

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-1>
УДК 621.73:621.365

ШТУЦЬ АНДРІЙ

Вінницький національний аграрний університет
<https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>
e-mail: shtuts1989@gmail.com

ЯНОВИЧ ВІТАЛІЙ

Вінницький національний аграрний університет
<https://orcid.org/0000-0002-8152-7124>
e-mail: yanovichvitaliy@gmail.com

ЯРОПУД ВІТАЛІЙ

Вінницький національний аграрний університет
<https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>
e-mail: yaropud77@gmail.com

РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ШТАМПУВАННЯ ОБКочУВАННЯМ ШЛЯХОМ ІНДУКЦІЙНОГО ПОВЕРХНЕВОГО НАГРІВУ СКРАДНОПРОФІЛЬНИХ ЗАГОТОВОК

У статті розглянуто інноваційний підхід до підвищення ефективності процесу штампування обкочуванням (ШО) складнопрофільних заготовок шляхом застосування індукційного поверхневого нагрівання. Запропонована методика забезпечує підвищення пластичності матеріалів, зниження контактних напружень та підвищення стійкості заготовок під час деформування, що особливо важливо при обробці матеріалів із низькою пластичністю або складною геометрією.

Методика полягає у локальному нагріванні лише тих ділянок заготовки, які підлягають безпосередній деформації, що дозволяє досягти рівномірного розподілу температури у матеріалі. Такий підхід мінімізує витрати енергії та забезпечує високу керованість процесом нагрівання. Локальне нагрівання сприяє підвищенню пластичності матеріалу на 30-50%, що значно покращує можливості обробки складнопрофільних заготовок. Додатково знижуються контактні напруження, що забезпечує стабільність розмірних параметрів готових виробів та підвищує ресурс оснастки на 20-30%, зменшуючи витрати на її обслуговування та заміну.

Розроблено спеціальний пристрій для ШО фланцевих деталей з урахуванням можливості індукційного нагрівання, що дозволяє оптимізувати процес обробки на всіх етапах виробництва. Виконане моделювання технологічних параметрів процесу показало, що використання індукційного нагрівання при температурі 1150-1200°C забезпечує необхідні умови для пластичної деформації матеріалу навіть у складнопрофільних заготовках. Такий температурний режим дозволяє уникнути передчасного руйнування матеріалу, знижуючи кількість дефектів та браку у виробництві.

Результати досліджень підтверджують, що поєднання ШО з індукційним нагріванням значно розширює технологічні можливості процесу. Це сприяє підвищенню якості готових виробів, стабільності розмірних і геометричних параметрів, а також знижує собівартість виробництва за рахунок зменшення витрат на матеріали та оснастку. Крім того, запропонована технологія позитивно впливає на стабільність виробничого процесу, знижуючи залежність кінцевого результату від змін технологічних параметрів.

Запропонована технологія має значний потенціал для впровадження у різних галузях промисловості, таких як машинобудування, авіаційна, автомобільна та енергетична промисловість. Вона сприяє підвищенню економічної ефективності виробництва за рахунок оптимізації технологічних процесів, підвищення продуктивності обладнання та забезпечення стабільної якості продукції навіть при масовому виробництві.

Ключові слова: штампування обкочуванням, індукційний нагрів, пластичність, контактні напруження, складнопрофільні заготовки, дослідження, технологічні можливості аналіз, механіка, формоутворення, складнопрофільні вироби, напружено деформований стан, зусилля.

SHTUTS ANDRII

YANOVYCH VITALII

YAROPUD VITALII

Vinnitsia National Agrarian University

EXPANSION OF TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF ROLLING STAMPING BY INDUCTION SURFACE HEATING OF COMPLEX-PROFILE BLANKS

The article considers an innovative approach to increasing the efficiency of the rolling stamping process (SHO) of complex-profile blanks by using induction surface heating. The proposed technique provides increased plasticity of materials, reduced contact stresses and increased stability of blanks during deformation, which is especially important when processing materials with low plasticity or complex geometry.

The technique consists in local heating of only those areas of the blank that are subject to direct deformation, which allows achieving a uniform temperature distribution in the material. This approach minimizes energy consumption and provides high control over the heating process. Local heating helps to increase the plasticity of the material by 30-50%, which significantly improves the processing capabilities of complex-profile workpieces. In addition, contact stresses are reduced, which ensures the stability of the dimensional parameters of finished products and increases the tooling resource by 20-30%, reducing the costs of its maintenance and replacement.

A special device for SH of flange parts has been developed, taking into account the possibility of induction heating, which allows optimizing the processing process at all stages of production. The modeling of the technological parameters of the process has shown that the use of induction heating at a temperature of 1150-1200°C provides the necessary conditions for plastic deformation of the material even in complex-profile workpieces. This temperature regime allows avoiding premature material failure, reducing the number of defects and scrap in production.

The results of the research confirm that the combination of SH with induction heating significantly expands the technological capabilities of the process. This contributes to improving the quality of finished products, the stability of dimensional and geometric parameters, and also reduces the cost of production by reducing the cost of materials and equipment. In addition, the proposed technology has a positive effect on the stability of the production process, reducing the dependence of the final result on changes in technological parameters.

The proposed technology has significant potential for implementation in various industries, such as mechanical engineering, aviation, automotive and energy industries. It contributes to increasing the economic efficiency of production by optimizing technological processes, increasing equipment productivity and ensuring stable product quality even during mass production.

Keywords: rolling stamping, induction heating, plasticity, contact stresses, complex-profile blanks, research, technological capabilities, analysis, mechanics, shape formation, complex-profile products, stress-strain state, force.

