

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1

# Вібрації в техніці та технологіях



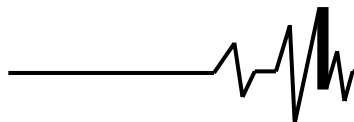
**Всеукраїнський науково-технічний журнал**

**Ukrainian Scientific & Technical Journal**

# **Вібрації в техніці та технологіях**

**№ 1 (104)**

**Вінниця 2022**

**ВІБРАЦІЇ В  
ТЕХНІЦІ ТА  
ТЕХНОЛОГІЯХ**

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

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та  
технологіях”

*Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової  
інформації*

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

*Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та  
технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця,  
2022. – 1 (104) – 137 с.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного  
університету (протокол № 10 від 29.04.2022 р.)*

*Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань  
України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки  
України від 02.07.2020 р. № 886)*

**Головний редактор**

**Калетнік Г.М.** – д.е.н., професор,  
академік НААН України, Вінницький  
національний аграрний університет

**Заступник головного  
редактора**

**Адамчук В.В.** – д.т.н., професор, академік  
НААН України, Національний науковий  
центр “Інститут механізації та електрифікації  
сільського господарства”

**Відповідальний секретар**

**Солона О.В.** – 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

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

**Деревенько І. А.** – к.т.н., доцент,  
Національний університет «Львівська  
політехніка»

**Зіньковський А.П.** – д.т.н., професор,  
Інститут проблем міцності імені Г. С.  
Писаренка НАН України

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

**Матвєєв В.В.** – д.ф.-м.н., професор,  
академік НАН, Інститут проблем міцності  
імені Г.С. Писаренка НАН України

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

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

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

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

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

**Зарубіжні члени редакційної колегії**

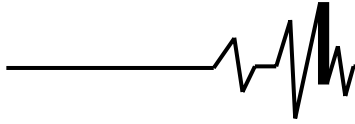
**Максімов Джордан Тодоров** – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний  
університет, тел. 46 – 00– 03

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

Електронна адреса: [vibration.vin@ukr.net](mailto:vibration.vin@ukr.net)

**З М І С Т****1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН**

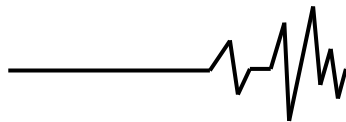
<i>Sevostianov I., Ivanchuk Ya.</i> ELABORATION AND RESEARCHES OF A VIBRO-PRESS FOR DEHYDRATION OF DAMP DISPERSIVE MATERIALS.....	5
<i>Цуркан О. В.</i> ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ НАСІННЯ ГАРБУЗА У ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ.....	12
<i>Граняк В. Ф., Солоня О. В.</i> ПЕРСПЕКТИВИ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ОБЕРТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЇХ ВІБРОСИГНАЛІВ.....	20
<i>Омельянов О. М., Токарчук О. А.</i> ОБҐРУНТУВАННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕПАРАТОРА З ВІБРАЦІЙНИМ ПРИВОДОМ ЗБУДЖЕННЯ ПРОСТОРОВИХ КОЛИВАНЬ.....	30
<i>Мельник В. М., Косова В. П., Остапенко Ж. І., Швиденко В. В.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ НА М'ЯСНУ СИРОВИНУ.....	38
<i>Ярошенко Л.В., Чубик Р.В.</i> ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІБРОПРИВОДОМ АДАПТИВНИХ ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН.....	44

**2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА**

<i>Sevostianov I., Melnyk O.</i> ELABORATION AND RESEARCHES OF APPARATUS OF CONTROL FOR HYDROPONIC INSTALLATIONS.....	57
<i>Бовсуновський А. П., Носаль О. М.</i> МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ТРІЩИНИ ВТОМИ ПРИ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАННЯХ ВАЛУ ТУРБІНИ.....	63
<i>Веселовська Н. Р.</i> РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИПРОБУВАЛЬНО-ДІАГНОСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВЕРСТАТІВ З ЧПК.....	71
<i>Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Колісник М. А.</i> ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПРИ ПРЯМОМУ І ЗВОРОТНОМУ ВИТИСКУВАННІ МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ.....	81
<i>Сивак Р. І., Островський А. Й., Залізняк Р. О.</i> ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНОЇ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ В УМОВАХ ОСЬОВОЇ СИМЕТРІЇ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ.....	92
<i>Яропуд В. М., Грицун А. В., Мазур І. М.</i> ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ОБРОБКИ РІДКОГО ГНОЮ НА СВИНОФЕРМАХ.....	98
<i>Trukhanska O.</i> RESEARCH OF THE WORKING PROCESS OF THE CLEANING SYSTEM OF MACHINES FOR HARVESTING ROOT CROPS.....	106

**3. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА**

<i>Присяжнюк Д. В.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІБРООЗОНУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ.....	117
<i>Полевода Ю. А., Соломон А. М., Бондар М. М.</i> МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СИРНОГО ПРОДУКТУ.....	124
<i>Шибецький В. Ю., Остапенко Ж. І., Фесенко В. В.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ У ВІНОСНИХ ТЕПЛООБМІННИХ ЕЛЕМЕНТАХ ЕКСТРАКТОРІВ.....	132

**Матвійчук В.А.**

д.т.н., професор

**Михалевич В.М.**

д.т.н., професор

**Колісник М.А.**

асистент

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

Dr. Sc. of Eng., Professor

**Mikhalevich V.**

Dr. Sc. of Eng., Professor

**Kolisnyk M.**

Assistant

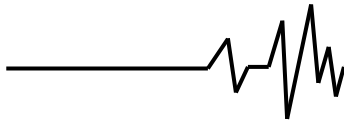
*Vinnitsia National Agrarian  
University***УДК 621.77.01****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-10****ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ  
МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПРИ  
ПРЯМОМУ І ЗВОРОТНОМУ  
ВИТИСКУВАННІ МЕТОДОМ  
ШТАМПУВАННЯ  
ОБКочУВАННЯМ**

