

**Матвійчук В. А.**

д.т.н., професор

Савків В. В.

аспірант

*Вінницький національний
аграрний університет***Matviychuk V.**

Dr. Sc. of Eng., Professor

Savkiv V.

Postgraduate Student

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.77.01****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-6****ОБГРУНТУВАННЯ
ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ
ПРИ ВІДБОРТУВАННІ
ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК
МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ
ОБКочУВАННЯМ**

Процеси штампування обкочуванням (ШО) відносяться до особливо ефективних методів обробки металів тиском. Необхідний профіль заготовки в процесах ШО формується шляхом локального деформування конічними або циліндричними валками із застосування обгрунтованих технологічних схем. При ШО трубних заготовок з відношенням висоти вихідної деформованої частини до товщини стінки більше ніж 2,5, процес висаджування фланців унеможливується втратою стійкості заготовки з наступним утворенням складки. Це явище не дозволяє отримувати широкі фланці висаджуванням. Для формування заготовок з особливо широкими фланцями нами розроблено спосіб відбортування методом ШО.

Сутність способу відбортування полягає у тому, що на початкових етапах обкочування вершину конічного валка зміщують в напрямку плями контакту. На проміжних етапах, для запобігання вивороту стінки заготовки, вершину валка зміщують в протилежному (за вісь заготовки) напрямку. Основні технологічні обмеження при цьому накладає недостатня пластичність матеріалу заготовки, що може спричинити руйнування.

Для обгрунтованої розробки процесів відбортування нами була досліджена механіка формозміни зовнішніх фланців та способи керування плином матеріалу. Проведено аналіз напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу з використанням методу вимірювання твердості і методу сіток. Встановлено характер зміни НДС в найбільш небезпечних зонах заготовки у залежності від співвідношення діаметра фланця і вихідної заготовки. На основі результатів експерименту побудована математична модель траєкторії деформування часток матеріалу зовнішньої поверхні фланця в координатах інтенсивності деформацій – показник напруженого стану. Для оцінки деформованості матеріалу використовували модель підсумовування пошкоджень зі степеневією апроксимацією функції пошкоджень. Модель дозволяє визначати граничні до руйнування розміри фланця, а також використаний ресурс пластичності на проміжних стадіях.

Отримано умову придатності металів підлягати відбортуванню методом ШО для інженерних розрахунків. Обгрунтована необхідність застосування в процесах відбортування методом ШО індукційного нагрівання. Це дозволяє розширити технологічні можливості процесів



відборткування фланців шляхом розробки і використання індукційного нагрівання заготовок, через збільшення характеристик пластичності і зменшення характеристик міцності металів в процесі деформування.

Ключові слова: штампування обкочуванням, відборткування, напружено-деформований стан, оцінка деформованості, індукційне нагрівання.

Постановка проблеми. Процеси штампування обкочуванням (ШО) [1,2,3,4] відносяться до особливо ефективних методів обробки металів тиском. Необхідний профіль заготовки в процесах ШО формується шляхом локального деформування конічними або циліндричними валками із застосування обґрунтованих технологічних схем. До основних технологічних схем відносяться висаджування зовнішніх і внутрішніх фланців, зворотне і пряме видавлювання. При ШО трубних

заготовок з відношенням висоти вихідної деформованої частини до товщини стінки $h_0/b_0 > 2,5$ процес висаджування фланців унеможлиблюється втратою стійкості заготовки з наступним утворенням складки. Таке явище не дозволяє отримувати широкі фланці висаджуванням. Вигляд перерізів заготовок при різних співвідношеннях h_0/b_0 і зміщеннях валка приведено на рис.1.