Постановка проблеми

Штампування обкочуванням (ШО), яке отримало розвиток завдяки працям К.М. Богоявленського, В.В. Лапіна, В.А. Матвійчука, С.П. Гожій, В.М. Михалевича [2-10] та інших дослідників, дозволяє максимально наблизити форму і розміри заготовки до готової деталі і забезпечення до 40% економії металу та зниження в середньому на 20% трудомісткості виробництва. При цьому точність розмірів виготовлених виробів відповідає 7-11-му квалітетам точності, а шорсткість оброблених поверхонь становить $R_a = 2,5 \dots 0,63$ мкм.

ШО є високоефективним методом обробки металів тиском, який дозволяє досягти значної економії матеріалу (до 40%) та зниження трудомісткості виробництва (на 20%). Завдяки своїм технологічним перевагам, таким як висока точність (7-11-й квалітети точності) та низька шорсткість оброблених поверхонь (2,5...0,63 мкм), метод ШО знайшов широке застосування у різних галузях промисловості, включаючи машинобудування, енергетику та аерокосмічну галузь.

Проте технологічні можливості ШО обмежуються низкою факторів, які суттєво впливають на якість готових виробів і ефективність виробничих процесів. До таких факторів відносяться:

- Руйнування матеріалу заготовки під час деформування, особливо при обробці матеріалів із низькою пластичністю.
- Втрата стійкості заготовки під час формоутворення, що призводить до утворення браку і зниження продуктивності.
- Високі контактні напруження, які негативно впливають на зносостійкість оснастки та якість виробів.

Зокрема, під час обробки матеріалів із недостатньою пластичністю можливість досягнення необхідних розмірів та форм виробів значно знижується. При цьому до 15-20% заготовок втрачають стійкість, що призводить до браку продукції та збільшення витрат. Це особливо актуально при деформуванні складнопрофільних деталей або виробів із високими вимогами до точності геометричних параметрів.

Одним із ключових завдань у вдосконаленні технології ШО є підвищення пластичності матеріалу заготовок і забезпечення рівномірності деформаційного процесу. Недостатня пластичність може призвести до передчасного руйнування матеріалу, утворення тріщин та інших дефектів, що значно знижує якість готових виробів.

Для розширення технологічних можливостей ШО необхідно вирішити проблему підвищення пластичності матеріалу та зменшення контактних напружень під час деформування. Одним із перспективних підходів до цього є застосування індукційного нагрівання заготовок перед деформуванням. Індукційний нагрів забезпечує рівномірний розподіл температури, підвищує пластичність матеріалу та знижує ймовірність втрати стійкості заготовки.

Індукційний нагрів дозволяє точно контролювати температурний режим, що дає можливість досягати необхідних характеристик матеріалу навіть для складних сплавів або високоміцних сталей. Наприклад, при нагріванні до температури 800-900°C спостерігається збільшення пластичності матеріалів до 30-50%, що значно розширює можливості їх обробки методом ШО.

Застосування індукційного нагрівання також сприяє зменшенню контактних напружень під час обкочування. Це дозволяє знизити знос оснастки, підвищити її ресурс на 20-30% і забезпечити стабільність розмірних параметрів готових виробів. Додатковою перевагою є можливість локального нагрівання лише тих частин заготовки, які підлягають деформуванню, що дозволяє зменшити витрати енергії та знизити собівартість виробництва.

ШО [1,2,9] відносяться до високоефективних процесів обробки металів тиском. Найбільшого розвитку і використання набули процеси ШО при отриманні складно профільних заготовок шляхом реалізації радіального плину матеріалу циліндричних, фланцевих заготовок. Наведена схема на рис. 1. показує, що істотною особливістю процесу полягає в плавності навантаження. За формою деформації не відрізняється від деформації при звичайній вирубці. Схема напружено-деформованого стану, як і при звичайній вирубці, відповідають зсуву. При вирубці ШО інструментом немає необхідності в застосуванні знімача, так як при цьому способі діаметр отвору виходить більше діаметра пуансона. Зусилля вирубки може бути визначено за формулою (1):

$$p_0 \sigma_{cp} \sigma_{max} \quad (1)$$

де L – довжина лінії зрізу, мм;

S_0 – товщина заготовки, мм;

σ_{cp} – опір зрізу, МПа;

K_{σ} – дослідний коефіцієнт, що враховує вплив локального навантаження деформації, для верхньої оцінки зусилля можна приймати $K_{\sigma}=1$.

Для лінії зрізу при вирубці обкочуванням плоскої круглої заготовки визначається за формулою (2):

$$L = R * \varphi; \quad (2)$$

де R – радіус заготовки, мм;

φ – кут, відповідний плямі контакту заготовки та інструменту, град.

З геометричних співвідношень випливає вираз (3,4):

$$L = R * \arctg \left[\frac{S_0}{R^2} (2R \operatorname{ctg} \theta - \Delta h)^{1/2} \right], \quad (3)$$

$$P_0 \left[\frac{\Delta h}{R^2} (2R \operatorname{ctg} \theta - \Delta h) \right]^{1/2} \approx \sigma_{\max}, \quad (4)$$

де Δh – величина подачі інструменту на один прохід, мм;

θ – кут кочення інструменту, град.

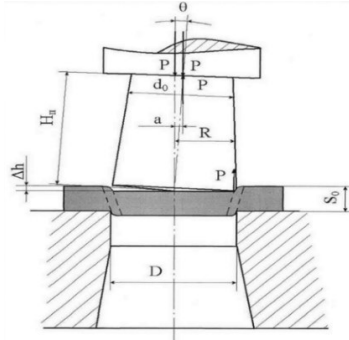


Рис. 1. Схема для вирубці методом штампування обкочуванням

Найбільша ефективність в обробці тиском забезпечується комбінованими способами деформування, коли кілька простих операцій виконуються за один перехід [1-7].

Відомий спосіб виготовлення заготовок [13], що включає рубку круглих прутків на заготовки в штамп з попереднім роздавлюванням і подальшим штампуванням обкочуванням круглих дисків.