В статті приведені результати розробки і дослідження різних технологічних схем процесу штампування обкочуванням циліндричним і конічним валками для отримання складно профільних заготовок. Показано, що досягнення значних розмірів різних елементів заготовки можливе за рахунок забезпечення направленої плинності металу шляхом зміни взаємного положення валка і заготовки. Найбільш ефективними операціями штампування обкочуванням є висаджування, осаджування, відбуртування, зворотне та пряме витискування. В роботі основна увага приділена аналізу операцій зворотного та прямого витискування для отримання складно профільних заготовок з розвинутими, в т.ч. тонкостінними, елементами. Оскільки технологічні можливості при цьому залежать від деформовності матеріалу, то був проведений аналіз напружено-деформованого стану заготовок з використанням методу сіток, вимірювання твердості та мікроструктурного аналізу. Головним результатом аналізу стала побудова шляхів деформування часток матеріалу заготовок в координатах «інтенсивність деформації – показник напруженого стану». Встановлені зони заготовок, які деформуються в умовах «жорсткого» напруженого стану, тому саме для цих зон проведена оцінка деформовності металів з використанням критеріїв феноменологічної теорії. Крім того, оцінку деформовності проводили також для зон з максимальним ступенем деформації матеріалу. Виготовлення тонкостінних елементів заготовки, з використанням операції зворотного витискування, супроводжується появою значних контактних напружень. Для запобігання відтискуванню валка від заготовки і формування елементів з постійною товщиною слід передбачати ролики підпору. У випадку прямого витискування підвищення контактних напружень вимагає застосування додаткових заходів для підвищення міцності інструменту.

**Ключові слова:** складно профільна заготовка, штампування обкочуванням, циліндричний і конічний валки, пряме і зворотне витискування, напружено-деформований стан, деформовність.

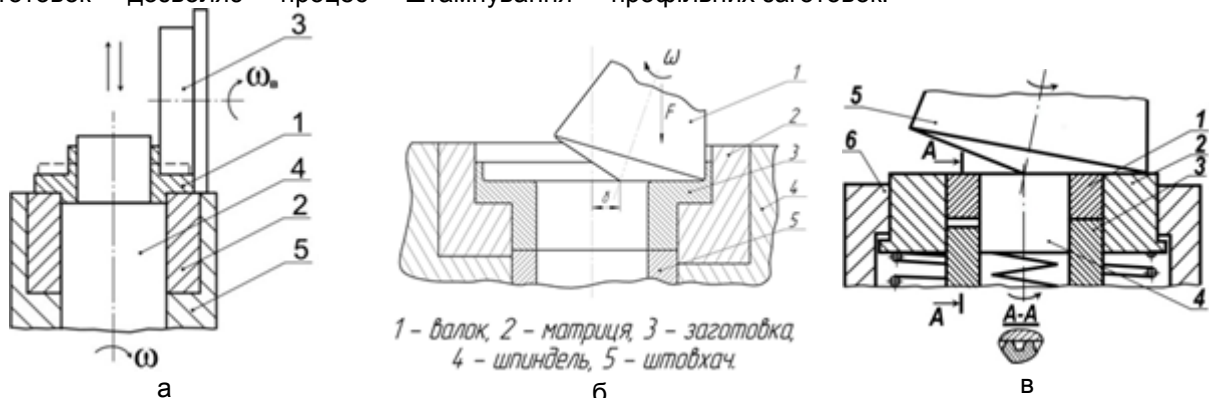
**Вступ** Сучасна металообробка передбачає забезпечення високої ефективності виробництва, що досягається широким використанням якості заготівельних операцій

процесів обробки металів тиском (ОМТ). В результаті максимального наближення форми і розмірів заготовки до готової деталі виробництво стає маловідходним, при цьому



формується виробу із підвищеними технічними характеристиками. Високі службові властивості деталей забезпечуються формуванням сприятливої структури і текстури матеріалу, підвищенням твердості і характеристик міцності, створенням в поверхневому шарі сприятливих залишкових напружень стиску тощо. Внаслідок цього у виробів підвищується витривалість, вакуумна щільність, електролітична і корозійна стійкість, міцність та інші характеристики [2]. Особливо суттєвий ефект досягається при виготовленні методами ОМТ складно профільних заготовок з розвинутими тонкостінними елементами. Труднощі, при застосуванні таких методів, пов'язані із можливістю отримання заготовок необхідної форми через складність управління механікою формозміни при використанні того чи іншого інструменту (оснащення). У разі вирішення відзначеної проблеми виникає можливість виготовлення заготовок із досягненням значних деформацій. А це, в свою чергу, обумовлює небезпеку руйнування матеріалу заготовок, в силу його недостатньої деформовності, та небезпеку руйнування інструменту, внаслідок його недостатньої міцності при значних контактних напруженнях [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значною мірою вирішувати проблеми виготовлення складно профільних заготовок дозволяє процес штампування



**Рис. 1. Схеми штампування обкочуванням кільцевої заготовки циліндричним і конічним валками**

Схема на рис. 1,а дозволяє здійснювати комбіноване деформування, яке полягає у зворотному витискуванні вертикального тонкостінного елемента, прямому витискуванню вертикального нижнього елемента та висаджуванні фланця. Інтенсивність течії металу у тому чи іншому напрямі залежить від положення плями контакту валка із заготовкою по відношенню до меридіонального перерізу заготовки [4].

Схема на рис. 1,б забезпечує висаджування фланця та зворотне

обкочуванням (ШО) [1]. При цьому необхідний профіль заготовки можна отримати шляхом застосування обґрунтованих технологічних схем із використанням конічних або циліндричних валків. Особливо ефективним інструментом управління механікою формозміни заготовки є розроблені в роботі [4] шляхи управління плином металу через зміну взаємного положення валка і заготовки. Разом з тим, плин металу в процесах прямого і зворотного витискування методом ШО є ще не достатньо вивченим. Крім того, невирішеною залишається також проблема оцінки деформовності матеріалу заготовок в процесах прямого і зворотного витискування методом ШО.

#### **Мета та завдання дослідження.**

Метою даної роботи є розробка і реалізація схем прямого і зворотного витискування методом ШО і оцінка деформовності матеріалу складно профільних заготовок для запобігання браку від руйнування та забезпечення високих службових характеристик виробів.

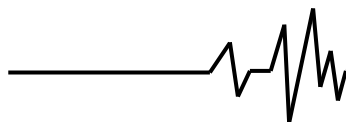
#### **Результати досліджень.**

Для реалізації поставлених завдань нами був досліджений напружено-деформований стан (НДС) матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом ШО [4, 5].

