

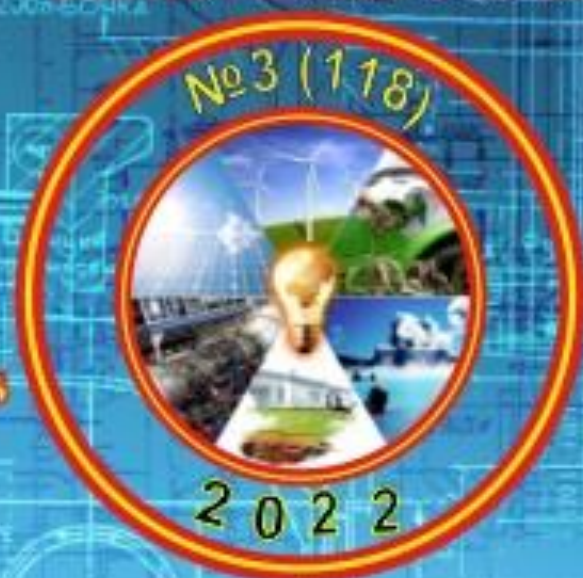


Всеукраїнський науково-технічний журнал

All-Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2520-6168 (Print)

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3



Machinery
Energetics
Transport
of Agribusiness

ТЕХНІКА
ЕНЕРГЕТИКА
ТРАНСПОРТ АПК



Всеукраїнський науково-технічний журнал

**ТЕХНІКА,
ЕНЕРГЕТИКА,
ТРАНСПОРТ АПК**

№ 3 (118) / 2022

м. Вінниця - 2022

**ТЕХНІКА,
ЕНЕРГЕТИКА,
ТРАНСПОРТ АПК**

Журнал науково-виробничого та навчального спрямування
Видавець: Вінницький національний аграрний університет

Заснований у 1997 році під назвою «Вісник Вінницького державного сільськогосподарського інституту».
Правонаступник видання: Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.
Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації
КВ № 16644–5116 ПР від 30.04.2010 р.

*Всеукраїнський науково – технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» /
Редколегія: Токарчук О.А. (головний редактор) та інші. Вінниця, 2022. № 3 (118). С. 133.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету
(протокол № 9 від 23.12.2022 р.)*

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової інформації №21906-11806 Р від 12.03.2016р.

*Журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» включено до переліку наукових фахових видань
України з технічних наук (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України
від 02.07.2020 року №886);*

- присвоєно ідентифікатор цифрового об'єкта (Digital Object Identifier – DOI);

- індексується в CrossRef, Google Scholar;

- індексується в міжнародній наукометричній базі [Index Copernicus Value](#) з 2018 року.

Головний редактор

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Заступник головного редактора

Веселовська Н.Р. – д.т.н., професор, Вінницький національний аграрний університет

Відповідальний секретар

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік НААН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Севостьянов І.В. – д.т.н., професор, Вінницький національний аграрний університет

Граняк В.Ф. – к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет

Спірін А.В. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Іванчук Я.В. – к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет

Твердохліб І.В. – д.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Іскович – Лотоцький Р.Д. – д.т.н., професор, Вінницький національний технічний університет

Цуркан О.В. – д.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Яронуд В.М. – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

Йордан Максимов – д.т.н., професор Технічного університету Габрово (Болгарія)

Відповідальний секретар редакції **Полєвода Ю.А.** – к.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет
Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний університет,
тел. (0432) 46–00–03

Сайт журналу: <http://tetapk.vsau.org/>

Електронна адреса: pophv@ukr.net



ЗМІСТ

I. АГРОІНЖЕНЕРІЯ

*Анісімов В.Ф., Єленич А.П.***КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНИХ ТРАКТОРІВ ІНОЗЕМНОГО СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА..... 5***Olena Trukhanska***INNOVATIVE APPROACHES AND METHODS OF INCREASING THE TECHNICAL LEVEL MACHINES AND UNITS..... 15***Солона О.В.***ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ..... 19***Serhiy Burlaka***DIESEL FUEL WAYS AND THEIR ELIMINATION METHODS..... 26**

II. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА. МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО. ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

*Веселовська Н.Р., Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А.***ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ДЕТАЛІ ПРИ ДЕФОРМАЦІЙНОМУ ПРОТЯГУВАННІ..... 31***Ємчик В.В., Полевода Ю.А., Ревва В.Ю.***ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНОЇ СХЕМИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРОБКИ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРІАЛУ ІНФРАЧЕРВОНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ..... 43***Ivan Sevostianov, Dina Tokarchuk, Andrii Didyk***CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF METHODS AND EQUIPMENT FOR DEHYDRATION OF DAMP DISPERSIVE MATERIALS..... 53***Купчук І.М., Гонтарук Я.В., Присяжнюк Ю.С.***ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ АВТОНОМІЇ ПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ АПК УКРАЇНИ ЗА РАХУНОК ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ 59***Матвійчук В.А., Савків В.В., Богатюк М.О.***РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ..... 74***Oleksii Tokarchuk, Viktor Yemchuk***PECULIARITIES OF TRANSPORTATION OF GRAIN PRODUCTS BY CONVEYOR SPIRALS..... 83***Стаднік М.І., Колісник М.А.***ДОПУСТИМИЙ РІВЕНЬ СПОЖИВАННЯ БІОГАЗУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ТВАРИНИЦЬКОЇ ФЕРМИ..... 90***Швець Л.В., Чмих К.В.***АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ГАРЯЧОГО ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛІВ..... 95***Яронуд В.М., Шаргородський С.А., Луц П.М., Лавренюк П.П.***СИМУЛЯЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ У КОНВЕКТИВНІЙ СУШАРЦІ..... 101**

III. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

*Возняк О.М., Штуць А.А., Тихонов В.К.***ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТА РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ..... 110***Граняк В.Ф., Ємчик В.В., Кожушко О.В.***МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА..... 122**



CONTENTS

I. AGROENGINEERING

*Victor Anisimov, Anatoliy Yelenych***DESIGN FEATURES OF MODERN FOREIGN AGRICULTURAL TRACTORS..... 5***Olena Trukhanska***INNOVATIVE APPROACHES AND METHODS OF INCREASING THE TECHNICAL LEVEL MACHINES AND UNITS..... 15***Olena Solona***APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN AGRICULTURAL PRODUCTION..... 19***Serhiy Burlaka***DIESEL FUEL WAYS AND THEIR ELIMINATION METHODS..... 26**

II. APPLIED MECHANICS. MATERIALS SCIENCE. INDUSTRY MACHINERY BUILDING

*Nataliia Veselovska, Yuriy Paladiychuk, Inna Telyatnuk***RESEARCH OF THE MICROHARDNESS OF THE SURFACE OF A CYLINDRICAL PART DURING DEFORMATION..... 31***Viktor Yemchyk, Yurii Polievoda, Viktor Revva***JUSTIFICATION OF THE DESIGN SCHEME OF THE INSTALLATION FOR PROCESSING GRANULAR MATERIAL WITH INFRARED RADIATION..... 43***Ivan Sevostianov, Dina Tokarchuk, Andrii Didyk***CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF METHODS AND EQUIPMENT FOR DEHYDRATION OF DAMP DISPERSIVE MATERIALS..... 53***Ihor Kupchuk, Yaroslav Gontaruk, Yurii Prysiazhniuk***PROSPECTS FOR INCREASING THE LEVEL OF ENERGY AUTONOMY OF PROCESSING ENTERPRISES OF AIC OF UKRAINE WITH THE HELP OF BIOGAS PRODUCTION..... 59***Viktor Matviychuk, Volodymyr Savkiv, Maxim Bogatiuk***DEVELOPMENT OF THE PROCESS OF STAMPING BY ROLLING OF TUBULAR PREPARATIONS USING INDUCTION HEATING..... 74***Oleksii Tokarchuk, Viktor Yemchyk***PECULIARITIES OF TRANSPORTATION OF GRAIN PRODUCTS BY CONVEYOR SPIRALS..... 83***Mykola Stadnik, Mykola Kolisnyk***PERMISSIBLE LEVEL OF BIOGAS CONSUMPTION IN THE PRODUCTION OF ELECTRICITY FOR A LIVESTOCK FARM..... 90***Ludmila Shvets, Kateryna Chmykh***ANALYTICAL RESEARCH METHODS OF HOT DEFORMATION OF METALS..... 95***Vitalii Yaropud, Serhiy Shargorodskiy, Pavlo Luts, Petro Lavreniuk***SIMULATION OF THE DRYING PROCESS OF WALNUTS IN A CONVECTION DRYER..... 101**

III. ELECTRICAL ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

*Oleksandr Voznyak, Andrii Shtuts, Volodymyr Tykhonov***RESEARCH OF STARTING MODES OF ASYNCHRONOUS MOTORS AND DEVELOPMENT OF A SOFT START DEVICE..... 110***Valerii Hraniak, Viktor Yemchyk, Olexander Kozhushko***MATHEMATICAL MODEL OF THE PRIMARY MEASURING CONVERTER OF HUMIDITY TRANSFORMER OIL..... 122**



УДК 621.77.01

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3-9

РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ

Матвійчук Віктор Андрійович, д.т.н., професор
Савків Володимир Володимирович, аспірант
Богатюк Максим Олегович, аспірант
Вінницький Національний Аграрний Університет

Viktor Matviychuk, Doctor of Technical Sciences, Full Professor
Volodymyr Savkiv, postgraduate student
Maxim Bogatiuk, postgraduate student
Vinnytsia National Agrarian University

Способи локального деформування металів тиском засновані на дії технологічного навантаження в умовах локалізованого пластичного осередку. Головна мета таких методів полягає в тому, що формозміна в кожен момент часу виконується тільки над частиною об'єму заготовки і при переміщенні осередку деформування охоплює увесь об'єм. Це добре вивчені і широко застосовувані у виробництві операції вільного кування, ротаційного кування, прокатування та ін.

Порівняно новий метод обробки металів тиском (ОМТ) – штампування обкочуванням (ШО), характеризується рядом позитивних ефектів:

- зниження зусилля деформування порівняно з традиційними методами в 5-30 разів;
- можливість обробки металу в холодному стані з тим же технологічним зусиллям, що і при гарячій обробці;
- устаткування відповідає високому рівню безпеки праці;
- зменшення розмірів, ваги і вартості обладнання;
- можливість реалізації різноманітних технологічних операцій.

Сучасне машинобудування, приладобудування та інші металообробні виробництва масово використовують і виготовляють деталі з великим співвідношенням розмірів перетину, виробництво яких існуючими методами обробки металів тиском або малоефективно, або неможливо.

Найбільш технологічними є процеси ШО, в яких заготовка має трубчасту або кільцеву форму. Такі заготовки добре піддаються індукційному нагріванню, яке при забезпеченні високої частоти електромагнітного поля дозволяє їх швидко і ефективно нагрівати. При цьому нагрівати можна обмежені об'єми заготовки. Таким чином, застосування в процесах ШО індукційного нагрівання значною мірою розширює їх технологічні можливості, що і обумовлює актуальність обраної теми.

