

ДОЛЯ В. С., ЧУХЛІВ В. Л., БОБРОВ О. Г., ТАРАН О. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СХЕМ КОВАЛЬСЬКОГО ПРОТЯГУВАННЯ НА НЕРІВНОМІРНІСТЬ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ВІЛЬНОМУ КУВАННІ

Анотація. У роботі виконано дослідження впливу різних схем ковальського протягування — «проходами» та «по гвинту» — на нерівномірність показників процесу вільного кування. Моделювання виконано у програмному комплексі QForm. Проаналізовано закономірності впливу деформованого стану поковки на рівномірність пластичної течії. Отримані результати показали, що використання гвинтової схеми протягування сприяє зменшенню нерівномірності деформацій і підвищенню якості поковок за рахунок більш рівномірного перерозподілу металу.

Ключові слова: кування, протягування, «по гвинту», QForm, деформація.

DOLIA V., CHUKHLIV V., BOBROV O., TARAN O.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF FORGING DRAWING SCHEMES ON THE UNUNIFORMITY OF DEFORMATION IN FREE FORGING

Abstract. The paper investigates the influence of different forging drawing schemes — ‘passes’ and ‘screw’ — on the unevenness of free forging process indicators. The modelling was performed in the QForm software package. The patterns of influence of the deformed state of the forging on the uniformity of plastic flow were analysed. The results showed that the use of the screw drawing scheme contributes to a reduction in the unevenness of deformations and an improvement in the quality of forgings due to a more uniform redistribution of metal.

Keywords: forging, drawing, screw scheme, QForm, deformation.

Вступ. Вільне кування є одним із найпоширеніших методів обробки металів тиском, який широко застосовується для виготовлення великогабаритних заготовок, що використовуються в енергетичному, машинобудівному та транспортному обладнанні. Цей процес забезпечує отримання поковок високої якості з підвищеними механічними властивостями. Разом із тим, процес вільного кування супроводжується нерівномірністю пластичної течії металу, що призводить до концентрації напружень, неоднорідності структури та утворення дефектів у центральній частині заготовки, що знижує якість та надійність металопродукції, особливо при виготовленні великих поковок.

У зв'язку з цим актуальним завданням є дослідження впливу кінематичних схем ковальського протягування на рівномірність розподілу деформованого стану заготовки, а також оцінювання ефективності різних підходів до поліпшення умов течії металу під час вільного кування.

Аналіз літератури. Вільне кування є одним із найпоширеніших методів обробки металів тиском, який застосовується при виготовленні великогабаритних поковок для енергетичного, машинобудівного та транспортного обладнання [2, 3]. Процес полягає у деформуванні металу між бойками без обмеження його бічного плину. Кування використовують не лише як технологію формоутворення, а й як ефективний засіб покращення структури та властивостей металу [2, 6]. У процесі кування поковка проходить інтенсивну пластичну деформацію, завдяки чому відбувається зварювання внутрішніх дефектів, подрібнення зерна, утворення дрібнозернистої та волокнистої структури, що позитивно впливає на її якість [6].

Порушення режимів нагрівання заготовок можуть спричинити появу характерних дефектів поковок: внутрішніх тріщин, глибоких вм'ятин, грубозернистої структури, а також нерівномірного залому [2, 13]. Під час здійснення операцій пластичної деформації (кування чи штампування) можуть виникати дефекти різного походження, зокрема, зовнішні та внутрішні тріщини, задири, вм'ятини, затискання, рвані поверхні, розшарування, відхилення від заданої геометрії виробу [13, 14].

Основними операціями є осаджування, протягування, формування, рубання та правлення. Від рівномірності деформації залежить структура, щільність і механічні властивості матеріалу [2, 3]. Під час вільного кування часто виникає нерівномірність пластичної течії металу, що призводить до внутрішніх напружень, неоднорідності структури та появи дефектів у центральній частині поковки [4, 5, 17]. Тому актуальним завданням є підвищення рівномірності деформації шляхом вибору оптимальних схем кування та кінематичних параметрів [9, 10, 15, 21].