На рис. 1 показані технологічні схеми, з використанням яких нами досліджувалася можливість формувати елементи складно профільних заготовок.

Витискування тонкостінного елемента і реалізується при зміщенні вершини валка у напрямку зони деформації (див рис. 1,б). При зміщенні вершини валка за вісь заготовки, по відношенню до зони деформації ( ), можна забезпечити течію матеріалу фланця всередину заготовки.

Реалізація обкочування за схемою на рис. 1,в забезпечує операцію осаджування заготовки та прямого витискування або калібрування зі сторони, протилежної валку.



В роботі проведено дослідження можливості використання відзначених технологічних схем для формування складно

профільних заготовок. На рис. 2 показані заготовки, що виготовлені за відповідними схемами рис. 1.

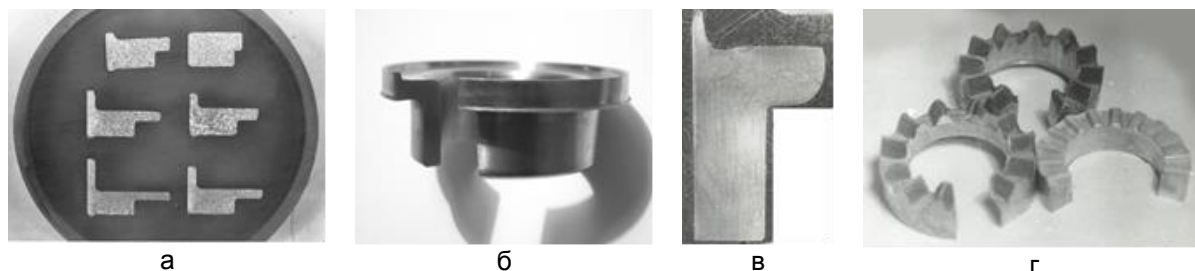


Рис. 2. Загальний вигляд і перерізи заготовок, сформованих методами ШО за схемами прямого і зворотного витискування: а) перерізи заготовок із міді М06, деформованих до різних ступенів за схемою 1,а; б) заготовка із сталі 14Х17Н2, сформована за схемою 1,б; в) переріз заготовки із сталі 30ХГСА, деформованої за схемою аналогічною 1,б, але з формуванням внутрішнього бурта; г) заготовки із міді М06, деформовані до різних ступенів за схемою 1,в

Операція пряме витискування методом ШО була реалізована нами для виготовлення зубчасті муфти, технологічна схема якої представлена на рис. 1,в, а вигляд муфти на різних стадіях формування – на рис. 2,г. В якості матеріалу заготовки була використана мідь М06.

Для оцінки технологічних можливостей даних технологічних схем ШО були побудовані для міді М06 градувальний графік в координатах

«інтенсивність деформацій ( $\varepsilon_i$ ) – твердість (HV) – інтенсивність напружень ( $\sigma_i$ )» рис. 3 і крива граничних деформацій рис. 4. Тут  $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$  - показник напруженого стану,  $I_1(T_\sigma)$  і  $I_2(D_\sigma)$  - перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень.

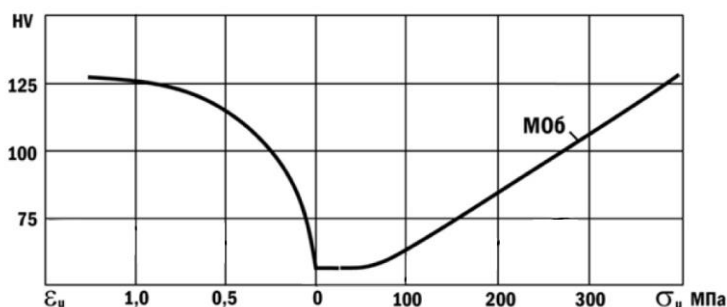


Рис. 3. Градувальний графік міді М06

Використання мідних заготовок обґрунтовано можливістю достатньо точно визначати до значних ступенів деформації за результатами вимірювання твердості HV не лише інтенсивність напружень ( $\sigma_i$ ), але і інтенсивність деформацій ( $\varepsilon_i$ ).

Аналіз НДС матеріалу муфт проводили із використанням методу сіток, вимірювання твердості та мікроструктурного аналізу.

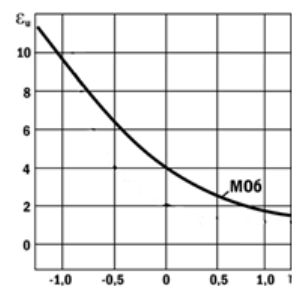
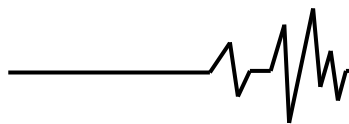


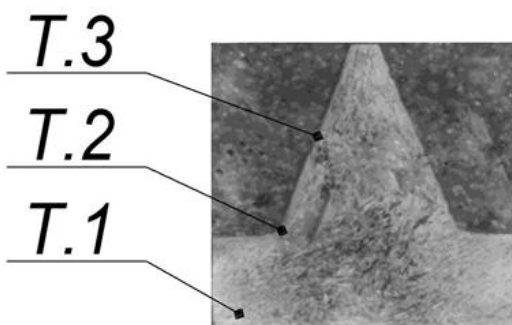
Рис. 4. Крива граничних деформацій М06

На рис. 5 приведено вигляд zdeформованої ділильної сітки і мікроструктури сформованого елемента кулачкової муфти