При рубці в круглому штампі один з торців отримує форму увігнутого сегмента, який на перший погляд не має особливого впливу на штампування обкочуванням диска. Однак, в ході реалізації цього процесу виявився поворот прутка навколо своєї осі, за рахунок багаторазового накопчування інструменту на пруток. Особливо помітно поворот заготовки проявляється при малій подачі. Поворот пруткової заготовки призводить до того, що вгнутий сегмент у вертикальній площині може зайняти горизонтальне положення, а це може викликати при подальшому розкочуванні дефект на бічній поверхні відштампованих бортів у вигляді затиску [13]. Протяжність цього дефекту приблизно становить діаметр прутка. Крім того, процес рубки і подальшого штампування досить тривалий, робочий хід преса при цьому становить близько двох діаметрів. У зв'язку з цим запропоновано в якості початкової заготовки використовувати гарячекатану смугу, а рубку і штампування розмістити в одному штампі (рис. 2.), поєднавши в одному ході пресу рубку смуги на мірну заготовку з подальшим отриманням прутка штампуванням обкочуванням [9,10].

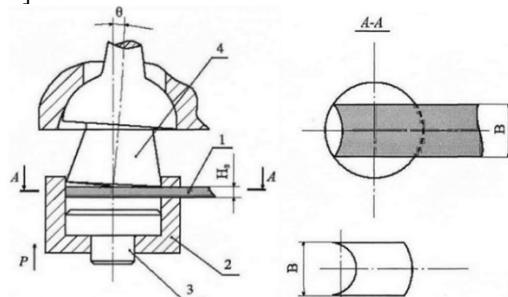


Рис. 2. Схема комбінованого процесу рубки і штампування обкочуванням плоских заготовок для виготовлення деталей а); відрубана частина смугової заготовки б) 1 - вихідна заготовка; 2 - матриця; 3 - виштовхувач; 4 - пуансон.

Розглянемо особливості геометрії відрубаних в штампі заготовки від смуги і спробуємо зняти напруженість у виборі перетину смуги, тобто, співвідношення ширини до висоти.

В плані відрубана заготовка і круглий штамп мають незаповнені ділянки у вигляді двох бічних сегментів в штампі і подвійного сегмента з торця заготовки (рис. 2.). Певною мірою така форма заготовки для штампування прутка нагадує трипроменеву астроїду, перетворення якої в пруток штампуванням обкочуванням досить повно описана в роботі [1,7].

У виконаних раніше дослідженнях досягалась мета мінімізації відходів при вирубці круглим пуансоном заготовок з листа. Схема астроїдальних заготовок наведена на рис. 3. У нашому випадку мета

найбільш повного заповнення круглого штампу. Це досягається при рівності площ подвійного сегмента з торця заготовки і одного бокового сегмента штампа.

З цієї умови при відомому діаметрі штампувального валка визначається оптимальна ширина смуги (В), висота смуги буде впливати тільки на обсяг металу прутка при заданому діаметрі. На рис. 4. наведено графік зміни площ для визначення оптимальної ширини заготовки.

У точці перетину кривих площі одного бокового сегмента і площі подвійного сегмента дає відповідну ширину заготовки.

Рубка заготовки виконується з одночасним вигином на кут рівний 20° в затиснутому стані між пуансоном і виштовхувачем, що значно знижує необхідне зусилля рубки в початковий момент. При цьому подача інструменту на один прохід задається досить жорстко і визначається в першу чергу геометрією обкочувального інструменту (пуансона) - його діаметром і кутом конусності робочого торця [7]. Кут конусності залежить від кута нахилу осі обкочувального інструменту і визначається в прямому співвідношенні, що не перевищує значення $0 < \alpha < 3^\circ$.

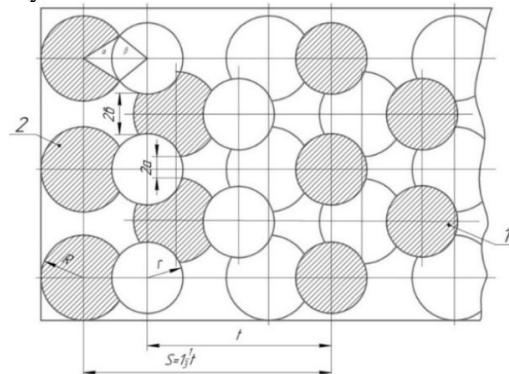


Рис. 3. Схема астроїдальних заготовок [1-7]

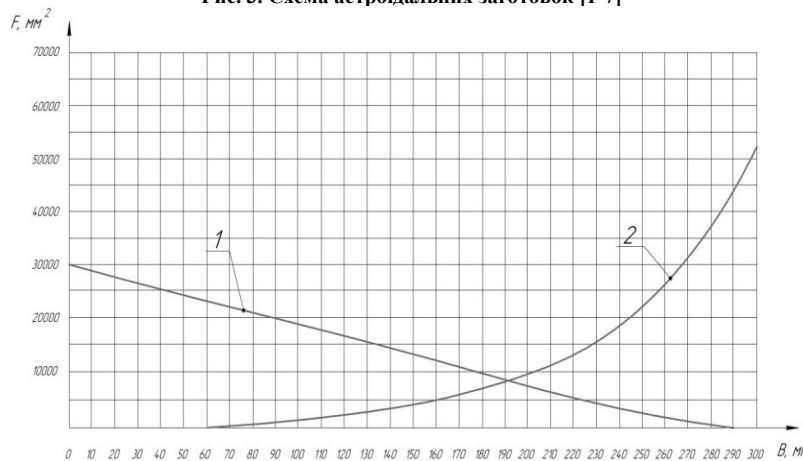


Рис. 4. Графік зміни площ для визначення оптимальної ширини заготовки: В - ширина заготовки, мм; F - площа сегментів, мм². 1 - площа бокового сегмента матриці; 2 - площа подвійного сегмента заготовки.