Одним із ефективних способів є застосування схеми “по гвинту”. Схема “проходами” передбачає поступальний рух заготовки без обертання, у той час як “по гвинту” поєднання поступального переміщення та обертання навколо осі на певний кут. Це створює спіральний потік металу, що сприяє кращому його перетіканню від центра до периферії [8, 11, 15]. Дослідження останніх років показують, що саме схема “по гвинту” ковальського протягування здатні суттєво зменшити нерівномірність інтенсивності деформацій у поперечному перерізі поковок і знизити концентрацію залишкових напружень [12, 16, 18, 19]. Такі кінематичні умови сприяють подрібненню зерна, підвищенню однорідності структури та зменшенню схильності до утворення внутрішніх тріщин [5, 6, 18].

Моделювання процесів вільного кування в програмному середовищі QForm дозволяє точно оцінювати розподіл полів деформації, напружень і температури, а також прогнозувати утворення дефектів [7, 9, 15, 20]. Числові експерименти, виконані з урахуванням теплового контакту між заготовкою та інструментом, показали, що при застосуванні схеми “по гвинту” нерівномірність деформації зменшується приблизно на 25–35 % порівняно зі схемою “проходами” [10, 21].

У роботах [12, 16, 18, 19] наголошується, що перехід до схеми “по гвинту” або комбінованого протягування дає змогу забезпечити кращу течію металу, скоротити центральну зону недеформованого матеріалу та покращити якість металопродукції. Подібні результати підтверджують і дослідження, виконані на основі експериментальних випробувань поковок з легованих сталей [13, 16, 18].

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить, що впровадження схеми “по гвинту” у процес вільного кування є перспективним напрямом підвищення рівномірності пластичного деформування та якості готових виробів, а числове моделювання у QForm виступає ефективним інструментом для теоретичного прогнозування та оптимізації цих процесів.

Мета дослідження. Метою роботи є встановлення впливу схем “проходами” та “по гвинту” для ковального протягування на нерівномірність деформацій у процесі вільного кування шляхом числового моделювання в середовищі QForm.

У даній роботі проведено числове моделювання процесів вільного кування для заготовки зі сталі 45 діаметром 600 мм і довжиною 2000 мм. Початкова температура заготовки становила 1200 °С. Дослідження виконувалися при подачі 200 мм (половина ширини бойка) і відносній деформації 10 %. Для моделювання використовували гідравлічний прес номінальною силою 16 МН та плоскі бойки зі сталі 5ХНМ.

Результати дослідження. Схема “проходами” (рис.1) передбачає поступальне переміщення заготовки між плоскими бойками без обертання навколо осі. Після кожного проходу заготовка повертається на кут 90–120° для забезпечення рівномірності деформації по перерізу. Такий метод широко використовується для протягування валів, осей та заготовок з круглим або квадратним поперечним перерізом [1]. 3D-модель заготовки при цій схемі демонструє характерну зміну геометрії — зменшення діаметра по всій довжині та локальне розширення зони контакту з бойками. У периферійних областях спостерігається підвищена інтенсивність деформації, тоді як центральна частина залишається менш деформованою.

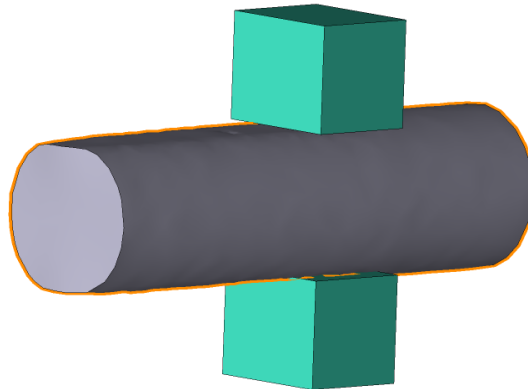


Рис 1. – 3D модель протягування «проходами»

Схема “по гвинту” (рис. 2) характеризується поєднанням поступального переміщення заготовки вздовж осі та її обертання на певний кут після кожного удару. У результаті формується спіральна траєкторія течії металу, що сприяє більш рівномірному перерозподілу деформацій у поперечному перерізі [22]. На 3D-моделі видно плавну зміну об’єму та розтягування матеріалу вздовж осі, що ілюструє рівномірну пластичну течію металу по спіральній траєкторії.

