

**Матвійчук В.А.**

д.т.н., професор

**Савків В.В.**

аспірант

**Вінницький національний  
аграрний університет****Matviychuk V.**Doctor of Technical  
Sciences, Professor**Savkiv V.**

postgraduate student

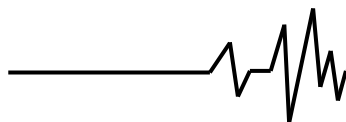
**Vinnitsia National Agrarian  
University****УДК 621.77.01****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-4-7****ШТАМПУВАННЯ  
ОБКочУВАННЯМ ЗАГОТОВОК З  
ВИКОРИСТАННЯМ  
УДОСКОНАЛЕНОГО  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО  
ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ**

В статті приведені результати розробки і дослідження технологічних схем холодного штампування обкочуванням (ШО) заготовок. Розширення технологічних можливостей процесів ШО і підвищення якості виробів здійснюється на основі керування активними силами тертя та деформовністю оброблюваних металів. Основними обмежуючими факторами, при застосуванні процесів ШО, є недостатня пластичність металів, що обумовлює ризик руйнування заготовок, а також відносно великі зусилля деформування, які спричиняють несприятливі умови роботи блоку підшипників кочення. Вирішенню цих проблем сприяє перехід на гаряче ШО. Проте проблеми виготовлення методом гарячого ШО виробів із трубних і суцільних циліндричних заготовок на сьогодні мало досліджені. Ефективним процесом нагрівання заготовок є індукційне нагрівання, проте його застосування характеризується відносно низьким коефіцієнтом корисної дії.

В роботі для реалізації гарячого ШО рекомендовано застосовувати нові матеріали і технологію виготовлення індукційних нагрівачів, які відкривають можливості вдосконалення індукційного нагрівального обладнання для промислового застосування. Використання індукційних нагрівачів нового покоління, для заміни інших методів нагріву в металообробці, має суттєві переваги: вища ефективність; менше розсіяних магнітних полів; менша складність конструкції котушки; підвищена геометрична свобода; не потрібно водяне охолодження.

З метою дослідження гарячого ШО спроектовані і виготовлені пристрої обкочування заготовок конічними і циліндричними валками. Проведено фізичне моделювання гарячого ШО шляхом використання суцільних циліндричних свинцевих заготовок. Експериментально доведено, що процес гарячого ШО дозволяє досягати значних ступенів деформації навіть за несприятливого напружено-деформованого стану і незначної потужності обладнання. Таким чином, процес індукційного нагрівання заготовок може бути досить ефективним при обробці їх методом гарячого ШО.

**Ключові слова:** штампування обкочуванням, гаряче деформування, індуктивність, енергоефективність, м'які магнітні композити.



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробка технологічних процесів холодного ШО на основі оцінки деформовності матеріалом широко представлена в роботах [3, 4]. Проблеми ж виготовлення методом гарячого ШО виробів із трубних і суцільних циліндричних заготовок на сьогодні мало досліджені. Разом з тим, розвиток процесів гарячого локального деформування металів отримав досить широке розповсюдження [6, 7].

Індукційний нагрів - це метод забезпечення індуктованими електричними струмами швидкого і рівномірного нагрівання металевих заготовок. Залежно від геометрії і властивостей заготовки, а також бажаного режиму нагрівання, перевага надається різним частотам змінного струму. Низькі частоти можуть бути ефективні для більш розмірних заготовок, що потребують глибокого проникнення тепла, в той час як більш високі частоти використовуються для дрібних заготовок або неглибокого проникнення. Щільність струму зменшується експоненціально з товщиною провідника:

$$I = I_s \cdot e^{-\delta/d},$$

де  $I$  - густина струму на відстані  $d$  від поверхні, що має щільність струму  $I_s$ ;  $\delta$  - глибина шару, що визначає відстань від поверхні до точки, в якій густина струму зменшилася на  $e^{-1}$ ,  $\delta$  - параметр, що залежить від матеріалу:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}}, \quad (2)$$

де  $f$  - частота,  $\rho$  - питомий опір і  $\mu$  проникність матеріалу.