З урахуванням того, що рубка при великих подачах не залежить від зусилля, так як штампування ведеться в одному штампі [12]. Далі наведені формули (5-7) розрахунку силових параметрів:

$$P_{руб.} = (1,25 \div 1,30) B \cdot \sigma_{ср.} \cdot H_3, \tag{5}$$

де В - ширина смуги, мм;

$\sigma_{ср.}$ - опір зрізу, МПа;

H_3 - висота заготовки.

Однак фактичне зусилля зрізу на 10-15% нижче, ніж розрахункове. Зусилля розкочування розраховується за формулою, наведеною в роботі [1].

Подача при рубці визначається за формулою (6):

$$S_p = 0,5Dt g 2\theta, \tag{6}$$

де D - діаметр інструмента, мм;

θ - кут конусності інструменту, град.

При подачі, розрахованій за формулою (6) зусилля рубки значно менше зусилля штампування обкочуванням. Це пояснюється особливістю процесу рубки, який полягає в плавності навантаження, напружено-деформований стан, що відповідає зрушенню, як і при звичайній вирубці.

Найбільш доцільно цей комбінований спосіб використовувати для квадратних, прямокутних фланцевих заготовок.

Актуальною науково-практичною проблемою є розробка методів і технологій, що поєднують індукційний нагрів із процесом штампування обкочуванням для забезпечення високої якості готових виробів і підвищення ефективності виробничих процесів. Для цього необхідно провести дослідження з

оптимізації параметрів індукційного нагрівання (частота струму, потужність індуктора, час нагрівання) та розробити алгоритми керування процесом ШО з урахуванням температурного режиму заготовок.

Мета і задачі дослідження

Метою статті є розширення технологічних можливостей штампування обкочуванням (ШО) складнопрофільних заготовок шляхом впровадження індукційного поверхневого нагріву. Це дозволить підвищити пластичність матеріалів, забезпечити рівномірність деформаційного процесу, знизити контактні напруження та підвищити ресурс оснастки. Запропонований підхід спрямований на оптимізацію технологічного процесу, зменшення браку продукції, підвищення економічної ефективності виробництва та розширення спектру застосування методу ШО в різних галузях промисловості.

Матеріал і результати дослідження

ШО - це технологічний процес, який дозволяє реалізувати широкий спектр методів деформування суцільних і трубних циліндричних заготовок. Завдяки цьому методу можна здійснювати такі операції, як висаджування, осаджування, прошивка, пряме і зворотне ротаційне витискування, обтискування, роздавання, відсорткування, переформування та багато інших. Цей універсальний підхід забезпечує можливість виготовлення складних деталей із високою точністю і продуктивністю, що значно розширює потенціал застосування ШО в різних галузях промисловості, зокрема в машинобудуванні, авіаційній і автомобільній промисловості.

Незважаючи на значні переваги, технологічні можливості ШО обмежуються низкою факторів. Серед основних обмежень можна виділити руйнування матеріалу заготовки внаслідок надмірних деформацій, втрату стійкості заготовки під дією зовнішніх сил і виникнення високих контактних напружень. Останні не лише знижують стійкість оснащення, але й обмежують можливість отримання виробів необхідної геометричної точності та якості поверхні. Це може призводити до появи дефектів, зниження довговічності інструментів і підвищення собівартості продукції через часту заміну оснащення.

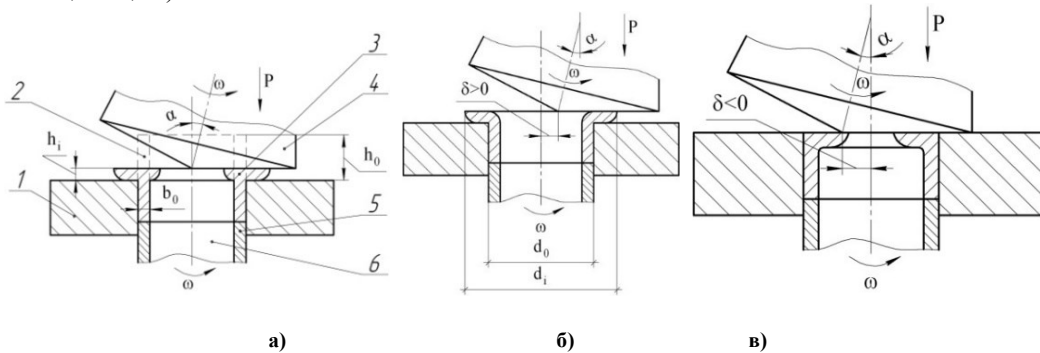
Для уникнення небезпеки втрати стійкості заготовки під час процесу штампувального обкочування необхідно впроваджувати інноваційні підходи до керування процесом деформування. Одним із таких підходів є розробка нових схем деформування на основі управління активними силами тертя на контакті валка із заготовкою. Зміна параметрів тертя дозволяє контролювати характер деформації, зменшувати ризик втрати стійкості та оптимізувати розподіл напружень у зоні контакту.

На рис. 6 наочно представлено різні варіанти формування буртів на трубних заготовках, що досягаються шляхом зміни положення валка відносно заготовки. Таке технологічне рішення дає змогу не лише підвищити якість готових виробів, але й розширити діапазон розмірів і форм деталей, які можна отримати за допомогою ШО. Крім того, оптимізація положення валка сприяє зниженню навантаження на оснащення і підвищенню його стійкості, що позитивно впливає на економічну ефективність процесу в цілому.