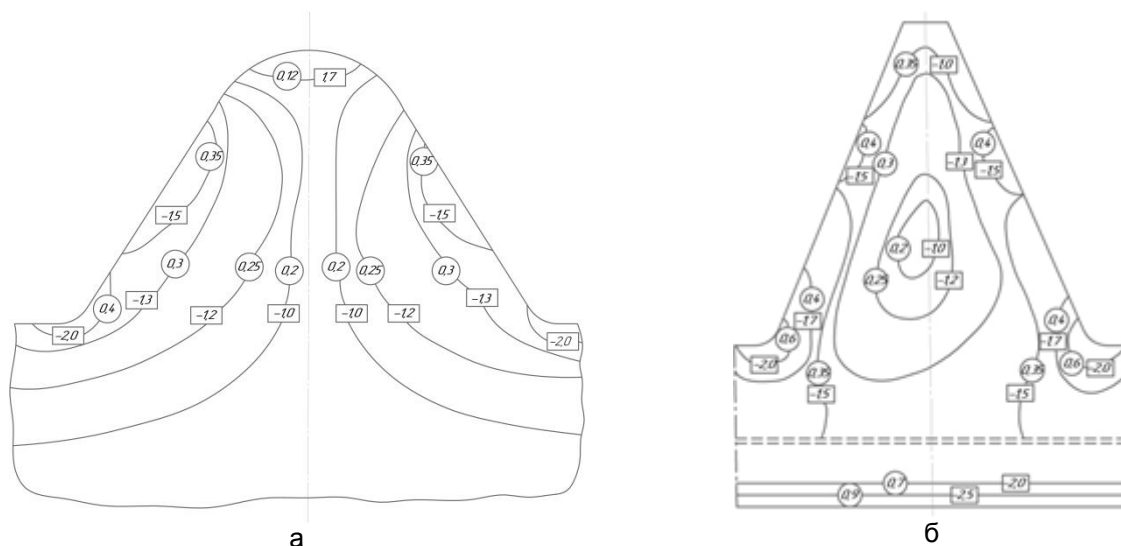
На рис. 6 приведений характер розподілу інтенсивності деформацій  $\varepsilon_i$  і показника напруженого стану  $\eta$  по елементу заготовки, отриманому витискуванням методом ШО на проміжній а) і заключній б) стадіях.



а



б

**Рис. 5.** Вигляд zdeформованої ділильної сітки і мікроструктури елемента кулачкової муфти

а

б

**Рис. 6.** Характер розподілу параметрів НДС по елементу заготовки, отриманому витискуванням методом ШО на проміжній а) і заключній б) стадіях:  $\eta = const$  ( $\square$ ) і ( $\square$ )

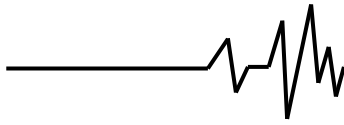
Дослідження НДС матеріалу заготовки методом вимірювання твердості проводили за методикою, приведеною в роботі [6]. Розподіл інтенсивності деформацій в зоні витиснутого елемента (див. рис. 6), отриманий методом вимірювання твердості, свідчить про досить нерівномірний характер zdeформованого стану в перерізі заготовки. Найбільша інтенсивність деформацій, яка спостерігається в зоні контакту валка із заготовкою, сягає значень  $\varepsilon_i = 0,9-1,0$  та може їх перевищувати. Наступною, найбільш zdeформованою, є зона входу металу в формоутворюючий канал. Тут інтенсивність деформацій сягає значень  $\varepsilon_i = 0,6-0,7$ . Найменший рівень деформацій спостерігається на вільній вершині витиснутого елемента та в його центральній частині, а інтенсивність деформацій тут сягає значень  $\varepsilon_i = 0,1-0,2$ .

Для дослідження НДС пластичної зони заготовки при прямому витискуванні методом ШО нами застосовано також метод координатних подільних сіток, побудований на використанні методики, основаної на теорії R-функцій [2]. При цьому здійснювалося поетапне

витискування елемента (див. рис. 2,г) - плоска задача. Характер розподілу ізоліній  $\varepsilon_i = const$  в зоні витиснутого елемента, отриманий за результатами вимірювання координатної подільної сітки, співпадає з отриманим за результатами вимірювання твердості. Показник напруженого стану в зоні максимальних деформацій становить  $\eta = -2,5...-2,0$  (див. рис. 6). Ці умови свідчать про наявність тут значних напружень стиску, що робить відносно безпечною zdeформованість матеріалу заготовки. Проте на ділянках поблизу основи зуба виникає небезпека руйнування інструментального оснащення. Матеріал заготовки у вершини зуба підлягає відносно невеликим деформаціям, проте показник напруженого стану тут  $\eta > +1$ , що вимагає проведення оцінки zdeформованості матеріалу.

Важливою особливістю даної технологічної схеми є те, що частки металу з вільної вершини зуба і «жорсткої» схеми напруженого стану, в процесі витискування переходять на контакт з інструментом, де їх деформації продовжують зростати в умовах





«м'якої» схеми напруженого стану ( $\eta = -1,3 \dots -1,5$ ). Все це слід враховувати при побудові шляхів деформування часток матеріалу заготовки, для оцінки його деформовності.

До особливостей деформування відноситься також те, що як видно з рис. 5 і 6, НДС по відношенню до профілю витиснутого елемента має певну асиметрію. Це пов'язано із асиметричним прикладенням навантаження при обкочуванні заготовки. Такий характер плинущі є корисним, якщо бічні поверхні елемента мають різні кути нахилу. При необхідності усунення відзначеної асиметрії слід передбачити реверсування заготовки.

При зміні параметрів профілю елемента, що характеризується величинами, приведеними на рис. 7, значення інтенсивності

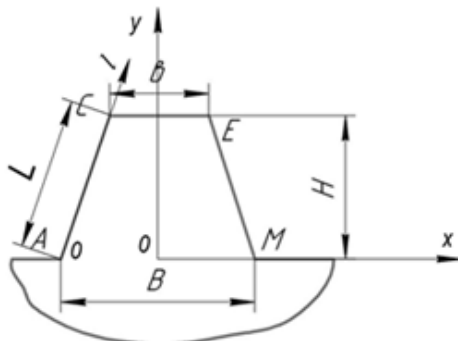


Рис. 7. Характерні параметри профілю елемента, що витискується

Особливість шляхів деформування полягає у тому, що на початковому етапі витискування матеріал на лінії ОМ підлягає розтягу при показнику напруженого стану  $\eta = 1,73$ . При цьому величина інтенсивності деформацій є незначною, досягаючи для вільної поверхні на заключному етапі формоутворення значень  $\varepsilon_i = 0,15 - 0,2$ . В подальшому, при контакті з бічною поверхнею каналу матриці, деформування продовжується в умовах  $\eta = -1,0 - 1,5$ . Для найбільш деформованої приконтантної з валком зони заготовки шлях деформування 3 можна представити за середнім в зоні натискання валка значенням показника  $\eta = -2,5 \dots -2$ .

З метою оцінки деформовності заготовки необхідно застосувати один із критеріїв деформовності. Для побудови математичної моделі шляхи деформування слід представити в аналітичному вигляді.