Тепло при індукційному нагріванні створюється за рахунок резистивних втрат, а для феромагнітних матеріалів також від магнітного гістерезису втрат. Внесок гістерезису зменшується з підвищенням температури до точки Кюрі (770°C для заліза), де вплив гістерезису зникає. Резистивні втрати  $P_e$  можуть бути розраховані за законом Ома, як  $I^2 \cdot R$ , що в припущенні однорідного матеріалу заготовки, однорідного магнітного поля і листа товщиною  $d$ , можуть бути:

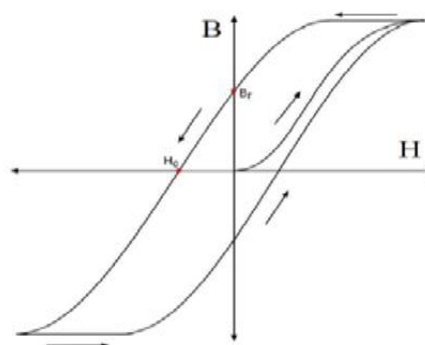
$$P_e = \frac{\pi^2 d^2 B^2 f^2}{6\rho}, \quad (3)$$

де  $B$  позначає густину магнітного потоку.

Не всі викладені припущення є правильними; глибина обшивки повинна бути значно меншою за товщину заготовки, щоб індукційний нагрів працював добре. В дійсності ж магнітне поле дуже велике на поверхні у порівнянні з центром заготовки. Нерівномірний розподіл тепла створює нерівномірний питомий

опір в матеріалі, а для феромагнітних заготовок, крім того, проникність змінюється як від температури, так і від насичення в поверхнях. Наближення не дає достовірних результатів, але дає уявлення про те, які параметри впливають на результат.

При накладенні магнітного поля на феромагнітний матеріалу, він намагнічується за петлею гістерезису подібно до рис. 1. Енергія для досягнення певного стану на кривій гістерезису дорівнює добутку  $H$ - і  $B$ -поля, тобто необхідний внесок енергії такого ж розміру, як і площа петлі, для завершення повного періоду розмагнічування і перемагнічування. Сумарні втрати на гістерезис або гістерезисні втрати  $P_m$  можуть бути отримані шляхом інтегрування енергії намагнічування по всьому об'єму  $V$  заготовки на кількість петель в секунду [10]:



**Рис. 1. Типова крива намагніченості феромагнітних матеріалів**

$$P_m = f \cdot \int_V BH \, dV = f \cdot \int_V \mu H^2 \, dV. \quad (4)$$

При порівнянні рівняння для електричних і магнітних втрат,  $P_e$  і  $P_m$ , можна помітити, що резистивне нагрівання має залежність  $f^2$ , в той час як внесок гістерезису пропорційний частоті. Звідси випливає висновок, що для нагрівання кольорових матеріалів потрібна більш висока частота комутації. Іншим зауваженням є питомий опір в знаменнику  $P_e$ , який показує, що легше нагріти заготовку з хорошою провідністю. Нарешті, потужність нагріву пропорційна квадрату магнітного поля, що має вирішальне значення для доброго результату.

Індукційне нагрівання є універсальним методом по відношенню до геометрії, матеріалу і потужності, маючи дуже високу енергоефективність, хоча і не 100%. Небажані втрати потужності  $P_{loss}$  можна розділити на резистивні втрати, створювані струмом  $I$  через котушку з опором  $R$ :

$$P_{loss} = I^2 \cdot R. \quad (5)$$

Також в силовій електроніці присутні втрати в межах 2-5%, як стверджують



виробники. При високій температурі нагрівання основні втрати, як правило, пов'язані з тепловим випромінюванням, викликаним недостатньою теплоізоляцією.

Основними компонентами системи індукційного нагрівання є імпульсний інвертор частоти, трансформатор, конденсатор фазового випереджаючого фільтра, індукційна котушка та заготовка. Трансформатор не має вирішального значення, але часто використовується для адаптації напруги і струму від джерела живлення до імпедансу котушки, що генерує магнітне поле. Конденсатори можуть бути частиною інвертора або розподілені для створення необхідної резонансної частоти, на якій система має найкращу продуктивність. Коли заготовка розміщується в зоні котушки, магнітне поле індукує вихрові струми в заготовці, створюючи чітко визначену теплову картину без будь-якого фізичного контакту між котушкою і заготовкою.