Граничний діаметр зовнішнього бурта d_* виробу, отриманого за схемою висаджування методом ШО, може бути визначеном із співвідношення:

$$d_* = d_0 \exp\{0,865\varepsilon_*(\eta = 0) \exp(-\eta_k \ln \lambda) w - 0,14[\varepsilon_*(\eta = 0) \exp(-\eta_k \ln \lambda) w]^2\}, \quad (7)$$

де d_0 - діаметр вихідної заготовки; $\varepsilon_*(\eta = 0)$ - гранична деформація при крученні; η_e - значення показника напруженого стану η в точці перетину шляху деформування часток матеріалу вільної поверхні бурта із діаграмою пластичності; $\lambda = \varepsilon_*(\eta = -1)/\varepsilon_*(\eta = 0)$ - показник чутливості пластичності матеріалу до схеми напруженого стану; $\varepsilon_*(\eta = -1)$ - гранична деформація при одноосному стисненні; w - коефіцієнт впливу історії деформування на пластичність (при висаджуванні методом ШО зовнішніх буртів $w = 1, 2, \dots, 1, 35$).



1 - матриця; 2 - заготовка; 3 - виріб; 4 - валок; 5 - штовхач; 6 - оправка

Рис. 5. Положення валка і формування виробів при висаджуванні буртів методом ШО:
а) зовнішніх і внутрішніх; б) зовнішніх; в) внутрішніх

В таблиці 1 представлені відносні значення граничних діаметрів для різних сталей при реалізації різних шляхів деформування, які визначаються величиною зміщення вершини валка по відношенню до заготовки та відносною висотою частини заготовки, що підлягає деформуванню [12,13].

Таблиця 1

Значення граничних деформацій і відносних граничних діаметрів заготовок при висаджуванні зовнішніх буртів методом ШО

№ п/п	Марка сталі	Рівняння шляху деформування					
		$\eta = 1,6 \varepsilon_u - 1,5 \left(\begin{array}{l} \frac{\delta}{b_0} = -1,5 \\ \frac{h_0}{b_0} = 1,1 \end{array} \right)$		$\eta = 2,5 \varepsilon_u - 1,25 \left(\begin{array}{l} \delta = 0 \\ \frac{h_0}{b_0} = 1,5 \end{array} \right)$		$\eta = 5 \varepsilon_u - 1 \left(\begin{array}{l} \frac{\delta}{b_0} = +1,5 \\ \frac{h_0}{b_0} = 2,2 \end{array} \right)$	
		ε_*	d_* / d_0	ε_*	d_* / d_0	ε_*	d_* / d_0
1.	45	0,80	1,83	0,59	1,59	0,35	1,33
2.	14X17H2	0,89	1,93	0,64	1,64	0,35	1,33
3.	9XC	0,86	1,90	0,65	1,65	0,39	1,37
4.	30XГСА	0,95	2,00	0,67	1,68	0,37	1,35
5.	35	0,94	1,99	0,68	1,69	0,39	1,37
6.	ШХ-15	1,00	2,06	0,73	1,74	0,41	1,39
7.	10	1,06	2,14	0,75	1,77	0,39	1,37
8.	40XН2МА	1,03	2,10	0,80	1,83	0,56	1,55
9.	4X13	1,14	2,23	0,81	1,84	0,45	1,43
10.	12X18H10T	1,26	2,38	0,92	1,97	0,63	1,63

При недостатній пластичності матеріалу заготовки для досягнення необхідних розмірів за допомогою методу штампування (ШО), що є важливим етапом у процесах формоутворення, виникають суттєві труднощі, пов'язані з високим опором матеріалу до деформації. Для подолання цих обмежень та розширення технологічних можливостей методу, було розроблено інноваційний спосіб індукційного нагрівання частини заготовки, що підлягає деформуванню (рис. 6).

Цей метод дозволяє локалізувати процес нагрівання безпосередньо в зоні деформації, що значно покращує пластичні властивості матеріалу та знижує енергетичні витрати на обробку. Застосування індукційного нагрівання дозволяє досягти рівномірного прогріву в місці штампування, що не тільки зменшує силу, необхідну для виконання деформаційного процесу, а й підвищує точність виготовлення виробів, зменшуючи ризик виникнення дефектів, таких як тріщини або злам.

Інтеграція індукційного нагрівання в технологію штампування відкриває нові перспективи для покращення якості та ефективності виробничих процесів.

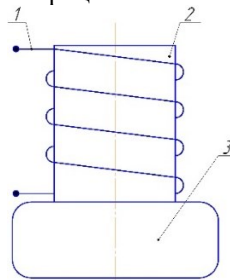


Рис. 6. Схема індукційного нагрівання: 1- індуктор; 2- частина заготовки що підлягає деформуванню; 3- матриця



Рис. 7. Локальний та об'ємний індукційний нагрів заготовок

Механічні властивості досліджуваної сталі, наведені в таблиці 4. Проведені розрахунки зусилля при ШО показали досить високу величину осьового зусилля - 5,45МН. Але, внаслідок того, що в даній схемі штампування на другому переході присутня схема калібрування, яка в розрахунковій формулі не враховується, то дійсне зусилля ШО виявляється ще вище.

У підсумку, при ШО напівфабрикату на другому переході для повного заповнення формуючих порожнин матриць зусилля преса виявилось недостатнім.

У зв'язку з цим подальші роботи потрібно виконувати в умовах гарячого ШО, (температура нагріву заготовок має бути 1150-1200 °С) товщина полотен фланців варіювалася від 5,0 до 8,0 мм.

При цьому, як правило, використовують наскрізне нагрівання заготовки. Пластичну деформацію нагрітої заготовки здійснюється ШО. На рис. 8 наведений принцип роботи індукційного нагрівача [4,14].

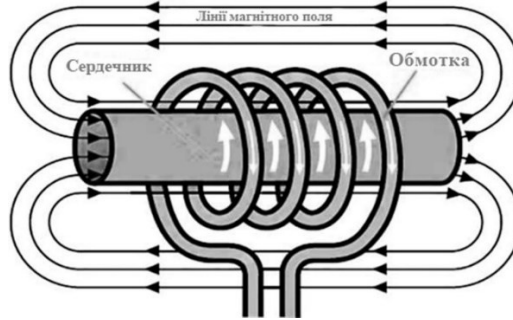


Рис. 8 Принцип роботи індукційного нагрівача

Індуктор забезпечує наскрізне нагрівання заготовки в зоні (30-40 мм) з метою уникнення еліпсності заготовки під час ШО.