Вказані шляхи деформування не є однозначними функціями типу  $\varepsilon_i = \varepsilon_i(\eta)$ ,

деформацій і показника напруженого стану будуть дещо змінюватися, проте характер їх розподілу зберігатиметься. Зберігатиметься також характер розподілу відзначених величин і при зміні матеріалів, якщо умови тертя залишатимуться незмінними.

Для оцінки деформовності матеріалу заготовки та визначення граничних, з точки зору запобігання руйнуванню матеріалу або забезпечення необхідних технічних характеристик деталі, необхідно мати шляхи деформування часток небезпечних зон. На рис. 8 приведені шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах, отримані методом координатних подільних сіток з використанням теорії R-функцій.

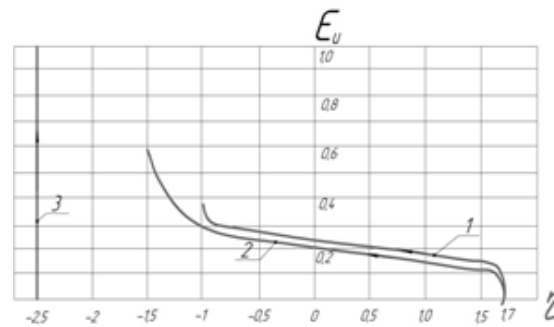


Рис. 8. Шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах: 1 – посередині бічної поверхні АС; 2 – на вході в формоутворюючий канал (поблизу точки А); 3 – в зоні контакту заготовки з валком

проте їх можна представити однозначними функціями виду:

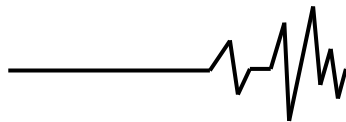
$$\eta = \eta(\varepsilon_i). \quad (1)$$

Схематичний графік функції, що апроксимує вказані шляхи деформування, показано на рис. 8, а її структура має вигляд:

$$\eta = \begin{cases} 1,7, & \varepsilon_i \leq \varepsilon_1 \\ 1,7 - \dots, & \varepsilon_1 \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_2 \\ -1,0, & \varepsilon_i > \varepsilon_2 \end{cases} \quad (2)$$

де  $\varepsilon_1$  - значення інтенсивності деформацій часток металу вільної зони вершини зуба в момент переходу на контакт з інструментальним оснащенням. Відповідно до рис. 8 можна прийняти  $\varepsilon_1 = 0,15$ ;  $\varepsilon_2 = 0,3$  - координати точки переходу від другої до третьої стадії деформування.

Третя стадія деформування є калібрувальною операцією, яка відрізняється незначним зростанням деформацій, а отже на вичерпання ресурсу пластичності практично не



впливає.

Для оцінки деформованості матеріалу заготовки використаємо критерій В. Огороднікова [7]:

$$\psi(\bar{\varepsilon}_i) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_i} \left( 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{d\eta}{d\varepsilon_i} \right) \right) \cdot \frac{\varepsilon_i^{0.2 \operatorname{arctg} \left( \frac{d\eta}{d\varepsilon_i} \right)}}{\varepsilon_*(\eta)^{0.2 \operatorname{arctg} \left( \frac{d\eta}{d\varepsilon_i} \right)}} d\varepsilon_i < 1, \quad \bar{\varepsilon}_i < \varepsilon_*, \quad (3)$$

$$\psi(\varepsilon_*) = \int_0^{\varepsilon_*} \left( 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{d\eta}{d\varepsilon_i} \right) \right) \cdot \frac{\varepsilon_i^{0.2 \operatorname{arctg} \left( \frac{d\eta}{d\varepsilon_i} \right)}}{\varepsilon_*(\eta)^{0.2 \operatorname{arctg} \left( \frac{d\eta}{d\varepsilon_i} \right)}} d\varepsilon_i = 1, \quad (4)$$

де  $\varepsilon_*$  - гранична пластична деформація для шляху деформування (1); похідна  $\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}$

знаходиться диференціюванням (1).

Для (3) матимемо:

$$\frac{d\eta}{de_u} = \begin{cases} \frac{s}{e_1} \cdot \left( \frac{e_u}{e_1} \right)^{s-1} \cdot (\eta_1 - \eta_0), & e_i \leq e_1 \\ \pi \cdot a \cdot \omega \cdot \cos(\pi \cdot \omega \cdot (e_u - e_1)), & e_i > e_1 \end{cases} \quad (5)$$

Отже, з урахуванням (4), (7) критерій (6) набуває вигляду:

при  $e_p \leq e_1$

$$\psi(e_p) = \int_0^{e_p} h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) \cdot \frac{e_u^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) - 1}}{\varepsilon_{*c} \left[ \eta_0 + \left( \frac{e_u}{e_1} \right)^s \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right]^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)}} \cdot de_u = 1 \quad (6)$$

при  $e_p > e_1$

$$\begin{aligned} \psi(e_p) = & \int_0^{e_1} h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) \cdot \frac{e_u^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) - 1}}{\varepsilon_{*c} \left[ \eta_0 + \left( \frac{e_u}{e_1} \right)^s \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right]^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)}} \cdot de_u + \\ & + \int_{e_1}^{e_p} h_2(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) \cdot \frac{e_u^{h_2(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) - 1}}{\varepsilon_{*c} \left[ \eta_0 + \left( \frac{e_u}{e_1} \right)^s \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right]^{h_2(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)}} \cdot de_u = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

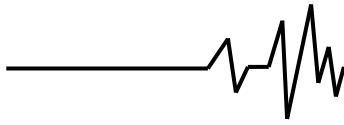
де

$$\varepsilon_{*c}(\eta) = \varepsilon_*(\eta = 0) \cdot \exp \left[ -\eta \cdot \ln \left( \frac{(1-\eta) \cdot \varepsilon_{*c}(\eta = -1)}{2 \cdot \varepsilon_{*c}(\eta = 0)} + \frac{(1+\eta) \cdot \varepsilon_{*c}(\eta = 0)}{2 \cdot \varepsilon_{*c}(\eta = 1)} \right) \right], \quad (8)$$

$$h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) = 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{s}{e_1} \cdot \left( \frac{e_u}{e_1} \right)^{s-1} \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right) \quad (9)$$

$$h_2(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) = 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg}(\pi \cdot a \cdot \omega \cdot \cos(\pi \cdot \omega \cdot (e_u - e_1))) \quad (10)$$

$\varepsilon_{*c}(\eta = -1), \varepsilon_{*c}(\eta = 0), \varepsilon_{*c}(\eta = 1)$  - гранична пластична деформація за умов рівномірного стиску, зсуву та розтягу відповідно.