До основних переваг індукційного нагрівання належать: передача електричної енергії не потребує контактних пристроїв, здійснюється безпосередньо в заготовку, що дозволяє підвищити швидкість нагрівання; завдяки можливості керування частотою струму максимальна потужність виділяється у обмеженому за товщиною приповерхневому шарі виробу, що особливо ефективно при нагріванні трубних заготовок; індукційне нагрівання дозволяє підвищити продуктивність і покращити умови праці.

Ключові слова: штампування обкочуванням, індукційне нагрівання, гаряча деформація, трубні заготовки, електромагніт.

Ф. 7. Рис. 9. Літ. 9.

1. Постановка проблеми

В сучасному машинобудуванні, приладобудуванні та інших виробництвах широко застосовують і виготовляють деталі з великим співвідношенням розмірів перетину. Виробництво таких деталей існуючими методами обробки металів тиском (ОМТ) малоефективне, а в деяких випадках – неможливе.

Для забезпечення високої ефективності виробництва у якості заготівельних операцій передбачається широке використання процесів ОМТ. Такий підхід дозволяє максимально наблизити форму і розміри заготовки до готової деталі, що робить виробництво маловідходним, а деталі такими,



що мають підвищені технічні характеристики. До особливо ефективних методів ОМТ відносяться процеси штампування обкочуванням (ШО) [1,2,3]. При цьому необхідний профіль заготовки можна отримати шляхом локального деформування із застосування обґрунтованих технологічних схем штампування конічними або циліндричними валками. Такий підхід дозволяє отримувати складно профільні заготовки з розвинутими елементами, в т.ч. і тонкостінними. Основні технологічні обмеження при цьому накладають механічні характеристики матеріалу заготовки – обмежена пластичність і високі характеристики міцності. Це може спричинити руйнування матеріалу заготовки або інструменту. Значною мірою вирішувати проблеми підвищення пластичності матеріалу заготовок і зниження характеристик міцності дозволяє їх нагрівання і реалізація гарячого деформування. При цьому проблемними постають питання вибору методів і режимів нагрівання та визначення технологічних можливостей процесів ОМТ.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нагрівання заготовок із сталей і сплавів часто проводять в електричних печах опору з екранованими нагрівальними елементами і примусовою циркуляцією повітря для інтенсивнішої передачі тепла на поверхню заготовок і забезпечення рівномірності температури робочого простору. Електричні печі є найбільш поширеною групою електротехнологічних установок для нагрівання твердих тіл, а також плавлення металів та сплавів.

Стосовно ефективності нагрівання заготовок в процесах ШО то слід відзначити, що на виробничому об'єднанні «Маяк», м. Вінниця, в електричній печі опору здійснювали нагрівання суцільних циліндричних заготовок із сталі 45 діаметром 20 мм, з наступною висадкою методом ШО циліндричних головок діаметром 40 мм. Технологічний процес виявився настільки ефективним, в першу чергу через економію металу і високу геометричну точність виробів, що лише для його реалізації спеціально було придбано унікальний обкочувальний верстат СО424. Нагрівання заготовок було обумовлене, головним чином, недостатньою пластичністю сталі 45.

Протягом останніх десятиліть суттєве місце серед ефективних методів нагрівання металевих заготовок у різних галузях промисловості посів індукційний нагрів [4,5]. Здебільшого він використовується для нагрівання феромагнітних матеріалів, таких як сталі [6], оскільки вони посилюють магнітне поле і таким чином викликають індукційний ефект вже на відносно низьких частотах.

Принцип індукційного нагрівання полягає у перетворенні енергії електромагнітного поля, що поглинається електропровідним матеріалом, в теплову енергію.

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 (у часі) потік магнітної індукції пронизує об'єкт нагрівання і індуктує електричне поле (рис. 1, 2). Вигляд заготовок, при нагріванні індукційним електричним полем, приведений на рис. 3.

В технологічних процесах ШО індукційне нагрівання стали використовувати при обкочуванні труб завдяки розробкам В. Г. Капоровича та ін. Процеси застосовувались для отримання заготовок шляхом формування днищ, пережимів, горловин [4].

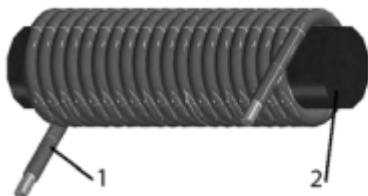


Рис. 1. Схема елементарного індуктора:
1 – обмотка; 2 – серцевина

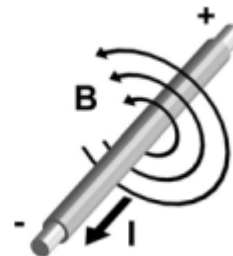


Рис. 2. Напрямок дії магнітного поля:
B – напрямки дії магнітної індукції; I – струм протікаючий через обмотку



Рис. 3. Вигляд заготовок при нагріванні індукційним електричним полем

За ступенем локалізації зони деформації процеси обкочування труб поділяються на три групи: з точковою дією ролика на заготовку; з лінійним контактом заготовки із фасонним інструментом; з поверхневою дією на заготовку спеціальної матриці. Найбільша продуктивність притаманна процесам з лінійним контактом заготовки з фасонним інструментом, які і отримали широке застосування в промисловості. Проте при їх застосуванні, внаслідок зносу інструмента, геометрична форма виробів перестає відповідати заданим параметрам, що вимагає частої переточки робочої поверхні інструменту. Розширення технологічних можливостей процесу обкочування труб йде шляхом управління температурними полями, що виникають в заготовці у процесі її нагрівання і деформування. Важливим при цьому є управління енергосиловими параметрами обкочування і геометрією виробів через параметри обладнання, інструменту і умов обкочування тощо.