Оскільки глибина шару міді на типових частотах для індукційного нагрівання значно менша за 1 мм, ефективна площа твердого мідного прутка, що знаходиться в зоні котушки, також значно менша за 1 мм. При проходженні великого струму через такий дріт призведе до великих втрат в котушці, підвищуючи її температуру, що підвищить опір шини і ще збільшить втрати. Кращим рішенням є використання мідної трубки, яка має таку ж ефективну площу провідності, що і стрижень, а також отвір для проходження через неї охолоджуючої води, щоб підтримувати температуру і тим самим знизити опір. Це основна причина, чому більшість індукційних котушок виготовляють з мідних трубок, як правило, діаметром від 1/8" до 3/16" (4-6 мм). Форма котушки повинна відображати геометрію заготовки, що нагрівається. Котушки можуть мати практично будь-яку форму з одним або декількома витками. На сьогоднішній день

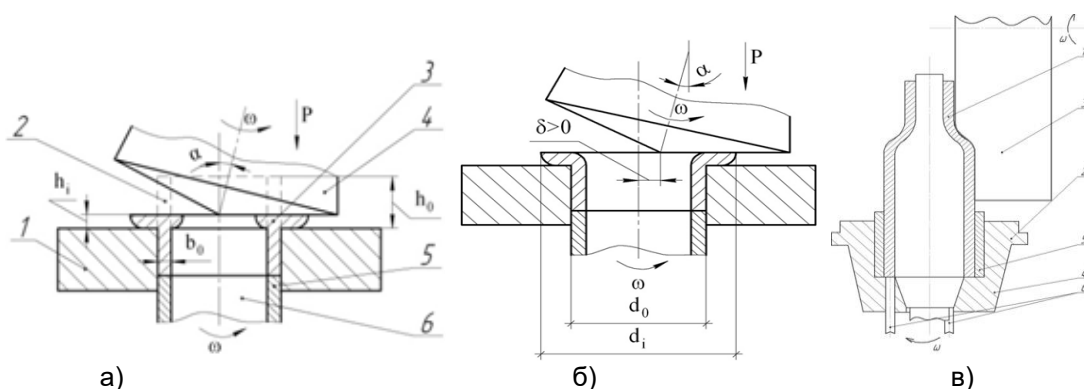
найбільш часто використовуваною геометрією котушки в промисловості є гвинтова.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є обґрунтування і розробка процесів гарячого ШО трубних і суцільних циліндричних заготовок, а також розробка універсального рішення для індукційного нагрівання, яке може бути адаптоване до різних промислових застосувань з невеликими витратами на встановлення.

**Основні результати дослідження.** Процеси ШО в силу своїх технологічних переваг відносяться до найперспективніших напрямів в обробці металів тиском. ШО є процесом локального ротаційного пластичного деформування в торець або під кутом до осі заготовки, що обертається, конічним або циліндричним валком. На рис. 2 показані технологічні схеми висаджування буртів і обтиснення трубних заготовок. Загалом цей спосіб дозволяє виготовляти точні заготовки типу профільованих кілець, втулок із зовнішніми і внутрішніми буртами, фланців, переходів, заготовок під витягування із вуглецевих і легованих сталей та сплавів, кольорових металів.

Формоутворення заготовок методом ШО можна здійснити, використовуючи технологічні схеми: висаджування зовнішніх і внутрішніх буртів на трубних заготовках; обтискування, роздавання і відборткування трубних заготовок; осаджування; прямого і зворотнього видавлювання; переформування і профілювання; карбування і калібрування; комбіновані схеми формоутворення тощо.

Найбільш небезпечними через руйнування технологічними схемами є висаджування зовнішніх буртів на трубних заготовках (рис. 2 б) і, особливо, висаджування суцільних циліндричних заготовок. Обширний аналіз деформовності матеріалу заготовок проведено в роботі [1].



**Рис. 2. Висаджування буртів конічним валком а), б) та обтиснення заготовки циліндричним валком в): 1 – матриця, 2 – вихідна заготовка, 3 – сформований виріб, 4 – валок, 5 – штовхач, 6 – оправка**



При інженерних розрахунках граничний діаметр зовнішнього бурта  $d_*$  трубної

$$d_* = d_0 \exp\left\{0,865\varepsilon_*(\eta=0)\exp(-\eta_k \ln \lambda)^w - 0,14[\varepsilon_*(\eta=0)\exp(-\eta_k \ln \lambda)]^2\right\}, \quad (6)$$

де  $d_0$  – вихідний діаметр заготовки;  $\varepsilon_*(\eta=0)$  – гранична деформація при крученні;  $\eta_k$ , – значення показника  $\eta$  в точці перетину шляху деформування часток матеріалу вільної поверхні бурта з кривою граничних деформацій;

$\lambda = \varepsilon_*(\eta=-1)/\varepsilon_*(\eta=0)$  – показник чутливості пластичності матеріалу до схеми напруженого стану;  $\varepsilon_*(\eta=-1)$  – гранична деформація при одновісному стиску;  $W$  – коефіцієнт впливу історії деформування на пластичність, при висаджуванні ШО зовнішніх буртів  $w = 1, 2 \dots 1, 35$  [1].