Проведемо оцінку деформовності матеріалу заготовок при операціях висаджування і зворотного витискування методом ШО (див. рис. 1,а,б і 2а,б,в).

На рис. 9 представлені ізолінії розподілу інтенсивності напружень  $\sigma_i = const$  і

деформацій  $\varepsilon_i = const$ , що отримані за результатами вимірювання твердості в перерізах заготовок (див. рис. 2,а) на різних стадіях обкочування.

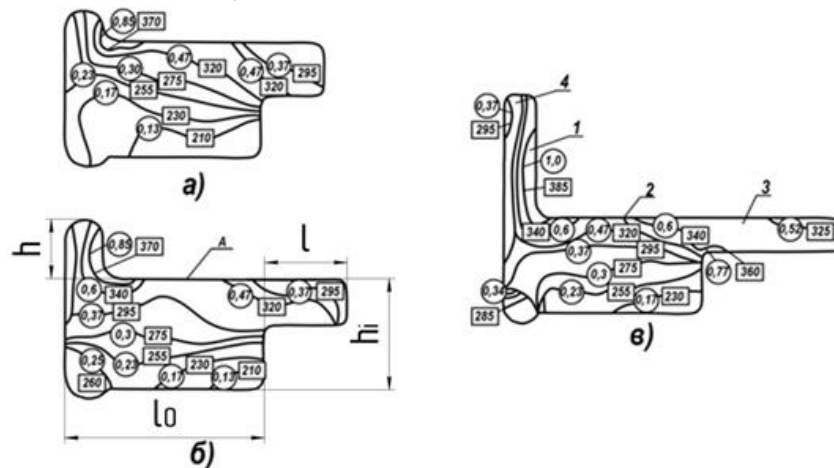


Рис. 9. Розподіл ізоліній  $\varepsilon_i = const$  (○) і  $\sigma_i = const$  (□) в перерізах сформованих ШО кільцевих заготовок з міді М06

Таким чином, в сформованому на першій стадії обкочування перерізі заготовки (рис. 9, а) можна виділити наступні характерні зони розподілу НДС:

- найбільш деформованою є зона тонкостінного елемента 1, яка формується у результаті плинину металу із зони 2. Незначне подальше деформування зони 1, при збільшенні висоти тонкостінного елемента, (рис. 10, залежність 1) відбувається за рахунок послідовних циклічних зсувів в осьовому напрямі, обумовлених особливостями локального навантаження при обкочуванні, та посиленні опору плинину металу в зазор між валком і оправкою;

- зона 2, де найбільша степінь деформації спостерігається на контактній поверхні (поверхня А), яка поступово зменшується в міру віддалення від контактної поверхні. Метал при цьому із зони 2 (рис. 9,в) поступає в зони 1 і 3, а інтенсивність його плинину у тому чи іншому напрямі залежить від взаємного розташування валка і заготовки [2, 3];

- зона 3 – фланцева частина заготовки, є зоною відносно рівномірної деформації. Зростання інтенсивності деформацій на периферії фланця, у залежності від відносного збільшення його довжини, приведена на рис. 10 лінією 2.

Розподіл показника напруженого стану  $\eta$  по довжині дуги контакту в середній частині фланця і вздовж контуру заготовки, що формується валком, представлено на рис. 11. Таким чином, в зоні з найбільшою інтенсивністю

деформацій спостерігається схема напруженого стану, що приблизно відповідає двовісному стиску ( $\eta \approx -2$ ).

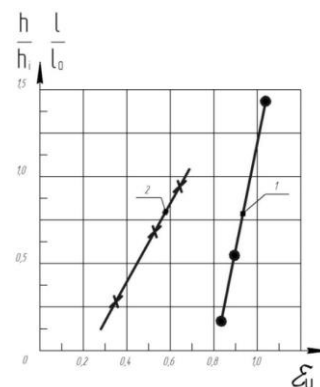
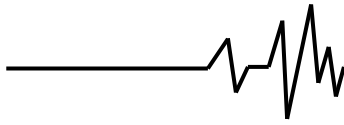


Рис. 10. Залежність відносної зміни висоти тонкостінного елемента  $h/h_i$  від максимальної інтенсивності деформацій (1) та відносного розміру фланця  $l/l_0$  від інтенсивності деформацій на його периферійній ділянці (2) відповідно до рис. 9

Використання металів з більш високим опором пластичному деформуванню  $\sigma_s$ , а також збільшення одиничного обтискування  $\Delta h$  приводить до зростання рівня напружень, проте не чинить помітного впливу на показник  $\eta$ .

Слід відзначити, що в зоні формування максимальних деформацій в тонкостінному елементі має місце «м'яка» схема напруженого стану ( $\eta < -1,5$ ). Більш жорстка схема



напруженого стану має місце у фланцевій частині заготовки, а саме на периферійній, вільній від контакту з інструментом поверхні (рис. 11). Тому оцінку деформовності матеріалу заготовки, для визначення гранично досяжної інтенсивності деформацій  $\varepsilon_*$  або величини

використаного ресурсу пластичності  $\psi_B$ , слід проводити саме для цієї зони.

Оцінку доформовності проводили на основі феноменологічної теорії, для чого були побудовані криві граничних деформацій і шляхи деформування часток металу небезпечної зони заготовки в координатах « $\varepsilon_i - \eta$ ».

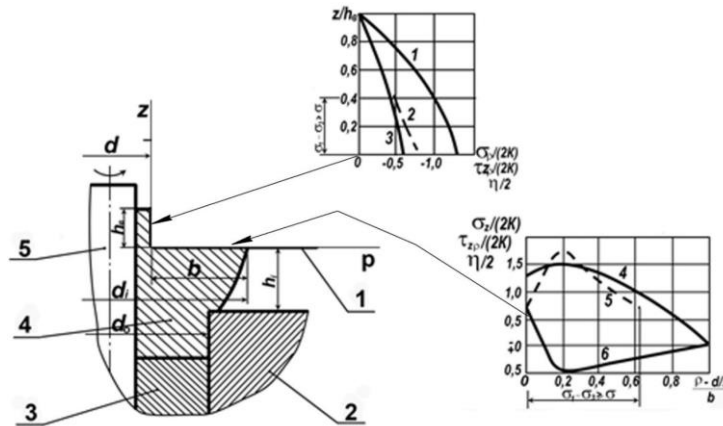


Рис. 11. Розподіл показника напруженого стану по висоті тонкостінного елемента і по ширині фланця

На рис. 12 представлені криві граничних деформацій трьох сталей і шляхи деформування часток металу вільної поверхні

фланця при його висаджуванні, у залежності від параметрів процесу ШО.