Перспективним при обкочуванні труб є використання в якості інструменту ролика, але при цьому постає проблема управління механікою формозміни заготовки. Особливо ефективним інструментом управління механікою формозміни заготовки є розроблені в роботі [7] шляхи управління плином металу через зміну взаємного положення валка і заготовки. Слід відзначити, що процеси ШО дозволяють виготовляти різні складно профільні заготовки. При цьому необхідний профіль заготовки можна отримати шляхом застосування обґрунтованих технологічних схем із використанням конічних або циліндричних валків.

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є розробка перспективних схем процесу ШО, обґрунтування необхідності реалізації гарячого деформування з використанням індукційного нагріву і основних параметрів індуктора.

4. Виклад основного матеріалу

Для реалізації поставлених завдань нами був досліджений вплив основних параметрів процесу ШО на керування механікою формозміни заготовок [3, 7]. На основі цього були розроблені технологічні схеми з використанням в якості інструменту ролика.

При ШО трубних заготовок циліндричним валком напрям плинину матеріалу заготовки залежить переважно від величини та напрямку зміщення осі валка від осі поперечного перерізу заготовки, по відношенню до напрямку обертання заготовки [7]. При зміщенні валка у від'ємному напрямі ($\delta < 0$), як показано на рис. 4, спостерігається плин металу до центру заготовки, що сприяє формуванню днищ і горловин. Зі збільшенням величини зміщення δ збільшується кут φ між векторами швидкості точок контактної поверхні заготовки і валка та посилюється інтенсивність плинину металу у відповідному напрямі.

Кут між проекціями векторів швидкості точок циліндричного валка і заготовки на площину розкочування в місці контакту визначається співвідношенням

$$\varphi = \arctg \sqrt{\left(-\frac{\sqrt{R_g^2 - (h - R_g)^2} + \delta}{R} \right)}, \quad (1)$$

де R_g – радіус валка, h – глибина втискування валка, R – радіус заготовки.

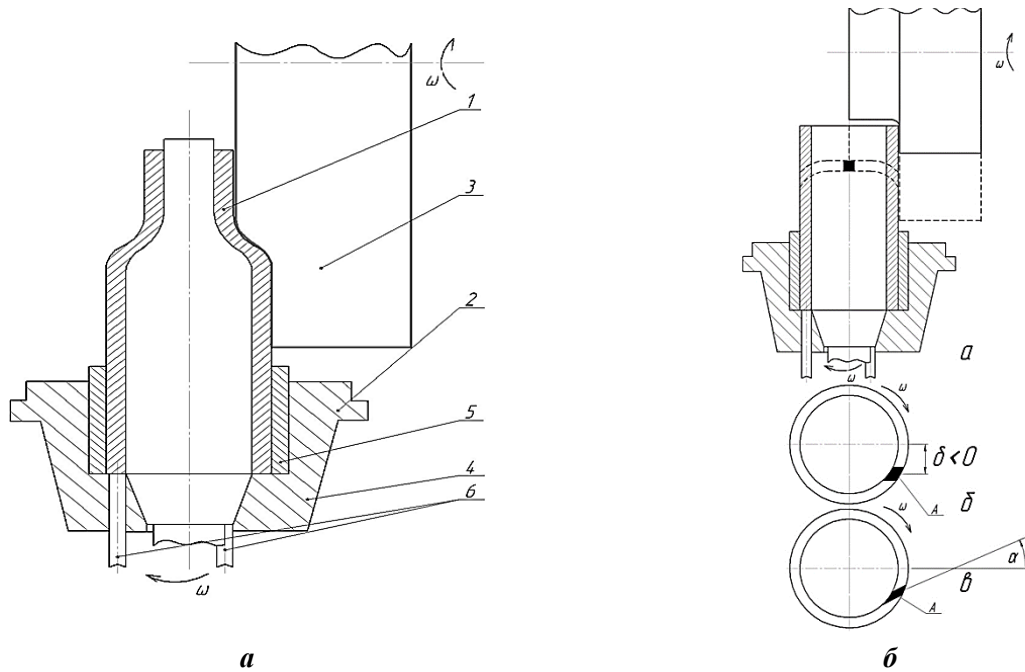


Рис. 4. Технологічні схеми обкочування труб циліндричним роликом: а) формування днища трубної заготовки; б) формування горловини трубної заготовки

Зміщення положення вісі валка по відношенню до вісі поперечного перерізу заготовки на величину $\delta > 0$, у напрямку протилежному плямі контакту, дає змогу управляти інтенсивністю течії металу від центру заготовки і реалізувати процес відбортування трубних заготовок. На рис. 5а показана трубна заготовка на проміжній стадії відбортування, а на рис. 5б – відбортована заготовка.