Матеріали з пологими кривими граничних деформаций можуть руйнуватися не на вільній поверхні бурта, а в зоні з максимальною інтенсивністю деформацій, що розташовується по всій висоті бурта  $h$  на

заготовки, при висаджуванні методом ШО, можна визначити за рівнянням:

відстані  $b_0$  від внутрішньої поверхні вихідної трубної заготовки. В цьому випадку допустиму ступінь формозміни слід перевіряти також за граничним ступенем осаджування бурта:

$$h_0/h_* = \exp[\varepsilon_*(\eta=0)\exp(1,5 \ln \lambda)]. \quad (7)$$

Як визначалося вище, суттєве підвищення пластичності металів і зниження їх характеристик міцності дозволяє нагрівання заготовок. Фізичне моделювання процесів гарячого деформування можна здійснити з використанням свинцевих заготовок. Для моделювання гарячого ШО нами була спроектована і виготовлена приставка до свердлильного верстата, яка показана на рис. 3 а, а також обкочувальний вузол з циліндричним валком для токарного верстата.

Як видно з рис. 3 а, робоча зона установки дозволяє вільно розміщувати індуктор для нагрівання заготовки.



а)



б)

**Рис. 3. Пристрої для штампування обкочуванням: а) – приставка для обкочування заготовки конічним валком на свердлильному верстаті; б) – обкочувальний вузол з циліндричним валком**

При моделюванні була використана найбільш небезпечна, з точки зору руйнування матеріалу, технологічна схема висаджування частини циліндричної суцільної заготовки. Оскільки обладнання відносно малопотужне, то для холодного ШО були використані заготовки з алюмінієвого сплаву АД 1.

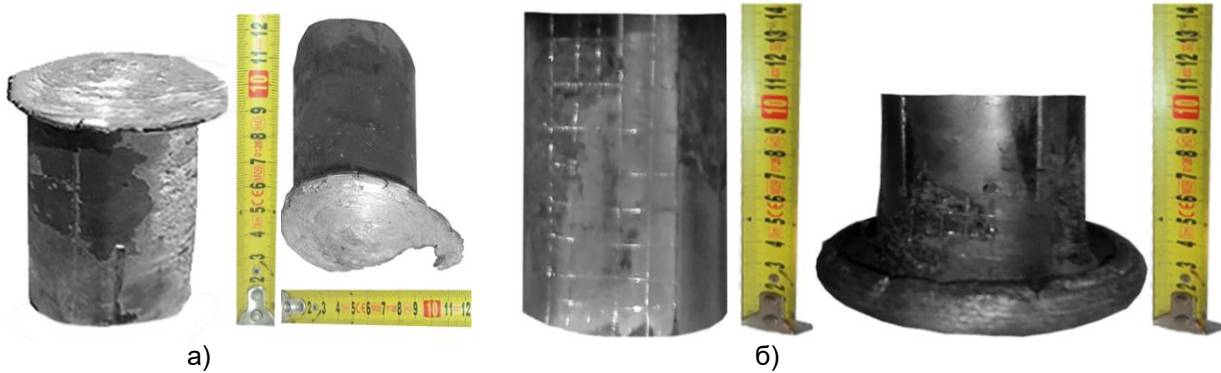
На рис. 4 а показана заготовка зі сплаву АД 1, деформована по схемі висаджування методом ШО. Як видно з рисунка, при деформуванні відбулося руйнування матеріалу заготовки при відносно невеликих деформаціях. Це свідчить про «жорсткість» схеми напружено-деформованого стану і деже обмежені можливості по холодному



висаджуванню циліндричних суцільних заготовок методом ШО.

Для фізичного моделювання гарячих процесів були використані свинцеві заготовки, представлені на рис. 4 б. Слід відзначити, що свинець за своїми механічними характеристиками відповідає сталям, нагрітим до температури гарячого штампування. Як видно

з рис. 4 б, процес гарячого ШО дозволяє досягати значних ступенів деформації навіть за несприятливого напружено-деформованого стану і незначної потужності обладнання. Таким чином, процес індукційного нагрівання заготовок може бути досить ефективним при обробці їх методом ШО.