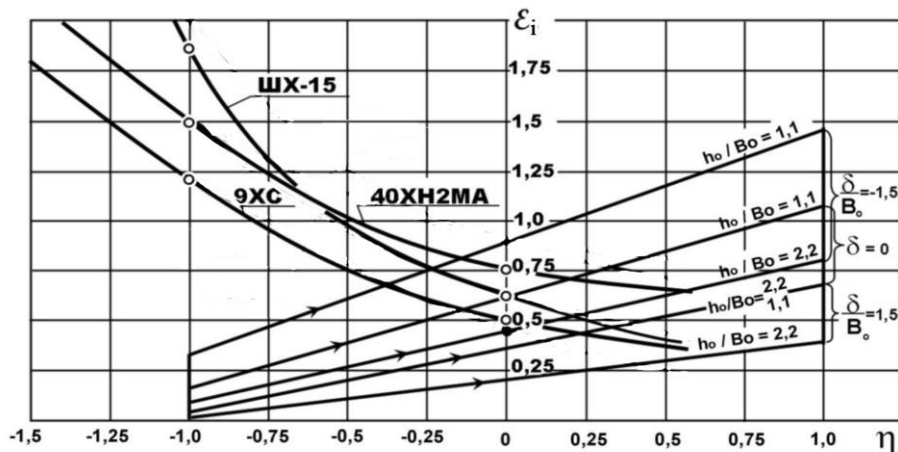
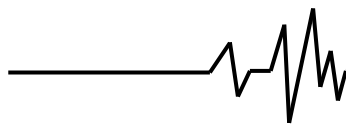


Рис. 12. Криві граничних деформацій сталей —○— і шляхи деформування —> вільної поверхні периферійної частини фланця при висаджуванні методом ШО ( $h_0, b_0$  - вихідна під обкочування висота і товщина стінки трубної заготовки,  $\delta$  - величина зміщення вершини конічного валка від осі заготовки (див. рис. 1,б))

Використовуючи критерій (3) можна розрахувати величину використаного ресурсу пластичності матеріалу заготовки, що підлягала висаджуванню методом ШО.

На основі критерію (4) нами отримано співвідношення для визначення граничного діаметра фланця  $d_*$ :

$$d_* = d_0 \exp \left\{ 0,865 \varepsilon_*(\eta = 0) \exp(-\eta_k \ln \lambda) w - 0,14 [\varepsilon_*(\eta = 0) \exp(-\eta_k \ln \lambda) w]^2 \right\}, \quad (11)$$



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 фланця 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 фланців методом ШО,  $w = 1, 2, \dots, 1, 35$ .

В таблиці 1 приведені значення граничних деформацій і відносних граничних діаметрів фланців, сформованих при різних параметрах технологічного процесу ШО.

**Таблиця 1. Значення граничних деформацій і відносних граничних розмірів заготовок при висаджуванні фланців методом ШО**

№ пор.	Марка сталі	Рівняння шляху деформування								
		$\eta = 1,6\varepsilon_i - 1,5 \begin{pmatrix} \frac{\delta}{b_0} = -1,5 \\ \frac{h_0}{b_0} = 1,1 \end{pmatrix}$			$\eta = 2,5\varepsilon_i - 1,25 \begin{pmatrix} \delta = 0 \\ \frac{h_0}{b_0} = 1,5 \end{pmatrix}$			$\eta = 5\varepsilon_i - 1 \begin{pmatrix} \frac{\delta}{b_0} = +1,5 \\ \frac{h_0}{b_0} = 2,2 \end{pmatrix}$		
		$\varepsilon_*$	$d_*/d_0$	$\varepsilon_*$	$d_*/d_0$	$h_*/h_o$ (no $\varepsilon_i^{\max}$ )	$\varepsilon_*$	$d_*/d_0$	$h_*/h_o$ (no $\varepsilon_i^{\max}$ )	
1.	9XC	0,86	1,90	0,65	1,65	6,4	0,39	1,37	3,7	
2.	ШХ-15	1,00	2,06	0,73	1,74	32,8	0,41	1,39	9,0	
3.	40ХН2МА	1,03	2,10	0,80	1,83	8,6	0,56	1,55	5,1	

Матеріали з похилою кривою граничних деформацій при недостатній пластичності можуть руйнуватися не на вільній поверхні фланця, а в зоні з максимальною інтенсивністю деформацій, яка проходить по всій висоті фланця на відстані  $b_0$  від внутрішньої поверхні вихідної трубної заготовки. В цьому випадку допустиму ступінь формозміни необхідно перевіряти також за граничним ступенем осаджування фланця:

$$h_0/h_* = \exp[\varepsilon_*(\eta=0)\exp(1,5 \ln \lambda)]. \quad (12)$$

Значення граничного ступеня осаджування для заготовок з досліджуваних сталей приведені в табл. 1.

За визначеними величинами інтенсивності деформацій можна для кожного з матеріалів заготовки встановити значення інтенсивності напружень, що в сукупності із встановленим напруженим станом на контакті заготовки і інструменту дозволяє оцінити міцність і стійкість інструменту [2, 3].

**Висновки.** В роботі проведено розробку і дослідження технологічних схем висаджування, прямого і зворотного витискування методом штампування обкочуванням, в результаті чого доведено, що даний процес дозволяє отримувати складнопрофільні заготовки високої якості.

Цілеспрямоване взаємне розташування обкочувального валка і заготовки забезпечує направлений плин і сприятливий напружено-деформований стан матеріалу та надає

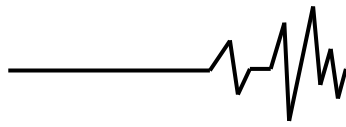
можливість досягнення значних розмірів різних елементів заготовки.