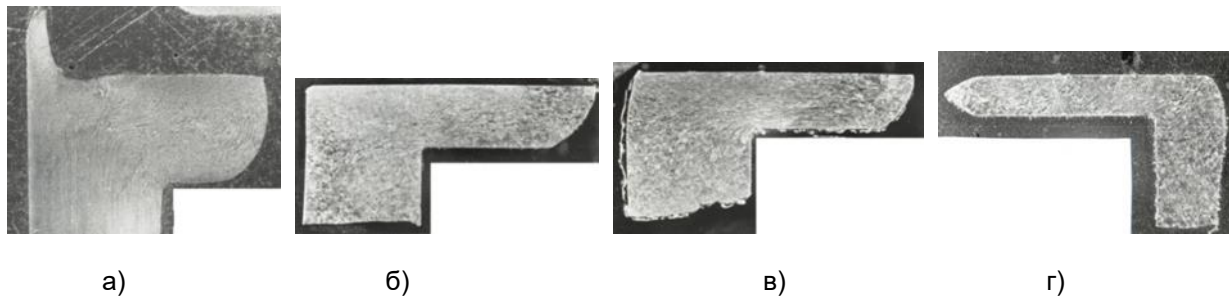


Рис. 1. Перерізи зовнішніх фланців на трубних заготовках при різних положеннях валка і відносних розмірах виставленої під деформування частини заготовки

Для фланців, що показані на рис.1, характерні наступні умови деформування: а) висаджування циліндричним валком заготовки з $h_0/b_0 < 2$ без його відносного зміщення, спостерігається плин матеріалу заготовки в зазор між валком і оправкою з утворенням тонкостінного елемента; б) висаджування заготовки з $h_0/b_0 < 2$ при незначному зміщенні вершини конічного валка ($\delta > 0$), усувається витік матеріалу в зазор між валком і внутрішньою оправкою; в) висаджування заготовки з $h_0/b_0 < 2$ без внутрішньої оправки при відносно більшому зміщенні вершини конічного валка ($\delta > 0$), спостерігається відхід внутрішньої поверхні заготовки в зоні фланця від внутрішньої оправки і незначне її викривлення; г) відборткування конічним валком заготовки з $h_0/b_0 = 5$, $\delta = 2,5 \mu b_0$, де μ - коефіцієнт тертя, без внутрішньої оправки, з інтенсивним плином матеріалу у відцентровому напрямку та незначним потовщенням вихідної

стілки заготовки на заключних етапах деформування через збільшення опору внаслідок зростання сил тертя.

Таким чином, ефект впливу зміщення валка на напрям плину матеріалу заготовки в зоні контакту дозволяє при зміщеннях $\delta > 0$ і відношеннях $h_0/b_0 > 2,5$ отримувати якісні вироби шляхом зовнішнього відборткування стінки трубної заготовки конічним валком (рис. 2а), а зміщення циліндричного валка, як показано на рис. 2б - відповідно внутрішнього відборткування [5].

Сутність способу відборткування полягає у тому, що на початкових етапах обкочування вершину конічного валка зміщують в напрямку плями контакту. Необхідна для відборткування величина зміщення залежить від коефіцієнта тертя μ на контакті валка із заготовкою і відносних розмірів заготовки під формуємий фланець h_0/b_0 .

Такий підхід дозволяє отримувати складно профільні заготовки з розвинутими елементами, в т.ч. і тонкостінними. Відборткування дозволяє максимально



наблизити форму і розміри заготовки до готової деталі, що робить виробництво маловідходним, а деталі такими, що мають підвищені технічні характеристики. Основні технологічні обмеження при цьому накладають характеристики пластичності матеріалу заготовки, що може спричиняти її руйнування.

Значною мірою вирішувати проблеми підвищення пластичності матеріалу заготовок дозволяє їх нагрівання і реалізація гарячого деформування. При цьому проблемними постають питання вибору методів і режимів нагрівання та визначення технологічних можливостей процесів ШО.