**Рис. 4. Заготовки, деформовані за технологічною схемою висаджування методом ШО: а) процес холодного деформування, матеріал сплав АД 1; б) моделювання процесу гарячого деформування, матеріал свинець**

Як вже згадувалося, індукція є економічно ефективним методом нагрівання. Цей метод може вирішувати складні проблеми, проте слід виділити ряд недоліків, пов'язаних з існуючою індукційною технологією нагрівання, що заважає її використанню в повній мірі:

- часто необхідне водяне охолодження котушок, що додає окрему систему підтримки з насосами і з'єднаннями та призводить до додаткових витрат і ускладнення системи нагрівання;

- магнітні блукаючі поля можуть становити небезпеку для здоров'я обслуговуючого персоналу, якщо котушки відкриті, а рівні струму є високими, причому цей аспект ще не повністю досліджений;

- багато звичайних індукційних нагрівальних котушок показують відносно низьку енергоефективність через низьку концентрацію поля і струмових ефектів у поєднанні з ефектом близькості;

- звичайні індукційні котушки часто мають високу собівартість виробництва, а їх виготовлення вимагає індивідуальних рішень для кожного конкретного завдання нагрівання. Це, у поєднанні з обмеженим терміном служби котушки, часто призводить до її дорожнечі;

- рівномірне нагрівання великих площ є затребуваним в багатьох сферах, але її важко досягти традиційними індукційними методами.

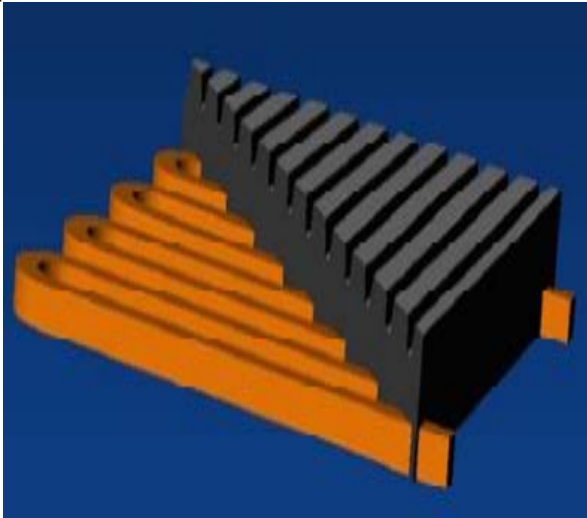
Якби деякі або всі проблеми були вирішені, індукційне нагрівання можна було б впровадити у величезній кількості нових застосувань, де сьогодні використовуються електричні печі чи відкрите полум'я.

В останнє десятиліття з'явилася нова технологія, заснована на порівняно недавно застосованій групі матеріалів - м'яких магнітних композитів (ММК), замість ламінованої сталі, що полегшує виробництво виробів з більш інтегрованими, меншими, легшими, дешевшими і дуже ефективними електромагнітними компонентами. Застосування цієї технології є зміною парадигми щодо інтегрованого дизайну та енергоефективності. ММК дає повну свободу для проектування тривимірних електромагнітних ланцюгів з відмінними магнітними характеристиками. Правильне використання конструкцій на основі ММК може призвести до створення менших, дешевших (менша кількість деталей), більш ефективних рішень існуючих проблем проектування, а також до вирішення проблем, які до цього часу вважалися нерозв'язними.

ММК - це сполуки, що складаються переважно з магнітних частинок заліза, покритих тонким електроізоляційним шаром і з'єднаних між собою пресуванням під високим тиском. Іноді використовується немагнітна полімерна зв'язуюча, а іноді достатньо термічної обробки для досягнення необхідних механічних властивостей. ММК-матеріал може бути відлитий і сформований навколо, наприклад, котушки довільної форми за допомогою різних методів, від традиційного лиття до більш досконалих методів, таких як лиття під тиском. Розширення концепції ММК до м'який магнітно-формуваельний композит, ММ<sup>2</sup>К відбулося як прямий наслідок успішних експериментальних результатів досліджених в попередніх проектах [10].



Технологія індукційного нагрівання заснована на використанні м'якого магнітного потоку зворотного зв'язку у поєднанні з котушками Літца. Наступним кроком стало формування зворотного зв'язку потоку безпосередньо на котушці Літца, як показано на рис. 5.