Операції висаджування, осаджування, зворотне витискування супроводжуються сприятливим напружено-деформованим станом і дозволяють отримати геометрично розвинуті елементи заготовки, в т.ч. і тонкостінні. Можливості прямого витискування обмежені складністю передачі зусилля від валка на протилежну торцеву частину заготовки, та значними контактними напруженнями. Тому дана операція підходить більш для здійснення калібрування або формування незначних за розміром елементів заготовки.

За результатами дослідження напружено-деформованого стану матеріалу заготовок в процесах ШО, побудови кривих граничних деформацій та з використанням феноменологічних критеріїв проведена оцінка деформовності матеріалів для небезпечних зон заготовок. Визначена величина використаного ресурсу пластичності для проміжних ступенів деформацій, а також граничних (без руйнування) розмірів заготовок.

**Список використаних джерел**

1. Shtuts, M. Kolisnyk, V. Yavdyk. Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2018. P. 19-25.



2. Матвійчук В. А., Алиев И. С. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: Монография. Краматорск. ДГМА. 2009. 268 с.

3. Калетник Г. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Київ. «Хай Тек Прес». 2013. 528 с.

4. 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

5. 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.

6. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. Actual Challenges in Energy & Mining. 2020. Vol. 844. P.168-181. (Scopus SNIP: 0.29).

7. Матвійчук В.А., Любін М.В., Колісник М.А. Розробка і дослідження процесів штампування обкочуванням складно профільних заготовок. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2018. № 4 (103). С. 56-63.

8. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости. Машиностроение. 1971. С. 200.

9. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Вища школа. 1983. С. 175.

10. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. № 109(9-12). pp. 2457–2464. DOI: 10.1007/s00170-020-05824-7

## References

1. Shtuts A., Kolisnyk M., Yavdyk V. (2018) Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces' formation. MOTROL Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 1(20), 19 – 25. Lublin [in Poland].

2. Matviychuk, V. A., Alyev, Y. S. (2009). Sovershenstvovanye protsessov lokalnoi rotatsyonnoi obrabotky davlenyem na osnove analiza deformatyemosti metallov: Monohrafiya. Kramatorsk. DHMA. [in Ukrainian].

3. Kaletnik, H. M. (2013). Osnovy inzhenernykh metodiv rozrakhunkiv na mitsnist i zhorstkist. Kyiv. «Hai Tek Pres». [in Ukrainian].

4. Kraievskiy V. O., Matviychuk, V. A., Mykhalevych, V. M. (2003). Vplyv tekhnolohichnykh parametriv na kinematyku kholodnoho tortsevoho rozkochuvannia. Udoskonalennia protsesiv ta obladnannia obrobky tyskom v mashynobuduvanni i metalurhii. Kramatorsk - Sloviansk. 286-291. [in Ukrainian].

5. Matviychuk V.A., Kolisnyk M.A., Shtuts A.A. (2018). Investigation of the stress-strain state of the workpiece material during direct extrusion by rolling stamping. Engineering, energy, transport of agro-industrial complex. № 3 (102). 77-84. [in Ukrainian].

6. 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. [in Switzerland].

7. Matviychuk V.A., Lyubin M.V., Kolisnyk M.A. (2018). Development and research of processes of stamping by rolling of difficult profile preparations. Engineering, energy, transport of agro-industrial complex. № 4 (103). 56-63. [in Ukrainian].

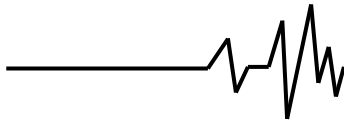
8. Del G.D. (1971). Determination of stresses in the plastic region by hardness distribution. Mechanical engineering. P. 200. [in Ukrainian].

9. Ogorodnikov V.A. (1983). Estimation of deformability of metals during pressure treatment. High school. P. 175. [in Ukrainian].

10. Karnaukh Sergii G., Markov Oleg E., Aliieva Leila I., Kukhar Volodymyr V. (2020). Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 109. 9-12. 2457–2464. [in English]

## EVALUATION OF DEFORMABILITY OF MATERIAL OF PREPARATIONS IN DIRECT AND REVERSE EXTRACTION BY ROLLING STAMPING METHOD

*The article presents the results of development and research of various technological schemes of the process of stamping by rolling cylindrical and conical rolls to obtain complex profile workpieces. It is shown that the achievement of significant dimensions of the various elements of the workpiece is possible by providing a directed flow of metal by changing the*



relative position of the roll and the workpiece. The most effective rolling operations are landing, settling, unloading, reverse and direct extrusion. The paper focuses on the analysis of operations of reverse and direct extrusion to obtain complex profile blanks with developed, including thin-walled elements. Since the technological capabilities depend on the deformability of the material, the analysis of the stress-strain state of the workpieces was performed using the method of grids, hardness measurement and microstructural analysis. The main result of the analysis was the construction of ways to deform the particles of the workpiece material in the coordinates "deformation intensity - stress index". Zones of blanks that are deformed in the conditions of "rigid" stress state are established, therefore for these zones the deformability of metals was assessed using the criteria of phenomenological theory. In addition,

the assessment of deformability was also performed for areas with the maximum degree of deformation of the material. The manufacture of thin-walled elements of the workpiece, using the operation of reverse extrusion, is accompanied by the appearance of significant contact stresses. To prevent the roll from being pushed out of the workpiece and forming elements with a constant thickness, support rollers should be provided. In the case of direct extrusion, the increase in contact stresses requires the application of additional measures to increase the strength of the tool.

**Key words:** complex profile workpiece, rolling stamping, cylindrical and conical rolls, direct and reverse extrusion, stress-strain state, deformability.

#### **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)).

**Михалевич Володимир Маркусович** – доктор технічних наук, професор, кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, e-mail: [mykhalevych@vntu.edu.ua](mailto:mykhalevych@vntu.edu.ua)),

**Колісник Микола Анатолійович** – асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: [kolisnik30@gmail.com](mailto:kolisnik30@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))

**Mikhalevich Volodymyr** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3 Solnechna St., Vinnitsa, 21008, e-mail: [mykhalevych@vntu.edu.ua](mailto:mykhalevych@vntu.edu.ua))

**Kolisnyk Mykola** – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: [kolisnik30@gmail.com](mailto:kolisnik30@gmail.com)).