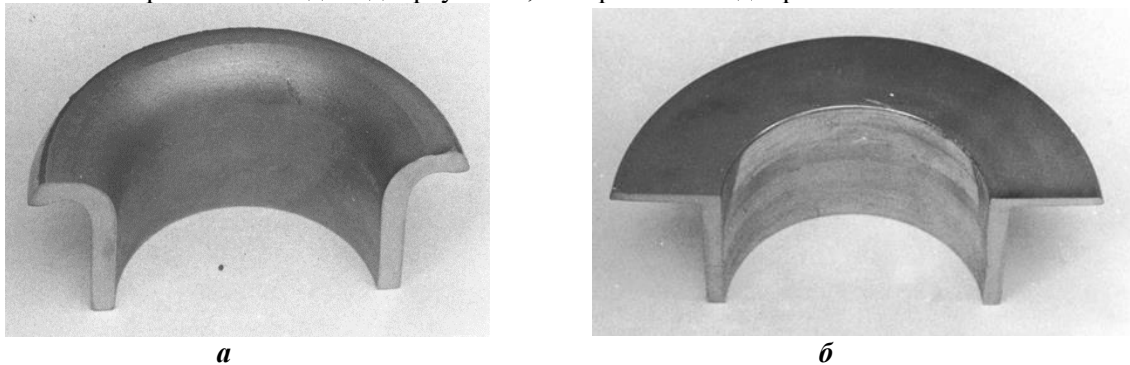


Рис. 5. Вигляд трубної заготовки, отриманої за схемою відбортування методом ШО: а – проміжна стадія; б – заключна стадія

Проте отримання таких заготовок холодним деформуванням обмежується, як правило, недостатньою пластичністю металів, що і обумовлює перехід на гаряче деформування з використанням індукційного нагрівання.

До основних переваг індукційного нагрівання належать: передача електричної енергії не потребує контактних пристроїв, здійснюється безпосередньо в заготовку, що дозволяє підвищити швидкість нагрівання; завдяки можливості керування частотою струму максимальна потужність виділяється у обмеженому за товщиною приповерхневому шарі виробу, що особливо ефективно при нагріванні трубних заготовок; індукційне нагрівання дозволяє підвищити продуктивність і покращити умови праці.

Однак вибір конкретної частоти залежить від геометрії заготовки та властивостей її матеріалу, оскільки як електропровідність, так і магнітна проникність можуть залежати від температури. За оптимізованих умов індукційним нагріванням можна керувати, щоб забезпечити точний поступовий нагрів з відносно низькими витратами. З іншого боку, невідповідні налаштування процесу нагрівання призводять до недостатнього та/або неоднорідного нагрівання заготовки та збільшують небезпеку виникнення неоднорідностей мікроструктури та дефектів всередині матеріалу (наприклад, 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.

При гарячій деформації одночасно протікають два конкуруючих процеси – накопичення пошкоджень і анігіляція мікродфектів в результаті рекристалізації. Тому пластичність при гарячому деформуванні суттєво залежить від швидкості деформації. Зі зменшенням швидкості деформації час на заліковування мікродфектів зростає і пластичність збільшується.

На рис. 6 приведені результати експериментів і криві відновлення пластичності, побудовані за допомогою чисельного розв'язання співвідношення [3]:

$$(\Delta\psi + 1 + \Delta_n)^n - (\Delta\psi + 1 + \Delta_n - \psi_1)^n + (\Delta\psi + 1 - \psi_1)^n - 1 = 0 \quad (2)$$

де $\psi_1 = (\varepsilon_u)_1 / \varepsilon_{pc}$ – запас граничної деформації, використаний на першому етапі розтягування;

$(\varepsilon_u)_1$ – величина рівномірної деформації, досягнутої на першому етапі розтягування;

ε_{pc} – величина найбільшої рівномірної деформації, досягнутої при даному стаціонарному розтягуванні;

$\Delta\psi = 1 - \psi_1 - \psi_{*2}$ – відновлений в паузі ресурс пластичності, $\psi_{*2} = (\varepsilon_u)_2 / \varepsilon_{pc}$;

t_n – тривалість паузи, $\Delta_n = t_n / t_{pc}$ – відносна тривалість паузи;

t_{pc} – час деформування при гарячому стаціонарному розтягуванні до досягнення найбільшої рівномірної деформації.

Параметр n ($0 < n \leq 1$) для різних матеріалів і температур випробувань визначали за експериментальними даними розв'язанням рівняння (2).

Тривалість пауз в експериментах була не однаковою при різних температурах. Наприклад, при $T = 900^\circ\text{C}$ вона становила $t_n = 20$ с. Із приведених графіків видно, що найбільш інтенсивне відновлення пластичності відбувається в перші 2,5 с. Так, для сплаву ВТ9 при $T = 950^\circ\text{C}$ за перші 2,5 с відновлюється 80% пластичності. Подальше двадцятикратне збільшення тривалості паузи приводить до зменшення пошкодженості ще на 20%.

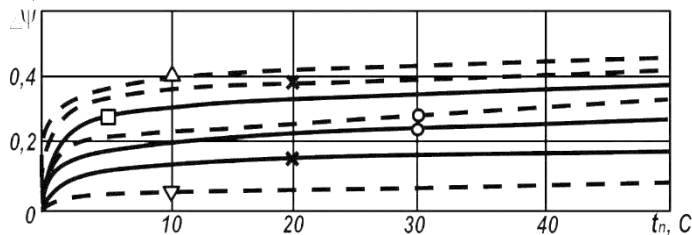


Рис. 6. Характер відновлення пластичності сплаву ВТ9 (---) і сталі 13Х11Н2В2МФ-Ш (—) в паузах при гарячому деформуванні: ○, ×, △, ▽, □ - T = 850, 900, 950, 1000, 1100°C

Результати моделювання дозволяють надати пояснення, на перший погляд протилежним висновкам, що приведені в літературі. Зокрема в роботах відзначається, що зі зменшенням швидкості деформації пластичність титанових сплавів підвищується. Про це свідчить і характер кривих, приведених на рис. 7 [3]. Причому в інтервалі 850-950°C, з підвищенням температури посилюється залежність пластичності від швидкості ($\dot{\varepsilon}_u < 2\text{c}^{-1}$).

