

УДК 621.77.01

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПРИ ПРЯМОМУ ВИТИСКУВАННІ МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ**

**Матвійчук Віктор Андрійович**, д.т.н., професор,  
**Колісник Микола Анатолійович**, аспірант,  
**Штуць Андрій Анатолійович**, асистент.  
Вінницький національний аграрний університет

**V. Matviychuk**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor  
**M. Kolisnyk**, Postgraduate Student  
**A. Shtuts**, Assistant.  
Vinnytsia National Agrarian University

*Проаналізовано характер формозміни та розв'язана задача визначення напружено-деформованого стану кільцевої заготовки зі складним профілем торцевої частини, який отримано шляхом прямого витискування з використанням процесу штампування обкочуванням. У якості основних методів дослідження вибрано метод ділильних сіток та вимірювання твердості, а також аналіз мікроструктури матеріалу.*

*Отримано картини розподілу інтенсивності деформацій і показника напруженого стану в поперечних перерізах кулачкової пів муфти, а також побудовані шляхи деформування часток матеріалу найбільш небезпечних зон заготовки у координатах відзначених параметрів. Визначені шляхи управління плином матеріалу заготовки та оцінювання його деформованості.*

*Ключові слова: пряме витискування штампуванням обкочування, кулачкова пів муфта, напружено-деформований стан, показник напруженого стану, шляхи деформування часток матеріалу.*

Рис. 9. Літ. 7.

---

**1. Постановка проблеми**

Процеси штампування обкочуванням (ШО) [1] відносяться до високоефективних процесів обробки металів тиском. Найбільшого розвитку і використання набули процеси ШО при отриманні складно профільних заготовок шляхом реалізації радіального плину матеріалу циліндричних заготовок із використанням схем висадки, відбортування, роздачі, обтискування та ін. Разом з тим, для ряду заготовок характерним є складний профіль торцевої частини, який можна отримати шляхом прямого витискування (півмуфти – рис. 1, а, кільця упорних підшипників – рис. 1, б та ін.) [2].



а)



б)

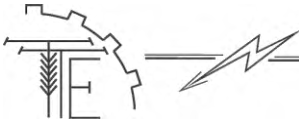
**Рис.1. Заготовки, отримані методом ШО: а) півмуфти кулачкові; б) кільце упорного підшипника**

На рис. 2 приведені технологічні схеми формування та торці заготовки відповідних елементів.

---

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок є одним із важливих факторів при вдосконаленні процесів штампування обкочуванням (ШО) [1, 2]. При цьому, дослідники використовують різноманітні методи дослідження, як експериментальні, так і імітаційні



та аналітичні [3, 4]. Застосування відзначених методів в даній роботі дозволяє побудувати шляхи деформування часток матеріалу в небезпечних зонах заготовки та оцінити її деформовність.

## 2. Мета дослідження

Метою даного дослідження є аналіз характеру формозміни та розв'язання задачі та визначення напружено – деформованого стану кільцевих заготовок із складним профілем.

## 3. Основні результати дослідження

Недостатнє дослідження даного процесу не сприяє розробці технологічних схем із заданим плином матеріалу та формуванням необхідних елементів виробу. Відсутність інформації про НДС матеріалу заготовки унеможливує проведення оцінки деформовності та визначення технологічних можливостей процесу за факторами руйнування матеріалу заготовки і стійкості інструменту. Невизначеною залишається також технологічна спадковість отриманих виробів.

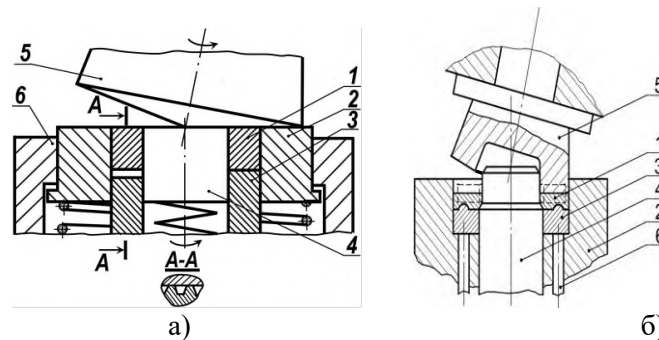


Рис. 2. Технологічні схеми прямого витискування профілю на торці заготовки методом ШО: а) в підпружиненій матриці і оправці, б) в калібрі штамп

В якості основних методів дослідження було вибрано метод ділильних сіток, метод вимірювання твердості та аналіз мікроструктури матеріалу.

