing of material consumption*: Kazan Publishing House. state tech. University. [in Russian].
- [8]. Isaevich, L.A., Sidorenko, M.I., Gurinovich, V.A., Shimanskij, A.V. (2007). Raschet usilija deformirovaniya pri plasticheskom formoizmenenii otbortovannogo flanca v trubnoj zagotovke [Calculation of effort of deformation during plastic forming the beaded flange in the pipe blank]. *Vestnik BNTU – Bulletin BNTU*. 3, 10–15. [in Russian].

#### РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ШИРОКИХ ФЛАНЦЕВ НА ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ МЕТОДОМ ШТАМПОВКИ ОБКАТЫВАНИЕМ

В статье приведены результаты разработки и исследования технологического процесса формирования широких внешних фланцев крышек бражной и ректификационных колонн на листовых заготовках методом штамповки обкочувания. С этой целью был разработан оборудования в виде обкочувального устройства к токарному станку и автономной обкатувальной установки, которые позволяют формировать коническим валиком внешние фланцы. Обкочувальный блок к токарные станка предусматривает наличие винтовых пружин для прижатия валика к заготовке с оправкой. Обе установки предусматривают возможность изменения угла положения оси обкочувального блока по отношению к оси оправки с заготовкой.

Исследования показали, что технологические возможности процесса ограничиваются гофроутворением стенки фланца. Проведено энергосилового расчет видбортування внешних фланцев коническим валиком методом ШО и полученные формулы для определения усилий деформирования. Экспериментально подтверждена приемлемая точность данных формул, при этом наблюдается тенденция к увеличению погрешности при увеличении геометрических размеров заготовки.

Для оценки и расширение технологических возможностей процесса проведен анализ формообразования и деформированного состояния заготовок. Поскольку при формировании внешних фланцев методом ШО основной опасностью является потеря устойчивости в виде образования гофр, то в работе получено выражение для определения максимальной ширины фланца при протекании устойчивого процесса. При необходимости получать более развитые фланцы предложено на втором этапе обеспечивать истончение их стенки путем вытяжки с применением, при необходимости, нагрев заготовки индукционным методом.

**Ключевые слова:** штамповка обкочувания, внешние фланцы, листовая заготовка, крышки бражной колонн, усилия деформирования, гофроутворения, потеря устойчивости.

**Ф. 17. Табл. 1. Рис. 10. Лит. 8.**

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF FORMATION OF WIDE FLANGES ON SHEET PROCUREMENTS BY ROLLING STAMPING METHOD**

*The article presents the results of development and research of the technological process of forming wide outer flanges of lids of malt and distillation columns on sheet blanks by rolling stamping. For this purpose, equipment has been developed in the form of a rolling device for a lathe and an autonomous rolling unit, which allow to form the outer flanges with a conical roll. The rolling unit to the lathe provides the presence of coil springs for pressing the roll to the workpiece with the mandrel. Both settings provide the ability to change the angle of the axis of the rolling unit relative to the axis of the mandrel with the workpiece.*

*Studies have shown that the technological capabilities of the process are limited by the corrugation of the flange wall. The power calculation of flanging of external flanges by a conical roll by the SHO method is carried out and formulas for determination of deformation forces are received. The acceptable accuracy of these formulas has been experimentally confirmed, and there is a tendency to increase the error with increasing geometric dimensions of the workpiece.*

*To assess and expand the technological capabilities of the process, an analysis of the formation and deformed state of the workpieces. Since the main danger in the formation of external flanges by the SHO method is the loss of stability in the form of corrugations, the paper obtained an expression for determining the maximum width of the flange under the condition of a stable process. If it is necessary to obtain more developed flanges, it is proposed in the second stage to provide thinning of their wall by drawing with the use, if necessary, heating the workpiece by induction method.*

**Key words:** rolling stamping, outer flanges, sheet blank, covers of furnace columns, deformation forces, corrugation, loss of stability.

**F. 17. Table. 1. Fig. 10. Ref. 8.**

**ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

**Матвійчук Віктор Андрійович** – доктор технічних наук, професор, декан інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [vamatv50@gmail.com](mailto:vamatv50@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174> ).

**Колісник Микола Анатолійович** – аспірант Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: [kolisnik30@gmail.com](mailto:kolisnik30@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556> ).

**Матвийчук Виктор Андреевич** - доктор технических наук, профессор, декан инженерно-технологического факультета Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: [vamatv50@gmail.com](mailto:vamatv50@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174>).

**Колесник Николай Анатольевич** – аспирант Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, email: [kolisnik30@gmail.com](mailto:kolisnik30@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>).

**Matviychuk Viktor** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electric Power Stations and Systems of the Vinnytsia National Agrarian University (3 Solnechna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: [vamatv50@gmail.com](mailto:vamatv50@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174>).

**Kolisnyk Mykola** – Postgraduate Student of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, email: [kolisnik30@gmail.com](mailto:kolisnik30@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>).