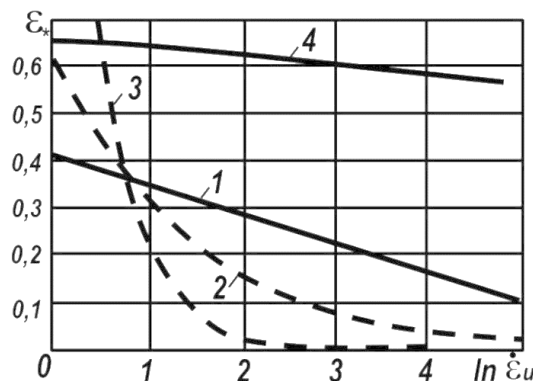


Рис. 7. Залежність граничної деформації ε_* сплаву ВТ9 (---) і сталі 13Х11Н2В2МФ-Ш (—) від швидкості деформації $\dot{\varepsilon}_u$: 1 – T = 850°C; 2 – T = 900°C; 3 – T = 950°C; 4 – T = 1000°C



Відомі випадки підвищення пластичності зі зростанням швидкості деформації, що пояснюється додатковим деформаційним розігріванням. Відповідно отриманим даним, у випадку $\dot{\epsilon}_u = 2c^{-1}$ пластичність сплаву ВТ9 при $T = 950^\circ\text{C}$ менше, ніж при $T = 1000^\circ\text{C}$. Зі зростанням швидкості деформації ($\dot{\epsilon}_u > 2c^{-1}$) пластичність в області $T = 950^\circ\text{C}$ зменшується, але внаслідок деформаційного розігрівання на $10\text{-}40^\circ\text{C}$ гранична деформація зростає.

Проектування процесів індукційного нагрівання в промисловості повинно здійснюватися з урахуванням технологічних, а також металургійних точок зору, особливо для матеріалів, що готуються за специфічними технологічними процедурами, наприклад, за допомогою порошкової металургії. Такі специфічні матеріали слід обробляти з найвищою обережністю, оскільки непотрібне збільшення часу нагріву може вплинути на їх структуру, а також спровокувати окислення поверхні. Окислення заготовок під час нагрівання, якого важко уникнути в промислових умовах, взагалі важлива проблема. Збільшення часу нагріву істотно впливає не лише на конструкції, але і на рівень окислення поверхні заготовок. На рівень поверхневого окислення можна більшою чи меншою мірою вплинути через модифікацію атмосфери печі або використання захисних покриттів під час нагрівання в звичайних печах, можливі зміни структури зазвичай складні і їх контроль також складний (наприклад, зерна зростають експоненціально зі збільшенням часу нагрівання). Таким чином, застосування швидкого індукційного нагрівання є дуже сприятливим не лише для складних матеріалів.

Загальний принцип індукційного нагрівання показаний на рис. 8.

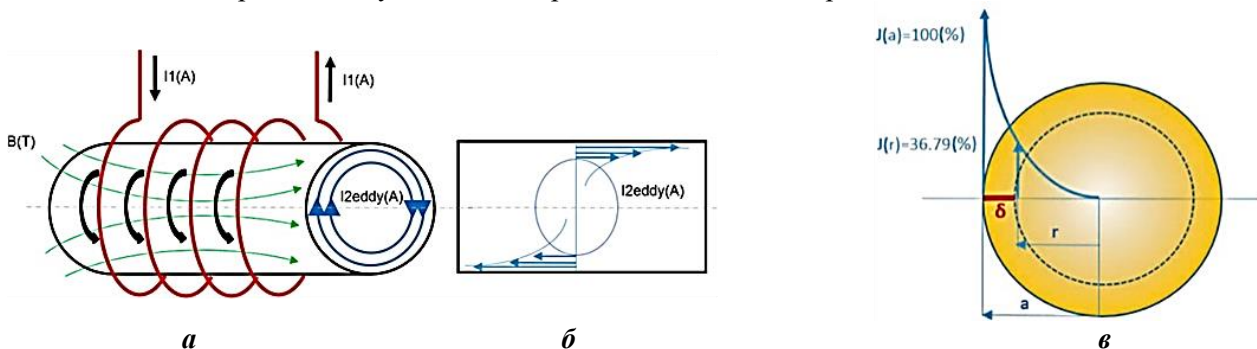


Рис. 8. Загальний принцип індукційного нагріву: схематичне зображення котушки та нагрітої заготовки (а); детальне зображення вихрових струмів (б); графічне зображення скін-ефекту (в).

Основний принцип індукційного нагрівання полягає у впливі на нагріву заготовку швидкозмінним магнітним полем, яке зазвичай створюється котушкою індуктивності (зображеною червоним кольором на рис. 1), що оточує нагріву заготовку. Через котушку подається змінний електричний струм I (який, як правило, генерується перетворювачем частоти) необхідної амплітуди та частоти, зображений чорним кольором на рис. 2. Потім процес нагрівання реалізується за принципом індукції: швидкозмінне магнітне поле в заготовці створює індуквану напругу всередині заготовки. Іншими словами, індукційне поле, змінне в часі, індукує локальну електромагнітну силу, що призводить до генерації напруги. Ця індуквана напруга, охоплена площиною перерізу заготовки, генерує коротке замикання, негайно генеруючи вихровий струм.

Глибина проникнення магнітного потоку (вихрового струму) в метал, а отже і товщина h , м, шару нагрівання приблизно визначається за формулою Штейнметца:

$$h = 503 \sqrt{\frac{\rho_m}{\mu f}}, \quad (3)$$

де μ – відносна магнітна проникність матеріалу тіла нагрівання.