Тіло нагрівання охоплюється витками індуктора. установку індукційного нагрівання можна розглядати як спеціальний понижувальний трансформатор, функції первинної обмотки якого виконує обмотка індуктора, а функції вторинної обмотки та її електричного кола навантаження - струмопровідне тіло нагрівання. За аналогією з трансформатором установка індукційного нагрівання може бути зображена схемою заміщення, наведеною на рис. 9.

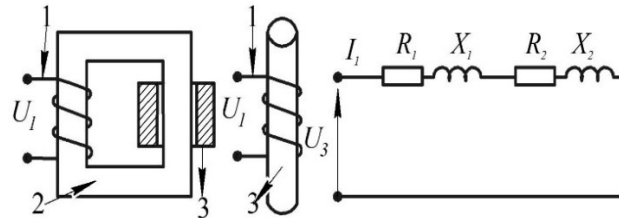


Рис. 9. Електрична схема індукційної установки

Індуктор створює змінне електромагнітне поле, в якому знаходиться тіло нагрівання [4]. Згідно із законом електромагнітної індукції в струмопровідному тілі нагрівання індукується ЕРС E_2 , В, величина якої визначається за формулою (7):

$$F_2 = 4,44\Phi_m w_2 f \cdot 10^{-8} \quad (8)$$

де: Φ_m - максимальне значення магнітного потоку, який створює індуктор, Вб;

w_2 - кількість послідовно з'єднаних витків, які створюють контур тіла нагрівання (як правило, $w_2=1$); f - частота струму джерела живлення індуктора, Гц.

Під дією ЕРС E_2 в тілі нагрівання проходять вихрові струми (струми Фуко) I_2 , А, що визначаються за формулою (8):

$$I_2 = E_2 \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \quad (9)$$

де X_2 - реактивний опір тіла нагрівання, Ом;

R_2 - активний опір, Ом, тіла нагрівання, що визначається за формулою (9):

$$R_2 = \frac{\rho_T L}{S} \quad (10)$$

де: L - довжина середнього шляху проходження вихрових струмів у тілі нагрівання, м; S - площа поперечного перерізу тіла нагрівання, m^2 ; ρ_T - питомий опір матеріалу тіла нагрівання при температурі T , Ом·м.

Питомий опір ρ_T , Ом·м, тіла нагрівання залежить від його температури T і визначається за формулою (10):

$$\rho_m = \rho_2 [1 \pm \alpha(T - 20)] \quad (11)$$

де ρ_2 - питомий опір матеріалу тіла нагрівання Ом·м.

Показником ефективності роботи установок індукційного нагрівання є електричний ККД n_K , що визначається за формулою (11):

$$n_K = \frac{P_T}{P_1 + P_T} \quad (12)$$

де P_1 - втрати потужності, Вт, в індукторі.

Дані вимірів основних розмірів напівфабрикатів після I-го і II-го проходів представлені в таблиці 5.

Схема пристрою для ШО інструментом заготовок фланцевих деталей представлена на рисунку 12. Принцип роботи пристрою полягає в тому, що на дзеркало матриці 1 встановлюють заготовку 5 і деформує її пуансоном 3, формуючи прямим видавлюванням стрижневу частину ШО фланця 6. При досягненні поверхні нижнього торця стрижня виробу торцевої поверхні поршня 4 метал заготовки 5 тече

уздовж конічної поверхні Б поршня 4 і заповнює кільцевий зазор утворений поверхнями Б поршня і канавкою А матриці, оформляючи в кільцевий бурт 8 на стрижні вироби 6. У зв'язку з тим, що кільцевий бурт має конічну поверхню з боку поршня, сили виштовхування, спрямовані перпендикулярно поверхні Б, притискають метал бурту 8 до внутрішньої поверхні кільцевої канавки А, забезпечуючи повне заповнення кільцевого зазору і, створюючи тим самим надійне з'єднання матриці 1 і поршня 4 з металом [4].

До основних параметрів індукційної установки відноситься частота струму. Для наскрізного нагрівання суцільних циліндричних сталевих заготовок приблизно частота струму в Гц, може бути визначеною за формулою:

$$f_{н.к} \approx \frac{3 \cdot 10^6}{d^2} \tag{13}$$

де d - діаметр заготовки, мм.

При обробці методом ШО трубних заготовок, необхідні значення товщини активного шару нагрівання при глибинному нагріванні (рис. 3) досягаються зміною частоти струму, Гц, індуктора, значення якої визначається за формулою:

$$\frac{10^6}{h_A^2} < f_{гш} < \frac{4 \cdot 10^2}{h_A^2} \tag{14}$$

де h_A - товщина активного шару, мм;

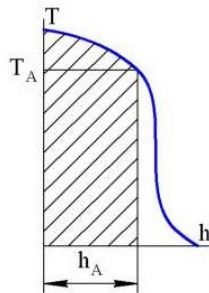


Рис. 10. Графік розподілу температури в заготовці при глибинному нагріванні

Сила струму і час обробки визначаються вимогами щодо досягнення температури, необхідної для забезпечення належної пластичності та характеристик міцності матеріалу заготовки [4].

Для круглих фланців використовували гаряче (індуктивне) штампування обкочуванням із співвідношенням ширини до висоти близько двох ($B/H = 2$).