**Рис. 5. Принципова конструкція індуктора. Мідна котушка Літца вбудована в ММК-матеріал, що має відносну проникність 15 і хороші теплопровідні властивості**

Це призвело б до створення дуже компактного, енергоефективного та простого у виготовленні типу індукційної котушки. Виконання формування котушки в розумний спосіб, теплопередача малих омичних втрат, що виникають в котушці, і малих втрат на переміщення, що генеруються в магнітному потоці, вирішується через провідник зворотного зв'язку. При цьому відпадає необхідність в безпосередньому охолодженні, що в свою чергу, дає можливість побудувати ще більш компактні та ефективні котушки індукційного нагрівання. Охолодження тильної сторони котушки або не примусове, або, для більш високих густин енергії здійснюється повітрям. Це величезна перевага у порівнянні з існуючими технологіями.

Літц-провід - це особливий вид дроту, що складається з безлічі тонких дротів, окремо покритих ізоляційною плівкою і скручених між собою. Скручено дріт таким чином, що дозволяє різним жилам розташовуватися всередині провідника, а також на поверхні в однаковій мірі, що призводить до зменшення скін-ефекту і пов'язаних з ним втрат потужності при використанні в високочастотних пристроях. Усунутий ефект близькості дроту Літца сприяє збільшенню ефективної площі міді та подальшому зменшенню втрат. При використанні потоку зі зворотним зв'язком із низькою високочастотною намагніченістю та

втратами високочастотного намагнічування і доброю теплопровідністю, енергія буде влучно сфокусована на технологічній ділянці і дасть неперевершену енергоефективність. Фактично ефективність є настільки високою, що відпадає необхідність в рідинному охолодженні.

Допустимі значення магнітних полів і їх вплив на здоров'я людей - дуже обговорювана тема. Конструкція зі зворотним зв'язком по потоку підтримки матеріалів призводить до дуже низьких навколишніх магнітних полів. Часто розсіяні магнітні поля можна зробити меншими, ніж поля, що надходять від вентиляторів охолодження. Знання і технології з різних дослідницьких проектів можуть бути використані для розробки нової технології виробництва індукційного нагрівального обладнання. Необхідні кроки для використання повного потенціалу технології проілюстровано наступною послідовністю.

1. Індукційний нагрівальний елемент промислового стандарту сьогодні складається з мідної трубки з водяним охолодженням і, іноді, польового концентратора, виготовленого з ММК або аморфних сплавів. Використовуючи котушку, повністю оточену високоефективним провідником потоку, магнітний зв'язок із заготовкою істотно збільшиться.

2. Використовуючи збільшений зв'язок, струм можна буде зменшити, зберігаючи при цьому ту ж саму потужність, що надає можливість впровадити низькоомний дріт Літца з низькими омичними втратами, замість мідної трубки.

3. З цією високоефективною нагрівальною котушкою втрати зменшаться до такої міри, що відпаде необхідність охолоджувати теплообмінник рідиною.

4. Заключним етапом є формування провідника потоку ММК з флюсопроводом безпосередньо на котушці Літца. Завдяки відносно високій теплопровідності всіх вхідних компонентів котушки, охолодження може бути розміщене на зворотному боці нагрівальної спіралі. Таким чином, 100% критичної зони процесу може бути заповнено матеріалами, активними в процесі індукційного нагріву.

Слід зазначити, що не можливо досягти 4-го рівня без виконання дій на попередніх 3-х етапах.

Прототип індукційного установки. Ряд прототипів нагрівачів було розроблено та випробувано з покращеними характеристиками для кожного нового покоління. Здавалося б, просто виготовити індуктори, що містять лише два функціональних елементи, котушку і магнітний провідник, але при цьому можливо багато похибок. Оскільки котушка індуктивності



побудована на дроті Літца, а струмопровід з литого ММ<sup>2</sup>К, що забезпечує описані вище переваги, дроту потрібно не тільки надати потрібної форми, але і отримати ізоляційний шар, щоб уникнути короткого замикання перед тим, як помістити в матрицю для процесу лиття.

Прес-форма повинна бути герметичною, щоб уникнути витоків під час ротаційного лиття ММ<sup>2</sup>К, коли на рідину діють великі сили, і в той же час мати отвори для двох з'єднань змійовика і допускати розформування готового нагрівача.

Конструкція котушки, що використовується для нагрівачів, - це поперечний потік типу 2-5 витків з використанням квадратного дроту 7\*15 мм. Після ізоляції котушки і формування в ММ<sup>2</sup>К індуктор готовий до монтажу в нагрівальний модуль.