При фізичному моделюванні процесів прямого витискування методом ШО у якості матеріалів заготовок було вибрано мідь М06 і армко-залізо. Для міді характерним є висока зміцнюваність при пластичному деформуванні, що дозволяє з високим ступенем точності визначати розподіл інтенсивності деформацій внутрішніх зон заготовок, а також яскраво виражена, проте неоднорідна вихідна мікроструктура. Армко-залізо має рівномірну структуру зерен, тому може доповнити результати дослідження мікроструктурним аналізом.

На рис. 3, а показана zdeформована заготовка кулачкової пів муфти із двох кілець. На бічну поверхню внутрішнього кільця була нанесена прямокутна ділильна сітка. На рис. 4, б показано вид деформованої сітки на початковій стадії формування кулачкового профілю, а на рис. 4, в і 4, г – на проміжній і заключній стадіях.

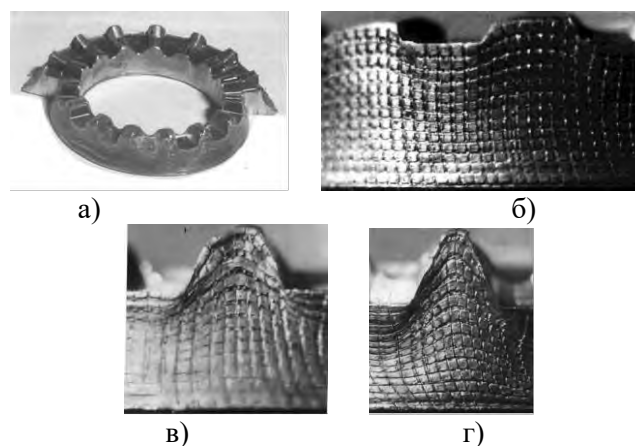
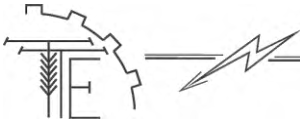


Рис. 3. Вид деформованої сітки в поперечному перерізі кулачка на початковій б), проміжній в) і заключній г) стадіях прямого витискування методом ШО



Вид деформованої мікроструктури матеріалу заготовки в поперечному перерізі кулачка на заключній стадії деформування показано на рис. 4. На рис. 5 представлений укрупнений вид мікроструктури міді М0б в характерних точках сформованого профілю.

Заготовка з армко-заліза має дрібнозернисту структуру, яка досліджувалася для окремих зон при значному збільшенні.

Твердість металу пов'язана з максимальною за всю історію пластичного деформування інтенсивністю напружень  $\sigma_u$  залежністю, єдиною для різних напружених станів і історій деформування [3]. Установлено також, що пружне розвантаження при циклічному штампуванні обкочуванням не приводить до зміни твердості.