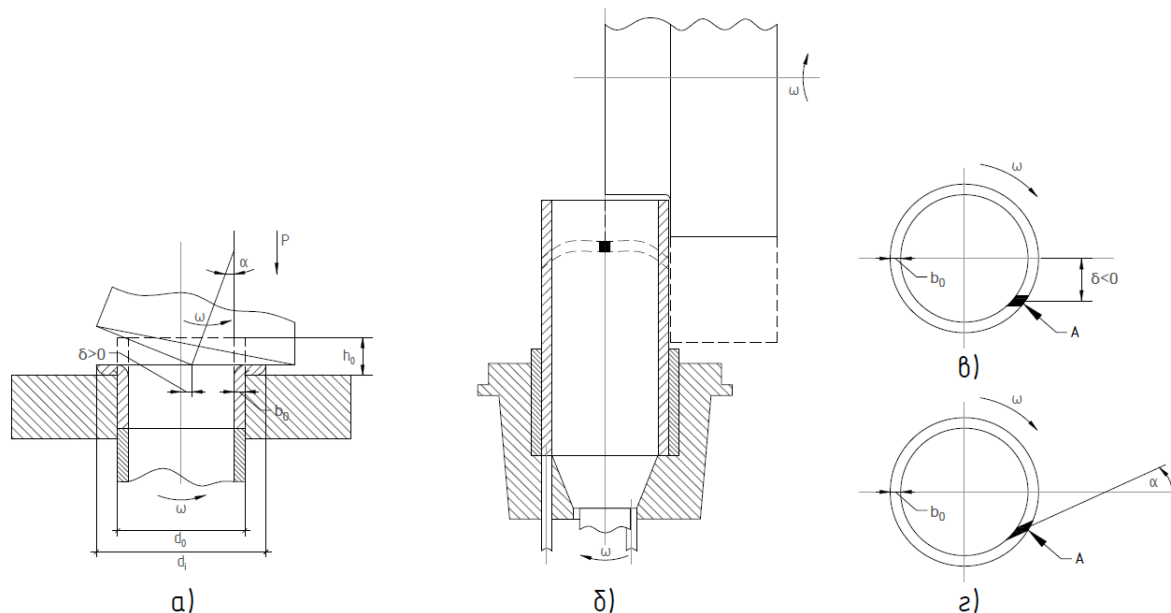


Рис. 2. Технологічні схеми відборткування фланців методом ШО: а – зовнішнього фланця конічним валком; б – внутрішнього фланця циліндричним валком; в, г – положення плями контакту циліндричного валка з заготовкою

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом значне місце серед ефективних методів нагрівання металевих заготовок у різних галузях промисловості посів індукційний нагрів [6,7,8], принцип якого полягає у перетворенні енергії електромагнітного поля, що поглинається електропровідним матеріалом, в теплову енергію. Здебільшого цей метод застосовується при нагріванні феромагнітних матеріалів, зокрема сталей, які посилюють магнітне поле і викликають індукційний ефект вже на відносно низьких частотах.

В установках індукційного нагрівання електромагнітне поле створюють багатовитковою циліндричною котушкою – індуктором, через який пропускають змінний електричний струм, у результаті чого навколо індуктора виникає змінне магнітне поле. Заготовку розміщують всередину індуктора або поруч з ним. Змінний потік магнітної індукції пронизує об'єкт нагрівання і індукує електричне поле. Проте вибір конкретної частоти залежить від геометрії заготовки та властивостей її матеріалу, оскільки електропровідність і магнітна проникність можуть залежати від температури. За оптимізованих умов індукційним нагріванням можна керувати, щоб забезпечити

точний поступовий нагрів з відносно низькими витратами. Невідповідні налаштування процесу нагрівання призводять до недостатнього або неоднорідного нагрівання заготовки та збільшують небезпеку виникнення неоднорідностей мікроструктури та дефектів всередині матеріалу (локальне плавлення або перегрів, що призводить до небажаного аномального зерна), а також розвиток несприятливого напруженого стану, що може призвести до виникнення залишкового напруження при подальшій обробці.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є розробка перспективних схем відборткування методом ШО і обґрунтування необхідності реалізації гарячого деформування з використанням індукційного нагріву.

Основні результати досліджень. Для реалізації поставлених завдань нами був досліджений вплив основних параметрів процесу відборткування на керування механікою формозміни заготовок [2,5]. Для цього з використанням поетапного фотографування була отримана низка положень зовнішнього фланця при його відбортванні, які показані на рис. 3.