Матеріал ММ<sup>2</sup>К розроблений для зменшення втрат в матеріалі, але вони не можуть бути зведені до нуля, і тому матеріал буде дещо нагріватися. Він буде піддаватися тепловому випромінюванню від нагрітої заготовки, а також поглинати втрати в нагрівальній котушці. Тому нижня поверхня спроектована з інтегрованими охолоджувальними фланцями, що забезпечують велику поверхню для примусового повітряного охолодження. Форма півкола обрана з двох причин, по-перше, для мінімізації використання матеріалу ММ<sup>2</sup>К і, по-друге, для посилення магнітних полів.

Основною ідеєю нагрівальних модулів є універсальність. Конструкція підтримує багато різних застосувань і може досить легко замінити існуючу технологію на виробничій лінії. Першим застосуванням, яке пройшло промислові випробування, був випарник, що замінив інфрачервону піч для випаровування мастил на пресованих виробках. При розробці індукційної нагрівальної котушки однією з головних ідей було звести до мінімуму трудомісткість заміни зламаного елемента, а також спростити виробництво нагрівальних пластин різних розмірів. Тому вся нагрівальна плита розділена на шість окремих нагрівальних котушок, які можуть бути замінені незалежно, отже можна використовувати менші форми, з якими легше працювати, що здешевлює їх виробництво. Це також означає, що можна легко змінювати розмір, просто розмістивши необхідну кількість нагрівальних котушок поруч.

**Висновки.** Нагрівання заготовок значно розширює технологічні можливості процесу ШО. Ефективним способом нагрівання заготовок є індукційне нагрівання. Проте його застосування характеризується відносно низьким коефіцієнтом корисної дії. Для

реалізації гарячого ШО рекомендовано застосовувати новий матеріал і технологію виготовлення індукційних нагрівачів. Використання індукційних нагрівачів нового покоління, для заміни інших методів нагріву в металообробці, має суттєві переваги не тільки з точки зору впливу на навколишнє середовище, але і з економічної точки зору.

Основні причини використання цієї, а не традиційно індукційної технології нагріву:

- вища ефективність;
- менше розсіяних магнітних полів;
- менша складність конструкції котушки;
- підвищена геометрична свобода;
- не потрібно водяне охолодження.

#### Список використаних джерел

1. В. А. Матвійчук., І. С. Алієв. Вдосконалення процесів локальної ротаційної обробки тиском на основі аналізу деформовності металів. Краматорськ: ДДМА. *Монографія*. 2009.
2. Краєвський В. О., Матвійчук В. А., Михалевич 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.
3. Матвійчук В.А., Михалевич В.М., Колісник М.А. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. №1(104). С. 81-91.
4. Viktor Matvijchuk., Andrii Shtuts., Mykola Kolisnyk., Ihor Kupchuk., Iryna Derevenko. 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.
5. Матвійчук В. А., Рубаненко О. Є., Стаднійчук І. П. Електротехнології в АПК. *Навчальний посібник*. Вінниця. ТВОРИ. 2020. 273с.
6. Матвійчук В.А. Моделювання температурних і деформаційних полів заготовки в процесі гарячого вальцювання за схемою «круг-овал». /В.А. Матвійчук, І. А. Бубновська// Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2015.– №1(40). – С.35 – 39.
7. Матвійчук В.А. Аналіз схем технологічного процесу виготовлення компресорних лопаток із застосуванням операції гарячого вальцювання /В. А. Матвійчук, І. А. Бубновська// Техніка, енергетика, транспорт АПК. – Вінниця, 2016. – №3 (95). – С. 160 – 165.



8. Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. (2017). Handbook of Induction Heating (2nd ed.). CRC Press. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/1524142/handbook-of-induction-heating-pdf> (Original work published 2017)

9. Поплавко Ю.М. Основи фізики магнітних явищ в кристалах. Київ. 2007.

10. Reinap, A., Alaküla, M., Cedell, T., Andersson, M., Jeppsson, P. (2008). Evaluation of soft magnetic moldable composite core motors. ICEM'08- XVIII International Conference on Electrical Machines.

11. Kolleck, R., Veit, R., Merklein, M., Lechler, J., Geiger, M. (2009). Investigation on induction heating for hot stamping of boron alloyed steels. *Manufacturing Technology. Annals of the CIRP*. 58:275-278.

12. Acero, J., Hernández, P.J., Burdío, J.M., Alonso, R., Barragán, L.A. (2005). Simple resistance calculation in litz-wire planar windings for induction cooking appliances. *IEEE Transactions on magnetics*. vol. 41. no. 4:1280-1288.