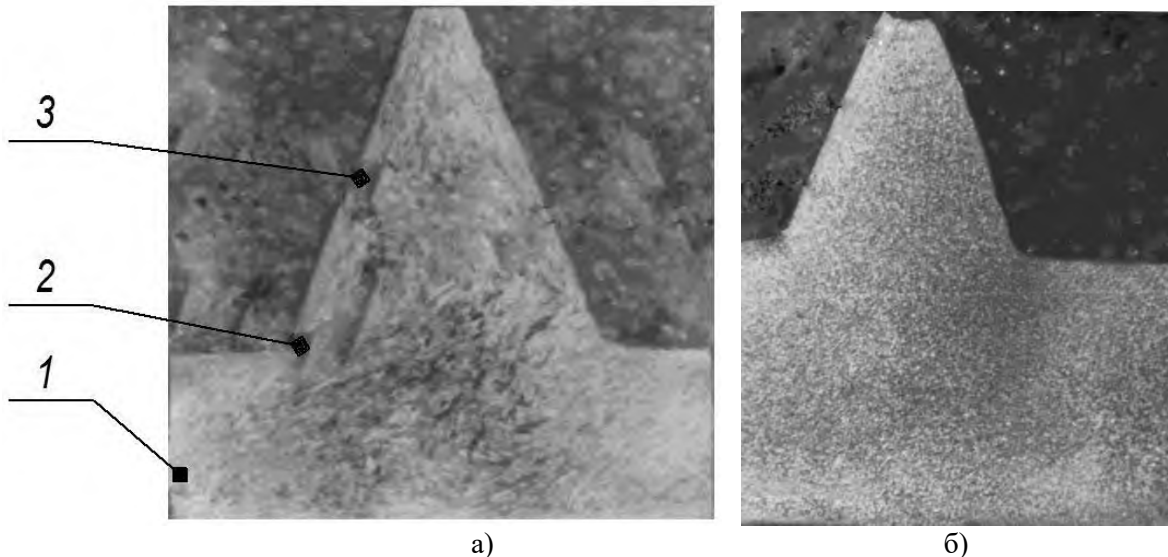


Рис. 4. Вид деформованої мікроструктури матеріалу заготовки в поперечному перерізі кулачка на заключній стадії деформування: а) мідь М0б, б) армко-залізо

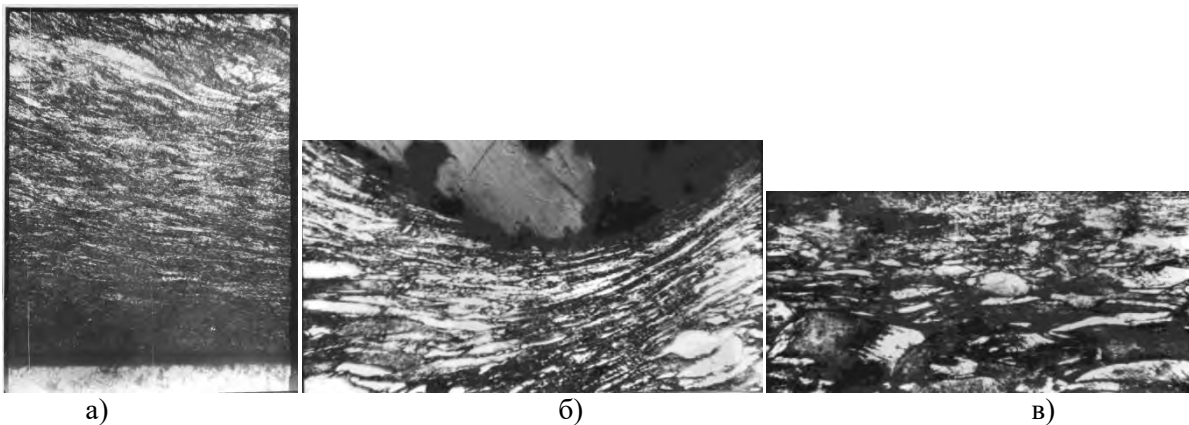
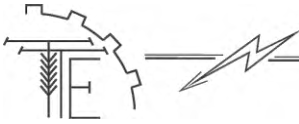


Рис. 5. Вид мікроструктури мідної заготовки в характерних точках сформованого профілю відповідно до рис. 5а: а) – точка 1 (зона контакту з валком); б) – точка 2; в) – точка 3

Таким чином, вимірювання твердості є ефективним методом визначення  $\sigma_u$  для внутрішніх зон заготовки без попереднього її розділення. Отже, для процесів прямого витискування методом ШО можна визначати в пластичній зоні заготовки за результатами вимірювання твердості інтенсивність напружень  $\sigma_u$ , а з урахуванням гіпотези про єдину криву плину, і інтенсивність деформацій  $\epsilon_u$ .

На рис. 6, а приведено градувальний графік, а на рис 6, б – діаграма пластичності міді М0б.

Дослідження НДС матеріалу заготовки методом вимірювання твердості проводили за методикою, приведеною в роботі [3]. На рис. 6 приведено характер розподілу інтенсивності деформацій в зоні витиснутого елемента, отриманий методом вимірювання твердості. Отже, характер деформованого стану в перерізі заготовки є досить нерівномірним. Найбільша інтенсивність



деформацій, яка спостерігається в зоні контакту валка з заготовкою, сягає значень  $\varepsilon_u = 0,9-1,0$ . Наступною, найбільш здеформованою зоною, є зона входу металу в формоутворюючий канал. Тут інтенсивність деформацій сягає значень  $\varepsilon_u = 0,6-0,7$ . Найменший рівень деформацій спостерігається на вільній вершині витиснутого елемента та в його центральній частині, а інтенсивність деформацій тут сягає значень  $\varepsilon_u = 0,1-0,2$ .