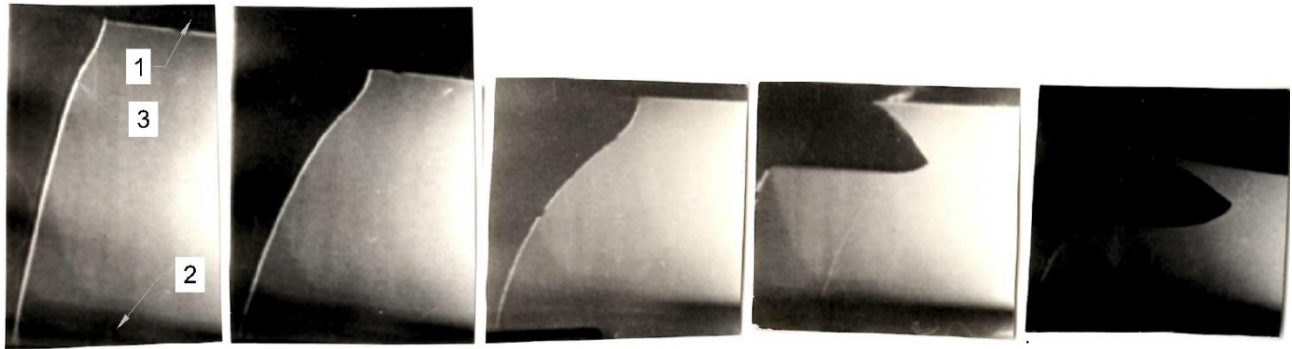
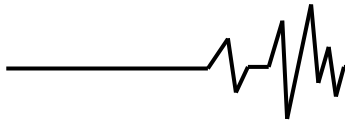


Рис. 3. Поточний вигляд зовнішніх фланців в процесі відбортування методом ШО: 1- конічний валок, 2 – матриця, 3 – вільна бічна поверхня фланця

Дослідження показало, що інтенсивна відцентрова течія металу призводить на певному етапі до вивороту стінки заготовки з наступним формуванням тороподібної фігури. Для запобігання вивороту вершину валка необхідно змістити в протилежному напрямі, $\delta < 0$ і завершити процес відбортування.

На рис. 4а приведений вигляд заготовки на проміжній стадії, коли здійснюється відзначене зміщення вершини валка. Проте

проблема недостатньої пластичності більшості металів при реалізації цього процесу залишається достатньо гострою. На рис. 4б показано руйнування заготовки із сталі 30ХГСА. При цьому заготовки із пластичних матеріалів добре підлягають холодному відбортуванню методом ШО (рис. 4в – мідь М06).

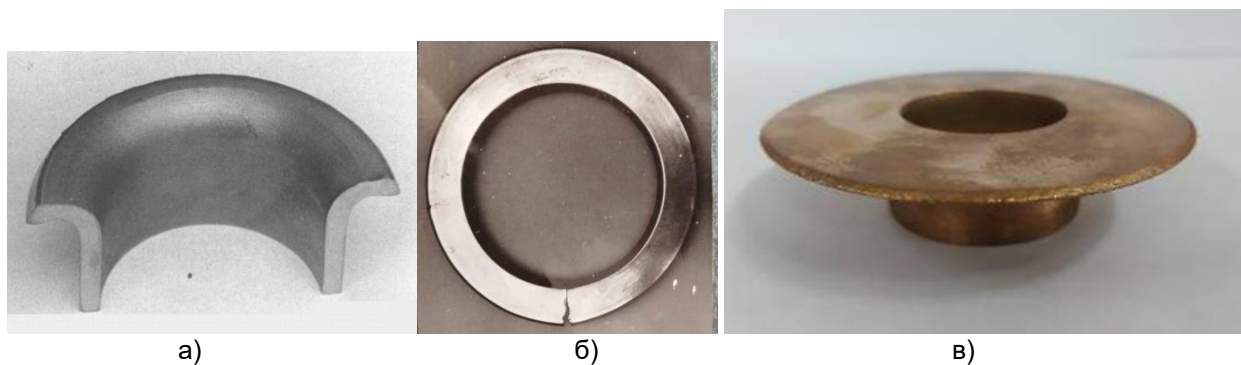


Рис. 4. Заготовки, що відбортовувалися методом ШО: а – проміжна стадія, б – руйнування заготовки зі сталі 30ХГСА, в – відбортована заготовка із міді М06

Для оцінки деформовності матеріалу заготовок був проведений аналіз його напружено-деформованого стану (НДС). На рис. 5 приведені ізолінії розподілу інтенсивності деформацій і інтенсивності напружень в заготовках з М06 для трьох стадій відбортування, отримані методом вимірювання твердості.

Для вільних поверхонь заготовок (А і Б рис. 5) деформований стан визначали також за допомогою методу сіток.