#### References

1. V. A. Matviychuk, I. S. Aliev. (2009). Improvement of local rotational pressure treatment processes based on analysis of metal deformability. *Kramatorsk: DDMA. Monograph*.

2. Kraevsky V. O., Matviychuk V. A., Mikhalevich V. M. (2003). Influence of technological parameters on the kinematics of cold end rolling. *Improvement of processes and equipment of pressure treatment in mechanical engineering and metallurgy. Kramatorsk-Sloviansk. C.286-291*.

3. Matviychuk V.A., Mikhalevich V.M., Kolisnyk M.A. Evaluation of deformability of the material of blanks at direct and reverse extrusion by stamping by rolling. *Vibrations in engineering and technology*. 2022. №1(104). C.81-91.

4. Viktor Matviychuk., Andrii Shtuts., Mykola Kolisnyk., Ihor Kupchuk., Iryna Derevenko. 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.

5. Matviychuk V. A., Rubanenko O. E., Stadniychuk I. P. Electrical technologies in agriculture. Study guide. Vinnytsia. WORKS. 2020. 273c.

6. Matviychuk V.A., I.A. Bubnovska. Modeling of temperature and deformation fields of the workpiece in the process of hot rolling according to the "circle-oval" scheme. *Processing of materials by pressure - Kramatorsk: DGMA, 2015.- №1(40). - P.35 - 39*.

7. Matviychuk V.A., I.A. Bubnovska. Analysis of the schemes of the technological process of manufacturing compressor blades with the use of hot rolling operation. *Technique, energy, transport of the agricultural complex. - Vinnytsia, 2016. - №3 (95). - P. 160 - 165*.

8. Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. (2017). Handbook of Induction Heating (2nd ed.). CRC Press. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/1524142/handbook-of-induction-heating-pdf> (Original work published 2017)

9. Poplavko Y.M. Fundamentals of physics of magnetic phenomena in crystals. Kyiv. 2007.

10. Reinap, A., Alaküla, M., Cedell, T., Andersson, M., Jeppsson, P. (2008). Evaluation of soft magnetic moldable composite core motors. ICEM'08- XVIII International Conference on Electrical Machines.

11. Kolleck, R., Veit, R., Merklein, M., Lechler, J., Geiger, M. (2009). Investigation on induction heating for hot stamping of boron alloyed steels. *Manufacturing Technology. Annals of the CIRP*. 58:275-278.

12. Acero, J., Hernández, P.J., Burdío, J.M., Alonso, R., Barragán, L.A. (2005). Simple resistance calculation in litz-wire planar windings for induction cooking appliances. *IEEE Transactions on magnetics*. vol. 41. no. 4:1280-1288.

#### STAMPING BY ROLLING BLANKS USING ADVANCED ENERGY-EFFICIENT INDUCTION HEATING

The article presents the results of development and research of technological schemes of cold forming by rolling (CFR) of blanks. Expansion of the technological capabilities of the processes of COP and improving the quality of products is based on the control of active friction forces and deformability of the processed metals. The main limiting factors in the application of SHO processes are insufficient ductility of metals, which causes the risk of destruction of workpieces, as well as relatively large deformation forces that cause unfavorable operating conditions of the rolling bearing unit. The solution of these problems is facilitated by the transition to hot SHO. However, the problems of manufacturing by the hot SHO method of products from tubular and solid cylindrical billets have been little studied to date. An effective process of billets heating is induction heating, but its application is characterized by relatively low efficiency.

In this work, it is recommended to use new materials and technology for the manufacture of induction heaters for the implementation of hot SHO, which open up opportunities for improving induction heating equipment for industrial





applications. The use of new generation induction heaters to replace other heating methods in metalworking has significant advantages: higher efficiency; less scattered magnetic fields; less complexity of the coil design; increased geometric freedom; no water cooling is required.

In order to study the hot SHO, devices for rolling billets with conical and cylindrical rolls were designed and manufactured. Physical modeling of hot SHO by using solid cylindrical lead billets was carried out. It is experimentally proved that the

process of hot SHO allows to achieve significant degrees of deformation even at unfavorable stress-strain state and insignificant power of the equipment. Thus, the process of induction heating of blanks can be quite effective when processing them by hot SHO.

**Key words:** rolling stamping, hot deformation, inductance, energy efficiency, soft magnetic composites.

#### **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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:vovasavkiv@gmail.com))