Аналізуючи дослідження процесів штампування обкочуванням на гідравлічному пресі П2940ШО, технічні дані якого, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Технічні дані гідравлічного пресу П2940ШО

№ п/п	Робочий параметр	Основа преса				
		ПО 440ШО	П2940ШО	П7836	ПС-20	Му 11er
1	Зусилля НМ (т)	10 1000	10 1000	4 400	0,2 20	3 30
2	Розміщення робочого циліндра	Ниж.	Ниж.	Верх.	Верх.	Верх.
3	Хід повзуна, мм	350	400	1000	1300	1000
4	Швидкість руху, м/с					
	Робочого	0,5	2,7-17	37-60	1,5-8	4-10
	Холостого	50	175	580	580	350
5	Частота коливань Інструмента, Гц	1	4	6,7	8	8
6	Потужність приводу механізму ШО, кВт	30	110	90	14	55

В якості випробувального матеріалу була використана сталь 20 ДСТУ 7809:2015 механічні властивості, якого наведені в таблиці 3., а параметри технологічного процесу наведені в таблиці 4.

Таблиця 3

Механічні властивості сталі 20 ДСТУ 7809:2015

№ п/п	Властивість металу	Позначення	Одиниці виміру	Величина
1	Межа міцності	σ_B	МПа	540
2	Межа текучості	σ_T	МПа	320
3	Відносне подовження	δ	%	20
4	Відносне стиснення	ϕ	%	15
5	Твердість	НВ	МПа	210

Таблиця 4

Параметри комбінованого технологічного процесу рубки і ШО плоских заготовок

№ п/п	Назва параметру	Позначення	Одиниці виміру	Величина
1	Подача на один оберт	S	мм/об.	1,7
2	Кут нахилу інструмента	θ	Град.	1,5
3	Максимальне зусилля ШО	$P_{\text{ШО}}$	кН	4200
4	Максимальне зусилля вирубки	$P_{\text{руб.}}$	кН	2700

Таблиця 5

Розміри заготовок для процесу рубки ШО

№п/п	Назва	Позначення	Величина
1	Діаметр (мм)	D	300
2	Ширина полоси (мм)	B	190
3	Висота заготовки (мм)	H_3	20

В роботі ставилося завдання вивчення особливостей ШО тонких полотен і розвинених периферійних буртів фланців, а також особливостей ШО високолегованих стійких матеріалів.

В реальний час заготовки для деталі типу зубчасте колесо виготовляються методом на пів гарячого штампування (індуктивний нагрів) при $T=720-800$ °С на штампувальних молотах з подальшим обрізанням облою на механічних пресах. При цьому коефіцієнт використання металу (КВМ) становить 0,2-0,3. Невисока точність і високі припуски на механічну обробку обумовлюють значний обсяг токарної обробки при подальшому виготовленні деталей [4,14].

Висновки

Метод штампування обкочуванням (ШО) є високоефективною технологією обробки металів тиском, що забезпечує значну економію матеріалів (до 40%) та зниження трудомісткості виробництва (на 20%). Висока точність виготовлених виробів і низька шорсткість поверхонь є важливими перевагами цієї технології, що робить її популярною у багатьох промислових галузях. Однак існують суттєві технологічні обмеження, зокрема проблеми з руйнуванням матеріалу заготовки та втратою стійкості, особливо при обробці матеріалів з низькою пластичністю. Високі контактні напруження також негативно впливають на стійкість оснастки і якість готових виробів.

Застосування індукційного нагрівання заготовок розширяє можливості методу ШО щодо досягнення значних деформацій. Це забезпечує не лише покращену контрольованість процесу, а й підвищену точність виготовлених виробів. До переваг установок індукційного нагрівання належать висока продуктивність, яка пов'язана з високою швидкістю нагрівання, що дозволяє зменшити час обробки заготовок. Крім того, можливість нагрівання окремих частин заготовки та на необхідну глибину робить процес гнучким та економічно ефективним.

Індукційний нагрів дозволяє підвищити пластичність матеріалу, знизити ймовірність утворення дефектів та зменшити контактні напруження, що сприяє зменшенню зносу оснастки і збільшенню її ресурсу. Завдяки індукційному нагріванню також досягається значно менший угар металу, що забезпечує зменшення браку, пов'язаного із виникненням окалини, що в свою чергу сприяє зниженню витрат на матеріали та підвищенню якості готових виробів.

Розширення технологічних можливостей ШО завдяки індукційному нагріванню дозволить підвищити ефективність виробництва, знизити кількість дефектів та витрат на матеріали, а також розширити спектр застосування цієї технології в різних галузях промисловості, зокрема в машинобудуванні, енергетиці та авіаційній промисловості.

Для подальшого удосконалення технології ШО необхідно провести додаткові дослідження для оптимізації параметрів індукційного нагрівання, таких як частота струму, потужність індуктора та час нагрівання, а також розробити алгоритми для точного контролю температурного режиму заготовок під час обробки.

Таким чином, індукційне нагрівання є перспективною технологією для сучасних виробничих процесів, що дозволяє досягати високих показників продуктивності, якості та економічності в порівнянні з традиційними методами.

Література

1. Shtuts, A., Kolisnyk, M., Vydmysh, A., Voznyak, O., Baraban, S., & Kulakov, P. (2020). Improvement of stamping by rolling processes of pipe and cylindrical blades on experimental research. *Key Engineering Materials*, 844, 168-181. <https://doi.org/10.1007/s12598-020-0168-1>
2. 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*, 66(1), 51-58. <https://doi.org/10.1007/s12598-022-0151-1>
3. Mykhalevych, V. M., Kolisnyk, M. A., & Shtuts, A. A. (2025). Study of the stress-strain state of the material of the blanks during plastic stamping by rolling. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 47(1), 57-81. <https://doi.org/10.1007/s12598-025-0157-1>