Як показали результати дослідження НДС, найбільш жорсткий напружений стан спостерігається на вільній поверхні заготовки і характеризується показником напруженого стану $\eta = 1,73$. (Показник напруженого стану

$\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$, де $I_1(T_\sigma)$ і $I_2(D_\sigma)$ - перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень.) Проте тут спостерігається відносно не високий рівень накопичення деформацій і інтенсивність деформацій сягає лише значень $\varepsilon_i = 0,5\varepsilon_{\max}$.

Найбільш небезпечною виявилася вільна зовнішня поверхня фланця А, (див. рис. 5). В цій зоні на етапах відбортування спостерігаються максимальні деформації і достатньо жорсткий напружений стан $\eta = 0,4 \dots 1,0$, тобто такий, що відповідає одновісному розтягу.

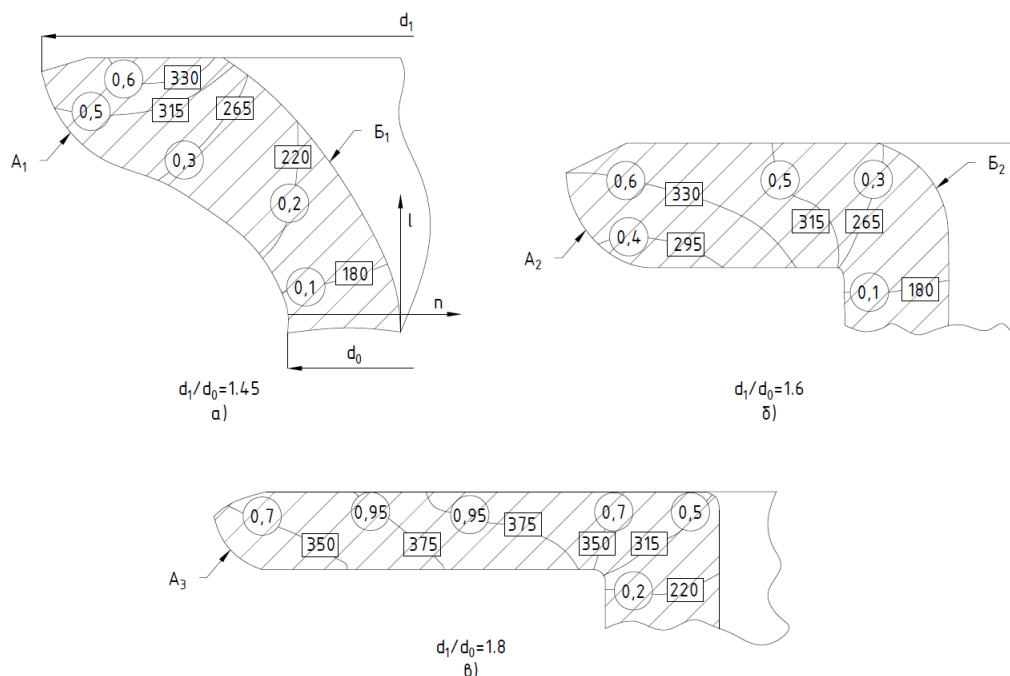
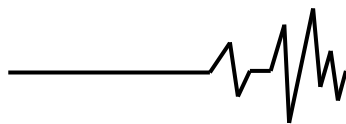


Рис. 5. Ізолінії розподілу інтенсивності деформацій $\varepsilon_i = const$ (O) і інтенсивності напружень $\sigma_i = const$ (□) МПа на різних стадіях відбортуння заготовок методом ШО

Певний інтерес в прогнозуванні руйнування заготовки викликає також середина частина фланця, де на заключних стадіях (див. рис. 5в) висаджування фланця методом ШО, при відносно м'яких схемах напруженого стану ($\eta = -1,5$), продовжують зростати максимальні деформації.

Слід відзначити, що процес відбортуння методом ШО протікає в умовах немонотонних деформацій з чергуванням згину і висаджування, із переходом відкритої поверхні до контакту з обкочувальним валком та наступним виходом певної її ділянки з відзначеного контакту. При цьому оцінку деформовності матеріалу заготовки на вільній поверхні Б та в зоні максимальних деформацій при висаджуванні (див. рис. 5в) можна проводити при постійних значеннях показника напруженого стану.