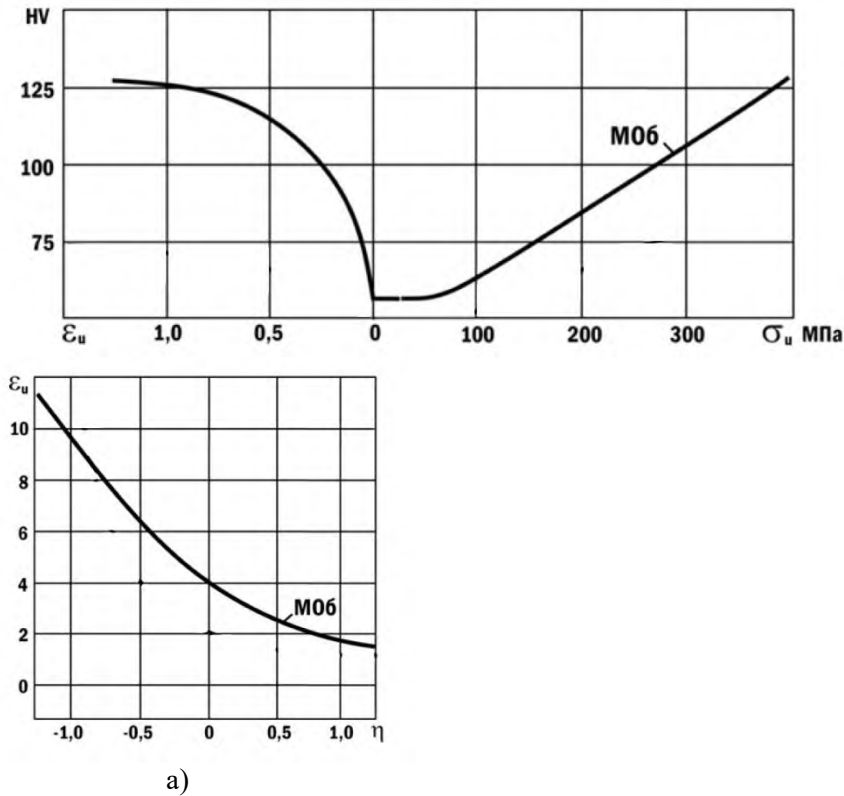


Рис. 6. Механічні характеристики міді М06: а) градувальний графік ( $\sigma_u - HV - \varepsilon_u$ ); б) діаграма пластичності  $\varepsilon_u = \varepsilon_u(\eta)$ . HV – твердість по Віккерсу,

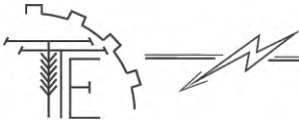
$\varepsilon_u$  - інтенсивність деформацій;  $\sigma_u$  - інтенсивність напружень;  $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$  - показник жорсткості напруженого стану,  $I_1(T_\sigma)$  і  $I_2(D_\sigma)$  - перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень.

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 [4]. При цьому здійснювалося поетапне витискування елемента (див. рис. 3) – плоска задача. Характер розподілу ізоліній  $\varepsilon_u = const$  в зоні витиснутого елемента, отриманий за результатами вимірювання координатної подільної сітки, співпадає з отриманим за результатами вимірювання твердості.

В результаті поетапного витискування матеріалу, яке спостерігається при ШО, відбувається зміщення часток металу, що приводить до зміни знаку компонент деформацій та напружень. Показник напруженого стану змінюється від величин, що відповідають усесторонньому стиску ( $\eta = -2,5 \dots -2$ ) на контакті валка із заготовкою та в зоні входу металу в формоутворюючий канал, до розтягу ( $\eta = 1,7$ ) на вільній поверхні витиснутого елемента.

Частки матеріалу заготовки із зони входу металу в формоутворюючий канал формують бічну поверхню елемента, як і частки металу з його вільної поверхні. В приконтактній зоні бічних поверхонь спостерігаються відносно високі значення інтенсивності деформацій і високий рівень напружень стиску, а показник напруженого стану сягає значень  $\eta = -1,3 \dots -1,5$ .