Згідно із (3) при високих частотах струму (до 1 000 Гц і вище) можна отримати тонкий нагрітий шар, наприклад, для поверхневої термічної обробки виробу. При низьких частотах (наприклад, 50 Гц) можна забезпечити наскрізне нагрівання виробу.

Вихровий струм в кінцевому підсумку призводить до нагрівання заготовки за принципом нагріву Джоуля, тобто вихрові струми посилюються розвиненим коротким замиканням. Як правило, розподіл індукваного вихрового струму нерівномірний по всьому поперечному перерізу нагрітої заготовки; його інтенсивність є найвищою в області поверхні заготовки і швидко зменшується до її осової зони. Це явище характеризується як скін-ефект, який визначається глибиною проникнення δ (м), вираженою за допомогою рівняння (4),



$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi * f * \sigma * \mu}} \quad (4)$$

де f – робоча частота електромагнітного поля (Гц); σ – електропровідність ($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$); μ – магнітна проникність ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$).

Іншими словами, рівняння (4) визначає густину струму під поверхнею заготовки, яка дорівнює 36,79% від значення густини струму на поверхні. Це значення є граничним значенням товщини провідного шару; нижче цієї межі (тобто далі до осі заготовки) вплив густини струму значно зменшується. Із рівняння (4) також видно, що взаємні відношення індивідуальних параметрів є основними факторами, що впливають на процес індукційного нагрівання. Параметрами, які можна змінювати, відповідно до рівняння (4), є, наприклад, глибина проникнення на заданій частоті або конкретний розподіл температури по всьому поперечному перерізу заготовки.

Нагрівання трубчатих заготовок і кілець здійснюється зазвичай в циліндричних індукторах струмом високої частоти. При виборі частоти струму для нагріву труб і кілець необхідно дотримуватися таких двох умов:

$$f \geq \frac{30000}{d^2} \quad (5)$$

$$0.35 \Delta_{\text{гар}} < a < 2 \Delta_{\text{гар}} \quad (6)$$

де d – зовнішній діаметр труби, см; a – товщина його стінки, см; $\Delta_{\text{гар}}$ – глибина проникнення струму в гарячий метал.

$$\frac{10^6}{h_A^2} < f_{\text{гл}} < \frac{4 \cdot 10^7}{h_A^2} \quad (7)$$

Графіки розподілу температури: а) при глибинному; б) поверхневому нагріванні показані на рис. 9.

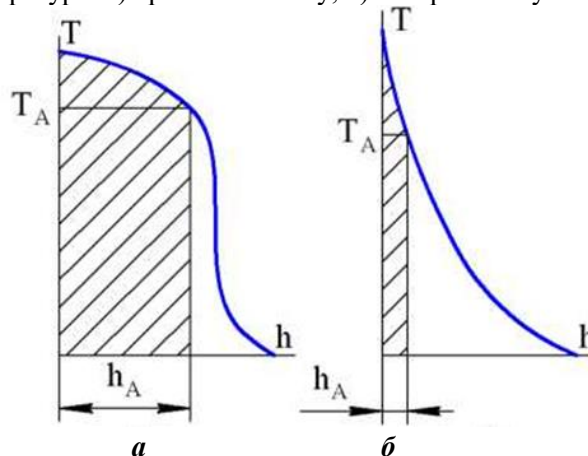
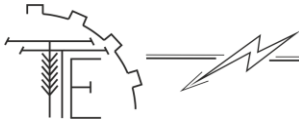


Рис.9. Графіки розподілу температури: а – при глибинному; б – поверхневому нагріванні

Розподіл температури в заготовці і швидкість нагріву при індукційному нагріванні визначається в основному матеріалом заготовки, конструкцією котушки, потужністю змінного струму та іншими електричними параметрами. Індукційний нагрів металевих листів досліджувався різними науково-дослідними установами та промисловими компаніями. Форма поперечного перерізу індукційної котушки є дуже важливим фактором, що впливає на продуктивність нагрівання. Це потрібно уважно враховувати під час проектування процесу індукційного нагріву. Завдяки електричному опору матеріалу котушки тепло утворюється, коли через котушку проходить великий електричний струм. Якщо охолодження не передбачене, температура в котушці буде постійно зростати. Циркуляційне водяне охолодження зазвичай використовується для передачі генерованого тепла, щоб знизити температуру в котушці.

При подачі змінного струму на циліндричний провідник найбільша густина струму спостерігається на внутрішній стороні провідника. Це явище слід враховувати при виборі відповідної форми поперечного перерізу для індукційної котушки. Для індукційного нагрівання циліндричної поверхні перевагою цього явища можна скористатися вибором конструкції циліндричної котушки. Тоді як для індукційного нагрівання металевих листів котушка прямокутного перерізу може бути розміщена ближче до зразка і генерувати більш рівномірний вихровий струм і нагрівання.

Для індукційного нагріву заготовок в даному дослідженні була обрана індукційна котушка з порожнистим прямокутним перерізом. Як показано на рис. 1, довжина L , висота H і товщина стінки T є



трьома ключовими параметрами для конструкції котушки. Холодна вода проходить через канал всередині змійовика для охолодження. Розмір каналу впливає на швидкість потоку охолоджуючої води.

5. Висновки

В роботі проведено розробку і дослідження перспективних схем процесу ШО та вплив основних параметрів процесу штампування обкочуванням на керування механікою формозміни заготовок із використанням індукційного нагрівання.

Застосування в процесах ШО індукційного нагрівання значною мірою обумовлює актуальність подальшого дослідження методу індукційного нагрівання при ШО. Це дозволить розширити технологічні можливості процесів штампування обкочуванням шляхом розробки і використання індукційного нагрівання заготовок, через збільшення характеристик пластичності і зменшення характеристик міцності металів в процесі деформування.