Немонотонний характер деформування окремих зон заготовки (зокрема зони максимальних деформацій) підтверджується різкою зміною інтенсивності накопичення цих деформацій, показаною на рис. 6.

Особливої уваги щодо дослідження НДС потребує вільна зовнішня поверхня фланця А (див. рис. 5). За результатами проведених експериментів були схематично побудовані траєкторії деформування часток матеріалу цієї зони заготовки в координатах « $\varepsilon_i - \eta$ » (інтенсивність деформацій – показник напруженого стану) [9]. На їх основі аналогічно роботі [10] побудована математична модель

цих траєкторій. За базисну було взято однопараметричну функцію, що «склеєна з елементарної функції синус та дотичної до неї в деякій точці. В точці «склейки» $\eta = \eta_1$ виконується не тільки умова неперервності функції, а і її першої похідної.

Базисна функція набула вигляду:

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \sin(\eta), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1), & \eta > \eta_1 \end{cases} \quad (1)$$

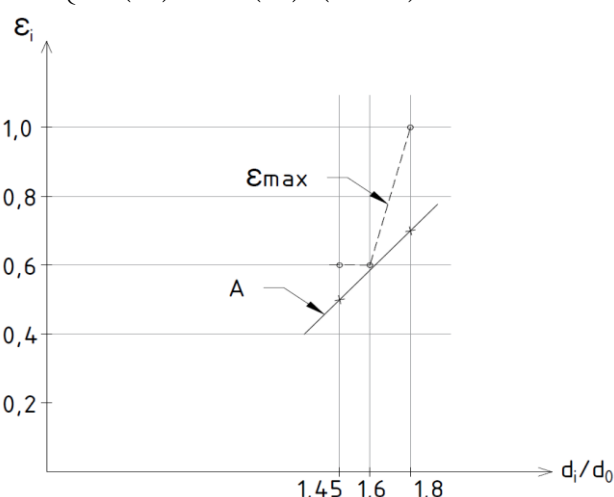


Рис. 6. Характер зміни інтенсивності деформацій на вільній зовнішній поверхні фланця (А) і в зоні максимальних деформацій ε_{max} у залежності від співвідношення діаметра фланця і вихідної заготовки



З метою описання довільного діапазону зміни накопиченої пластичної деформації апроксимація шляху деформування була узагальнена до вигляду:

$$\begin{cases} \eta' = \begin{cases} \eta \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta) \cdot \sin(\alpha) - 1, & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \cos(\alpha) - [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \sin(\alpha) - 1, & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = b \cdot \begin{cases} \eta \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \cos(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

де b - стала, що залежить від параметрів технологічного процесу.

Для оцінки деформовності використовували модель підсумовування пошкоджень зі степеневу апроксимацією функції пошкоджень:

$$\psi(\bar{\varepsilon}_i) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_i} \frac{n \cdot \varepsilon_i^{n-1}}{[\varepsilon_{*s}(\eta(\varepsilon_i))]^n} \cdot d\varepsilon_i \leq 1, \quad \bar{\varepsilon}_i \leq \varepsilon_*, \quad (3)$$

де n - матеріальна стала, що характеризує міру нелінійності підсумовування пошкоджень.

Умова придатності металів підлягати відбортунню методом ШО для інженерних розрахунків, яка отримана із виразу використаного ресурса пластичності матеріалу в зоні А, має вигляд:

$$\Psi_{uu} \geq 100 - \exp(4,6 - \varepsilon_i^n), \quad (4)$$

де Ψ_{uu} - величина відносного звуження матеріалу в процентах. Експериментально підтверджено, що достатню пластичність для відбортунням методом ШО мають матеріали з $\Psi_{uu} \geq 58 - 60\%$.

Виробництво деталей із сталей 10, 12Х18Н10Т і міді М06 показало, що відбортуння методом ШО дозволяє в холодному стані отримувати якісні фланці значної ширини з товщиною значно меншою, ніж товщина стінки вихідної труби. Для відповідальних деталей, із використанням розроблених моделей накопичення пошкоджень [11,12] та отриманих моделей (2) і (3), можна також визначити використаний ресурс пластичності, а отже і їх якість.