4. Штуць, А. А., & Служалюк, М. О. (2020). Дослідження процесів штампування обкочуванням з використанням поверхневого нагріву заготовок. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2(97), 138-148.
5. Матвійчук, В. А., Колісник, М. А., & Штуць, А. А. (2022). Побудова кривих граничних деформацій матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2(105), 84-90.
6. Матвійчук, В. А., Михалевич, В. М., & Штуць, А. А. (2023). Аналіз напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при висаджуванні ресурсоощадним методом штампування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 1(120), 76-85.
7. Matviychuk, V., Mikhalevich, V., & Shtuts, A. (2023). Analysis of stress-strain state (SSS) of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping. *Вібрації в техніці та технологіях*, 1(108), 63-72.
8. Михалевич, В. М., Штуць, А. А., & Колісник, М. А. (2023). Дослідження процесів штампування обкочуванням за рахунок аналізу моделювання деформовності матеріалу заготовок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 3(122), 22-34.
9. Ogorodnikov, V. A., Zyska, T., & Sundetov, S. (2018). The physical model of motor vehicle destruction under shock loading for analysis of road traffic accident. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 10808. <https://doi.org/10.1117/1.5111111>
10. Ogorodnikov, V. A., Dereven'ko, I. A., & Sivak, R. I. (2018). On the influence of curvature of the trajectories of deformation of a volume of the material by pressing on its plasticity under the conditions of complex loading. *Materials Science*, 54(3), 326-332. <https://doi.org/10.1002/ms.2018.54.3.326>
11. Puzyr, R., Savelov, D., Shchetynin, V., Levchenko, R., Haikova, T., Kravchenko, S., Yasko, S., Argat, R., Sira, Y., & Shchipkovakyi, Y. (2018). Development of a method to determine deformations in the manufacture of a vehicle wheel rim. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1-94), 55-60. <https://doi.org/10.15627/ejet.2018.4.1.55>
12. Sereda, B., Kryhliyak, I., Sereda, D., & Kryhliyak, D. (2023). Modification of the surface of copper alloys with aluminum in the conditions of self-propagating high-temperature synthesis. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2, 130-133.
13. Матвійчук, В. А., Михалевич, В. М., Добранюк, Ю. В., & Бубновська, І. А. (2016). Спосіб визначення пластичності металів вальцюванням циліндричних зразків на клин. *МПК G01N 3/08 (2006/01)*, 109984.
14. Індукційний нагрів і індукційна плавка металів. (н.д.). *Школа для електрика: пристрій, проектування, монтаж, налагодження, експлуатація та ремонт електрообладнання*. Retrieved from <http://bezremonta.net/elektrika/2850-.html>

References

1. Shtuts, A., Kolisnyk, M., Vydmysh, A., Voznyak, O., Baraban, S., & Kulakov, P. (2020). Improvement of stamping by rolling processes of pipe and cylindrical blades on experimental research. *Key Engineering Materials*, 844, 168-181. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.844.168>
2. Matviychuk, 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*, 66(1), 51-58. <https://doi.org/10.1515/ppme-2022-66.1.51>
3. Mykhalevych, V. M., Kolisnyk, M. A., & Shtuts, A. A. (2025). Study of the stress-strain state of the material of the blanks during plastic stamping by rolling. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 47(1), 57-81. <https://doi.org/10.1002/mat.2025.47.1.57>
4. Shtuts, A. A., & Sluzhaliuk, M. O. (2020). Doslidzhennia protsesiv shtampuvannia obkochuvanniam z vykorystanniam poverkhniovoho nahrivu zahotovok. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 2(97), 138-148.
5. Matviichuk, V. A., Kolisnyk, M. A., & Shtuts, A. A. (2022). Pobudova kryvykh hranychnykh deformatsii materialiv. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 2(105), 84-90.
6. Matviichuk, V. A., Mykhalevych, V. M., & Shtuts, A. A. (2023). Analiz napruzhenno-deformovanoho stanu materialu zahotovok pry vysadzhuванні resursooschadnym metodom shtampuvannia. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 1(120), 76-85.
7. Matviychuk, V., Mikhalevich, V., & Shtuts, A. (2023). Analysis of stress-strain state (SSS) of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 1(108), 63-72.
8. Mykhalevych, V. M., Shtuts, A. A., & Kolisnyk, M. A. (2023). Doslidzhennia protsesiv shtampuvannia obkochuvanniam za rakhunok analizu modeliuвання deformatsii materialu zahotovok. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 3(122), 22-34.
9. Ogorodnikov, V. A., Zyska, T., & Sundetov, S. (2018). The physical model of motor vehicle destruction under shock loading for analysis of road traffic accident. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 10808. <https://doi.org/10.1117/1.5111111>
10. Ogorodnikov, V. A., Dereven'ko, I. A., & Sivak, R. I. (2018). On the influence of curvature of the trajectories of deformation of a volume of the material by pressing on its plasticity under the conditions of complex loading. *Materials Science*, 54(3), 326-332. <https://doi.org/10.1002/ms.2018.54.3.326>
11. Puzyr, R., Savelov, D., Shchetynin, V., Levchenko, R., Haikova, T., Kravchenko, S., Yasko, S., Argat, R., Sira, Y., & Shchipkovakyi, Y. (2018). Development of a method to determine deformations in the manufacture of a vehicle wheel rim. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1-94), 55-60. <https://doi.org/10.15627/ejet.2018.4.1.55>
12. Sereda, B., Kryhliyak, I., Sereda, D., & Kryhliyak, D. (2023). Modification of the surface of copper alloys with aluminum in the conditions of self-propagating high-temperature synthesis. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2, 130-133.
13. Matviichuk, V. A., Mykhalevych, V. M., Dobraniuk, Yu. V., & Bubnovska, I. A. (2016). Sposib vyznachennia plastychnosti metaliv valtsiuванням tsylindrychnykh zrazkiv na klyn. *МПК G01N 3/08 (2006/01)*, 109984.
14. Індукційний нагрів і індукційна плавка металів. (н.д.). *Школа для електрика: пристрій, проектування, монтаж, налагодження, експлуатація та ремонт електрообладнання*. Retrieved from <http://bezremonta.net/elektrika/2850-.html>