Для застосування на практиці індукційного нагрівання заготовок у виробництві гарячого штампування особливу увагу слід приділити вибору конструкції котушки, способу нагріву, геометрії заготовки, руху заготовки та контролю потужності. Тільки при оптимальному поєднанні цих факторів і нагріванні з бажаною швидкістю до прийнятних температур та їх розподілу можливо забезпечити процес високоякісного гарячого штампування.

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. Гожій С. П. Засади і проблеми використання ресурсозберігаючих технологій обробки металів тиском. *Технологические системы*. 2006. №2 (34). С. 64–68.
3. Матвійчук В. А., Алиев И. С. "Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов». Краматорск: ДГМА. Монография. 2009.
4. Капорович В. Г. Производство деталей из труб обкаткой. *Машиностроение*. 1978. С. 134.
5. Пиц Я. Е. Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. *Тематич. зб. наук. пр. Краматорськ*. 2002. С. 290–292.
6. Сергеев В. В., Иванов А. И., Литвинский Я. И. Разработка конструкции и освоение технологии производства особо легких автомобильных баллонов способом закатки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2001. №6. С. 50–52.
7. 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
8. Кулик А. Н., Середа В. Г., Баленков А. Е. Имитационное моделирование и повышение точности геометрических характеристик горловин относительно малого диаметра, получаемых ротационной обкаткой. *Межвуз. темат. сб. научн. трудов. Краматорск*. 1998. С. 322–327.
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.

References

- [1] Gozhiy, S.P., Wrong, L.T. (2006). Stamping by rolling as a means of resource conservation. *Scientific news of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, 2 (46). 55–60. [in Ukrainian].
- [2] Gozhiy, S.P. (2006). Principles and problems of using resource-saving technologies of metal pressure processing. *Technological systems*, 2 (34). 64–68. [in Ukrainian].
- [3] 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. [in Ukrainian].
- [4] Kaporovich, V.G. (1978). *Production of parts from running-in pipes*. Mechanical Engineering. [in Ukrainian].
- [5] 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. [in Ukrainian].
- [6] Sergeev, V.V., Ivanov, A.I., Litvinsky, Ya.I., etc. (2001). Development of a design and development of technology of production of especially easy automobile cylinders by a method of seaming. *Metallurgical and mining industry*, 6. 50–52. [in Ukrainian].
- [7] Kraevsky, V.O., Matviychuk, V.A., Mikhalevich, V.M. (2003). Influence of technological parameters on the kinematics of cold end rolling. *Udoskonalennia protsesiv ta obladnannia obrobky tyskom v mashynobuduvanni i metalurhii*. 286–291. [in Ukrainian].



- [8] Kulik, A.N., Sereda, A.N., Balenkov, A.E. (1998). Simulation modeling and improving the accuracy of geometric characteristics of relatively small diameter necks obtained by rotary running-in. *Interuniversity. topic. Sat scientific of works.* 322–327. [in Ukrainian].
- [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. [in Ukrainian].

DEVELOPMENT OF THE PROCESS OF STAMPING BY ROLLING OF TUBULAR PREPARATIONS USING INDUCTION HEATING

Methods of pressure treatment of metals based on the action of technological load in the conditions of a localized plastic cell. The main purpose of such methods is that the change in shape at any time is performed only on a fraction of the volume of the workpiece and when moving the deformation center covers the entire volume. These are well-studied and widely used in the production of free forging, rotary forging, rolling, etc.

A relatively new method of MP - stamping by rolling, is characterized by a number of positive effects:

- *reduction of deformation force in comparison with traditional methods in 5-30 times;*
- *the possibility of processing metal in the cold state with the same technological effort as in hot processing;*
- *the equipment corresponds to a high level of labor safety;*
- *reducing the size, weight and cost of equipment;*
- *the possibility of implementing various technological operations.*

Modern mechanical engineering, instrument making and other metalworking industries widely use and manufacture parts with a large ratio of cross-sectional dimensions, the production of which by existing methods of metal forming is either inefficient or impossible.

The most technological are the processes of SHO, in which the workpiece has a tubular or annular shape. Such blanks are well amenable to induction heating, which while providing a high frequency electromagnetic field allows them to be heated quickly and efficiently. This can heat a limited amount of workpiece material. Thus, the use of induction heating in the processes of SHO significantly expands their technological capabilities, which determines the relevance of the chosen topic.

The main advantages of induction heating include: transmission of electrical energy does not require contact devices, is carried out directly into the workpiece, which increases the heating rate; due to the possibility of controlling the frequency of the current, the maximum power is released in the limited thickness of the surface layer of the product, which is especially effective when heating the pipe blanks; induction heating can increase productivity and improve working conditions.

Key words: *rolling stamping, induction heating, hot deformation, pipe blanks, electromagnet.*

F. 7. Fig. 9. Ref. 9.

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, <https://orcid.org/0000-0002-2502-6878>).

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, <https://orcid.org/0000-0002-3733-3963>).

Богатюк Максим Олегович – аспірант, кафедри «Загальнотехнічних дисциплін та охорони праці» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: bogatyuk1998@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2318-3781>).

Viktor Matviychuk – 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, <https://orcid.org/0000-0002-2502-6878>).

Volodymyr Savkiv – postgraduate student of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics (3 Solnechnaya St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: vovasavkiv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3733-3963>).

Maksym Bohatiuk – postgraduate student of the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection (3 Solnechnaya St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: bogatyuk1998@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2318-3781>).