Проте можливість отримання таких заготовок холодним деформуванням обмежується, як правило, недостатньою пластичністю металів, що і обумовлює перехід на гаряче деформування з використанням індукційного нагрівання. При індукційному нагріванні передача електричної енергії здійснюється безпосередньо в заготовку, що

дозволяє підвищити швидкість нагрівання, яке забезпечується протягом десятків секунд. Використання електроенергії з високою частотою струму забезпечує виділення максимальної теплової потужності у обмеженому за товщиною шарі виробу, а це особливо ефективно при нагріванні трубних заготовок. В результаті індукційне нагрівання дозволяє підвищити продуктивність і покращити умови праці для процесів гарячого штампування.

Висновки. В роботі проведено розробку і дослідження перспективних технологічних схем відбортуння зовнішніх і внутрішніх фланців на трубних заготовках методом штампування обкочуванням. Досліджена механіка формозміни заготовок та способи керування плинном матеріалу. Проведений аналіз напружено-деформованого стану матеріалу заготовок і побудована математична модель траєкторій деформування часток матеріалу цієї небезпечної через можливе руйнування зони заготовки. З використанням моделі підсумовування пошкоджень, зі степеневу апроксимацією функції пошкоджень, проведена оцінка деформовності матеріалу заготовок при відбортунні. Отримана умова придатності металів підлягати відбортунню методом ШО для інженерних розрахунків. Обґрунтована необхідність застосування в процесах відбортуння методом ШО індукційного нагрівання. Це дозволить розширити технологічні можливості процесів відбортуння фланців шляхом розробки і використання індукційного нагрівання заготовок, через збільшення характеристик пластичності і зменшення характеристик міцності металів в процесі деформування.

Список використаних джерел

1. Гожій С.П., Кривда Л.Т. Штампування обкочуванням як засіб ресурсозбереження. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2006. № 2(46). С. 55-60.
2. В. А. Матвийчук., И. С. Алиев. "Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе



анализа деформируемости металлов». Краматорск: ДГМА. Монография. 2009.

3. Матвійчук В.А. Розвиток енерго- і ресурсозберігаючих технологій заготівельного виробництва. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. №4 (119). С. 110-119.

4. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. 2022. №1 (66). P. 51–58. **(Scopus)**.

5. Краєвський В. О., Матвійчук В. А., Михалеви́ч В. М. Вплив технологічних параметрів на кінематику холодного торцевого розкочування. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії*. Краматорськ - Слов'янськ. 2003. С. 286–291.

6. Капорович В. Г. Производство деталей из труб обкаткой. *Машиностроение*. 1978. С. 134.

7. Пиц Я. Е. Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. *Тематич. зб. наук. пр. Краматорськ*. 2002. С. 290-292.

8. Матвійчук В.А., Савків В. В. Штампування обкочуванням заготовок з використанням удосконаленого енергоефективного індукційного нагрівання. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. №4 (107). С. 59-67.

9. Матвійчук В.А., Колісник М.А., Штуць А.А. Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 3(102). С. 77-84.

10. Михалеви́ч В. М., Матвійчук В. А., Колісник М. А. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням. *Обробка матеріалів тиском*. 2022. №1 (51). С. 87-97.

11. Михалеви́ч В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалеви́ч. — Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1998. — 195 с. — ISBN 966-7199-20-7.

12. Volodymyr Mykhalevych, Yurii Dobraniuk, Victor Matviichuk, Volodymyr Kraievskiy, Oksana Tiutiunnyk, Saule Smailova, Ainur Kozbakova. A comparative study of various models of equivalent plastic strain to fracture. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2023. № 1. P. 54-70. DOI: <http://doi.org/10.35784/iapgos.3496>

Conservation. *Scientific news of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, 2 (46). 55-60.

2. Matviychuk, V.A., Aliev, I.S. (2009) *Improvement of Processes of Local Rotational Processing by Pressure on the Basis of the Analysis of Deformability of Metals*. Kramatorsk: DGMA. Monograph.

3. Matviychuk, V.A. (2022). Development of energy- and resource-saving technologies in procurement. *Engineering, Energy, Transport AIC*. 4 (119). 110-119.

4. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. (2022) Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. 1 (66). 51–58. **(Scopus)**.

5. Kraevsky, V.O., Matviychuk, V.A., Mikhalevich, V.M. (2003) Influence of Technological Parameters on the Kinematics of Cold end Rolling. *Kramatorsk - Slavyansk*. 286–291.