Як видно з рис. 3, 4, 7, НДС по відношенню до профілю витиснутого елемента має певну



асиметрію. Це пов'язано з асиметричним прикладенням навантаження при обкочуванні заготовки. Такий характер плинущого є корисним, якщо бічні поверхні елемента мають різні кути нахилу. При необхідності усунення відзначеної асиметрії слід передбачити реверсування обертання заготовки.

При зміні параметрів профілю елемента, що характеризується величинами, приведеними на рис. 8, значення інтенсивності 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 службових характеристик деталі, необхідно мати шляхи деформування часток небезпечних зон. На рис. 9 приведені шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах, отримані методом координатних подільних сіток з використанням теорії  $R$ -функцій.

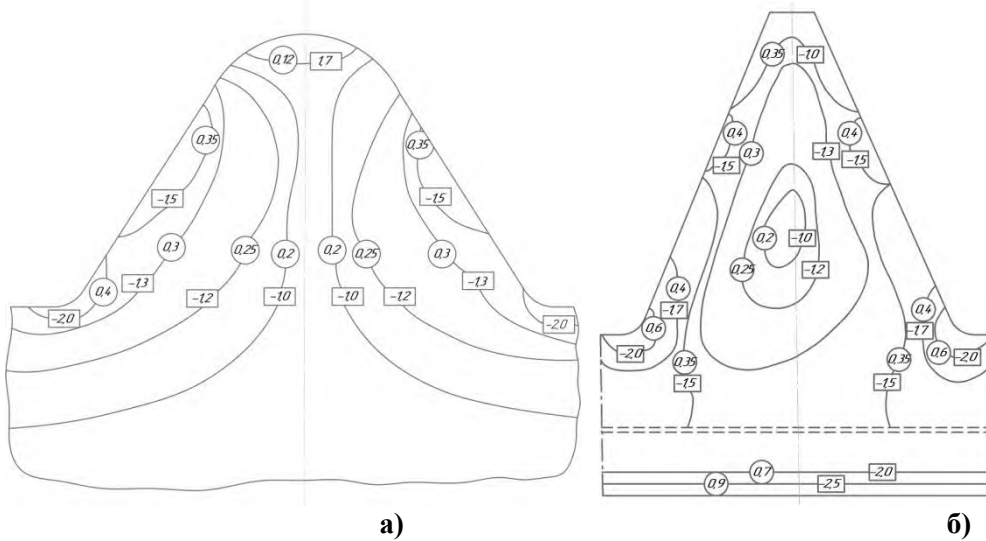


Рис. 7. Характер розподілу параметрів НДС в елементі заготовки, отриманому витискуванням методом ШО на проміжній а) і заключній б) стадіях:  $\eta = \text{const}$  ( $\square$ ) і  $\epsilon_u = \text{const}$  ( $\circ$ )

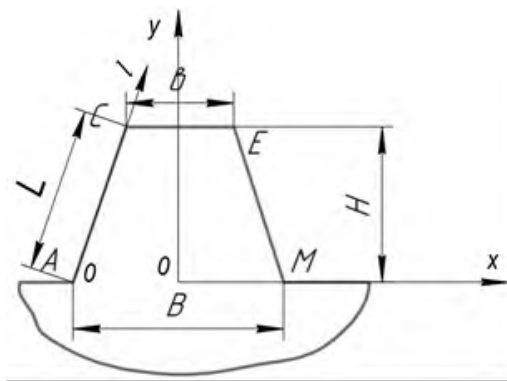


Рис. 8. Характерні параметри профілю елемента, що витискується

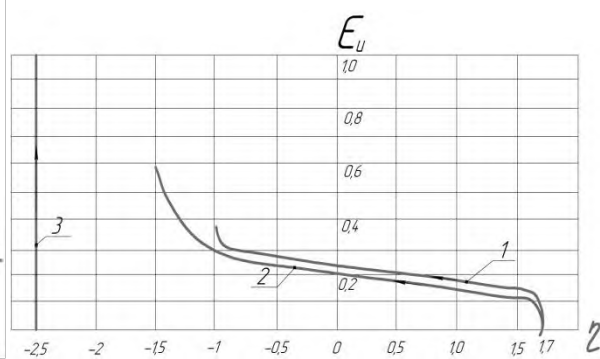
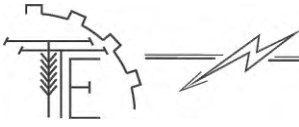