6. Kaporovich, V.G. (1978) Production of Parts from Running-In Pipes. *M. Mechanical Engineering*. 134 p.

7. Pyts, Ya.E. (2002) Actual Questions of Production of Thick-Walled Products from Pipes by Rotational Running-In by the Tool of Friction. *Coll. Science. pr. Kramatorsk*. 290-292.

8. Matvijchuk, V.A., Savkiv, V.V. (2022). Rolling stamping of workpieces using advanced energy-efficient induction heating. *Vibrations in engineering and Technology*. 4 (107). 59-67.

9. Matviychuk, V.A., Kolisnyk, M.A., Shtuts, A.A. (2018). Investigation of the stress-strain state of the workpiece material during direct extrusion by the method of rolling stamping. *Engineering, Energy, Transport AIC*. 3 (102). 77-84.

10. Mikhalevich, V. M., Matviychuk, V. A., Kolisnyk, M. A. (2022) Estimation of deformability of the material of blanks during direct extrusion by the method of stamping by rolling. *Processing of materials by pressure*. 1 (51). 87-97.

11. Mikhalevich, V. M. (1998). Tensor models of damage accumulation. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia. 195 p. ISBN 966-7199-20-7.

12. Volodymyr Mykhalevych, Yurii Dobraniuk, Victor Matviichuk, Volodymyr Kraievskiy, Oksana Tiutiunnyk, Saule Smailova, Ainur Kozbakova. A comparative study of various models of equivalent plastic strain to fracture. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2023. № 1. P. 54-70. DOI: <http://doi.org/10.35784/iapgos.3496>

References

1. Gozhiy, S.P., Kryvda, L.T. (2006) Stamping by Rolling as a Means of Resource



SUBSTANTIATION OF INDUCTION HEATING DURING FLANGING OF TUBULAR WORKPIECES BY ROLLING FORMING

Rolling forming (RF) processes are among the most efficient methods of metal forming. The required profile of the workpiece in rolling processes is formed by local deformation with conical or cylindrical rolls using sound technological schemes. When roll forming pipe billets with a ratio of the height of the initial deformed part to the wall thickness of more than 2.5, the flange seating process is made impossible by the loss of billet stability with subsequent fold formation. This phenomenon makes it impossible to produce wide flanges by drawing. To form workpieces with particularly wide flanges, we have developed a flanging method by rolling stamping.

The essence of the flanging method is that at the initial stages of rolling, the top of the conical roll is shifted in the direction of the contact patch. At intermediate stages, to prevent the workpiece wall from turning inside out, the top of the roll is shifted in the opposite direction (along the workpiece axis). The main technological constraints are imposed by the insufficient ductility of the billet material, which can cause fracture.

To develop the flanging processes in a reasonable manner, we studied the mechanics of outer flange deformation and methods of controlling material flow. The stress-strain state

(SSS) of the material was analyzed using the hardness measurement method and the mesh method. The nature of the change in the stress-strain state in the most dangerous zones of the workpiece was determined, depending on the ratio of the flange diameter to the initial workpiece. Based on the experimental results, a mathematical model of the deformation trajectory of material particles of the outer surface of the flange in the coordinates of deformation intensity - an indicator of the stress state - was constructed. To assess the deformability of the material, a damage summation model with a power law approximation of the damage function was used. The model allows us to determine the ultimate fracture dimensions of the flange, as well as the plasticity resource used at intermediate stages.

The condition for the suitability of metals for flanging by rolling stamping for engineering calculations is obtained. The necessity of applying induction heating in the processes of culling by rolling stamping is substantiated. This makes it possible to expand the technological capabilities of flanging processes by developing and using induction heating of workpieces, due to an increase in the plasticity characteristics and a decrease in the strength characteristics of metals in the process of deformation.

Keywords: rolling stamping, flanging, stress-strain state, assessment of deformability, induction heating.

Відомості про авторів

Матвійчук Віктор Андрійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vamatv50@gmail.com).

Савків Володимир Володимирович – аспірант, кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vovasavkiv@gmail.com).

Matviychuk Viktor – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3 Solnechna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: vamatv50@gmail.com)

Savkiv Volodymyr – graduate student of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics (3 Solnechnaya St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: vovasavkiv@gmail.com).