Рис. 9. Шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах: 1 – посередині бічної поверхні АС; 2 – на вході в формотворюючий канал (поблизу точки А); 3 – в зоні контакту заготовки з валком

Особливість шляхів деформування полягає у тому, що на початковому етапі витискування матеріал на лінії ОМ підлягає розтягу при показнику напруженого стану  $\eta = 1,7$ . При цьому величина інтенсивності деформацій є незначною, досягаючи для вільної поверхні на заключному етапі



формування значень  $\varepsilon_u = 0,15 - 0,2$ . 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  $Z$  можна представити за середнім в зоні натискання валка значенням показника  $\eta = -2,5 \dots -2$ .

Використовуючи критерії деформовності металів [5, 6] за відомими шляхами деформування і діаграмами пластичності металів можна розрахувати для кожної із зон накопичений ресурс пластичності, а також визначити граничні до руйнування розміри заготовки.

За визначеними величинами інтенсивності деформацій можна для кожного з матеріалів заготовки встановити значення інтенсивності напружень, що в сукупності з встановленим напруженим станом на контакті заготовки і інструменту дозволяє встановити міцність і стійкість інструменту [7].

#### 4. Висновки та пропозиції

1. Плин матеріалу заготовки в приконтантній з валком зоні залежить від положення вершини валка по відношенню до осі заготовки. Зміщення вершини валка за поздовжню вісь, по відношенню до плями контакту, (див. рис. 2а) дозволяє усувати наплив металу на матрицю (див. рис. 3а) та краще заповнювати формуючий канал.

2. Деформований стан матеріалу заготовки при прямому витискуванні методом ШО є суттєво нерівномірним. Проте максимальне накопичення деформацій відбувається в зонах зі сприятливим напруженим станом. Це дозволяє формувати елементи з матеріалів, що мають відносно невисоку пластичність.

3. Отримані шляхи деформування часток металу в небезпечних зонах заготовки дозволяють, при використанні діаграм пластичності, оцінювати деформовність матеріалу заготовки

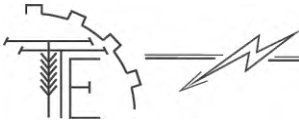
4. Формування сприятливої мікроструктури утворених елементів забезпечить підвищені службові характеристик деталей.

#### Список використаних джерел

1. Матвийчук В. А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: Монография / В. А. Матвийчук, И. С. Алиев. – Краматорск: ДГМА, 2009. – 268 с.
2. Виноградов Л. В. Технологические возможности ротационного деформирования / Л. В. Виноградов, В. А. Матвийчук, С. М. Мочалов // Кузнечно-штамповочное производство, 1989. - №4. – С. 14 – 16.
3. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости / Г. Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1971. – 200 с.
4. Shtuts A., Kolisnyk M., Yavdyk V. 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. - Vol.20. – No.1. – P. 19 – 25.
5. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. - К.: УМК ВО, 1989. – 150 с.
6. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В. М. Михалевич. – Вінниця: „УНІВЕРСУМ – Вінниця”, 1998. – 195 с.
7. Калетнік Г. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість / Г. М. Калетнік, М. Г. Чаусов, В. М. Швайко. – Київ: «Хайт-Тек Прес», 2013. – 528 с. .

#### References

- [1] Matviychuk, V. (2009) *Sovershenstvovanye protsessov lokalnoi rotatsyonnoi obrabotky davlenyem na osnove analiza deformyruemosti metallov. [Improvement of the processes of local rotational pressure treatment based on the analysis of the deformability of metals]*: Kramatorsk: DGMA [in Ukrainian].
- [2] Vinogradov, L. (1989) *Tekhnolohycheskye vozmozhnasty rotatsyonnoho deformyrovaniya [Technological possibilities of rotational deformation]* 4, 14 – 16. Forging and stamping production [in Russian].



- [3] Del, G. (1971) *Opređenje napriazheni v plastycheskoi oblasti po raspredeleniyu tvėrdosti [Determination of stresses in the plastic region by the hardness distribution]* Moscow: Mechanical Engineering [in Russian].
- [4] 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* 20, 1, 19 – 25. MOTROL Commission of Motorization and Energetics in Agriculture.
- [5] Ogorodnikov, V. (1989) *Deformyruemost y razrushenye metallov pry plastycheskom formoyzmenenyy [Deformability and destruction of metals during plastic deformation]* УМК ВО [in Russian].
- [6] Mikhalevich, V. (1998) *Tenzorni modeli nakopychennia poshkodzhen [Tenzorni models of accumulation of a system]* Vinnitsa: „UNIVERSUM - Vinnitsa” [in Ukrainian].
- [7] Kaletnik, G. (2013) *Osnovy inzhenernykh metodiv rozrakhunkiv na mitsnist i zhorstkist [Basic engineering methods of rozrakhunkiv on the city and the market]* Kiev: “High-Tech Press” [in Ukrainian].

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМОВНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВОК ПРИ ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИЯ МЕТОДОМ ШТАМПОВКИ ОБКочУВАННЯМ

*Проанализирован характер формoизменения и решена задача определения напряженно-деформированного состояния кольцевой заготовки со сложным профилем торцевой части, полученный путем прямого выдавливания с использованием процесса штамповки обкочувания. В качестве основных методов исследования выбран метод делительных сеток и измерения твердости, а также анализ микроструктуры материала.*

*Получены картины распределения интенсивности деформаций и показателя напряженного состояния в поперечных сечениях кулачковой пол муфты, а также построены пути деформирования частиц материала наиболее опасных зон заготовки в координатах отмеченных параметров. Определены пути управления течением материала заготовки и оценки его деформовности.*

*Ключевые слова: прямое выдавливание штамповкой обкочувания, кулачковая пол муфта, напряженно-деформированное состояние, показатель напряженного состояния, пути деформирования частиц материала.*

Рис. 9. Лит. 7.

### RESEARCH OF A STRESS-DEFORMIVE STATE OF PAPER MATERIAL WITH DIRECT EXTRACTION BY A STOPPING METHOD BY COOLING

*The character of the shape change is analyzed and the problem of determination of the stress-deformed state of the ring blank with a complex profile of the end part, which is obtained by direct extrusion with the use of the stamping process by means of melting, is solved. As the main methods of research, the method of dividing grids and the measurement of hardness, as well as the analysis of the microstructure of the material have been selected.*

*The picture of the distribution of the intensity of deformations and the stress state index in the cross sections of the cam half sleeve is obtained, as well as the ways of deforming the particles of the material of the most dangerous zones of the workpiece in the coordinates of the marked parameters. The ways of controlling the flow of material of a workpiece and estimation of its deformity are determined.*

*Key words: direct extrusion by stamping obkation, cam-half coupling, stress-deformed state, indicator of a stressed state, ways of deformation of particles of a material.*

Fig. 9. Ref. 7.

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Матвійчук Віктор Андрійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електротехнічних систем, технологій та автоматизації в АПК» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: vamatv50@gmail.com).

**Колісник Микола Анатолійович** – аспірант Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: kolisnik30@gmail.com).

**Штуць Андрій Анатолійович** – асистент кафедри «Електротехнічних систем, технологій та



автоматизації в АПК» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com).

**Матвийчук Віктор Андреевич** – доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою «Електротехнічних систем, технологій і автоматизації в АПК» Вінницького національного аграрного університету (ул. Солнечная, 3, г. Вінниця, 21008, Україна, email: vamatv50@gmail.com).

**Колесник Николай Анатольевич** – аспірант Вінницького національного аграрного університету (ул. Солнечная, 3, г. Вінниця, 21008, Україна, email: kolisnik30@gmail.com).

**Штуць Андрей Анатольевич** – асистент кафедри «Електротехнічних систем, технологій і автоматизації в АПК» Вінницького національного аграрного університету (ул. Солнечная, 3, г. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com).

**Matviychuk Viktor** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of "Electrotechnical Systems, Technologies and Automation in the Agrarian and Industrial Complex" of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, email: vamatv50@gmail.com).

**Kolisnyk Mykola** – Postgraduate Student of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, email: kolisnik30@gmail.com).

**Shtuts Andriy Anatoliyovych** – Assistant of the Department of "Electrotechnical Systems, Technologies and Automation in the Agrarian and Industrial Complex" Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com).