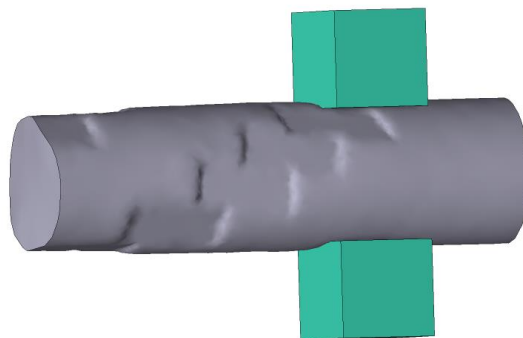


Рис. 2 – 3D модель протягування “по гвинту”

Моделювання проведено в програмному комплексі QForm з урахуванням теплового контакту між заготовкою та інструментом. Визначали максимальні (ϵ_{\max}) та мінімальні (ϵ_{\min}) значення інтенсивності деформації для оцінки коефіцієнта нерівномірності:

$$K_{\text{н}} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{\max}},$$

Д

є ϵ_i величина деформації в контрольній точці; ϵ_{\max} – максимальна величина деформації в перерізі.

Для оцінювання об'ємної нерівномірності деформації металу під час кування, а також прогнозування розподілу механічних властивостей, було запропоновано спеціальний метод[23]. Суть методу полягає у визначенні в кожному досліджуваному поперечному перерізі точки з найвищим рівнем деформації. Від цієї точки через центр перерізу проводять одну з чотирьох ліній, які розміщені під взаємним кутом 45° . На кожній з цих ліній розміщують по шість контрольних точок, симетрично відносно як точки з максимальною деформацією, так і центру перерізу, відповідно до представленної схеми (рис. 5).

Спочатку були створені 3D-моделі заготовок відповідно до схем протягування “проходами” та “по гвинту”. Після цього побудовані моделі було імпортовано в програмне середовище QForm, де проведено налаштування всіх необхідних параметрів для моделювання процесів вільного кування. У результаті здійснено числове дослідження напружено-деформованого стану заготовки при протягуванні “проходами” (рис. 3) та при протягуванні “по гвинту” (рис. 4).

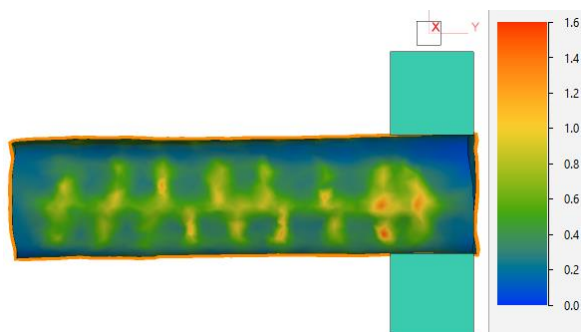


Рис. 3 - Формозміна заготовки при схемі протягування “проходами”

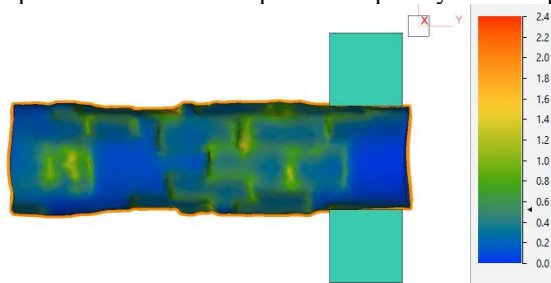


Рис. 4 - Формозміна заготовки при схемі протягування “по гвинту”.

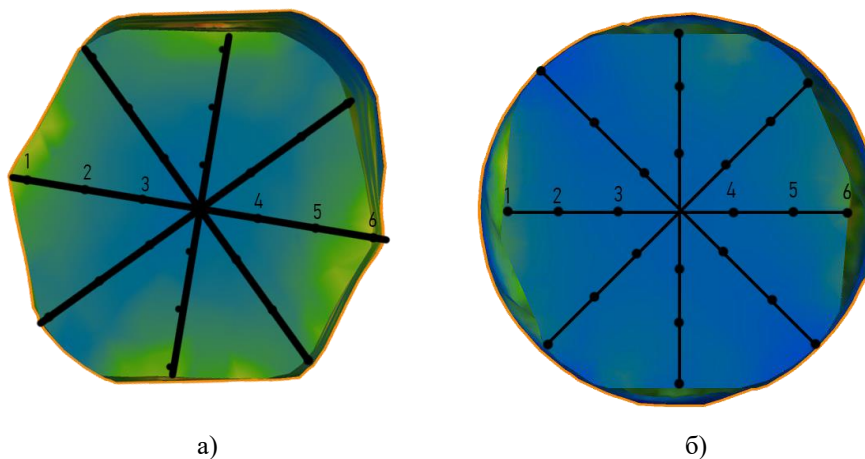
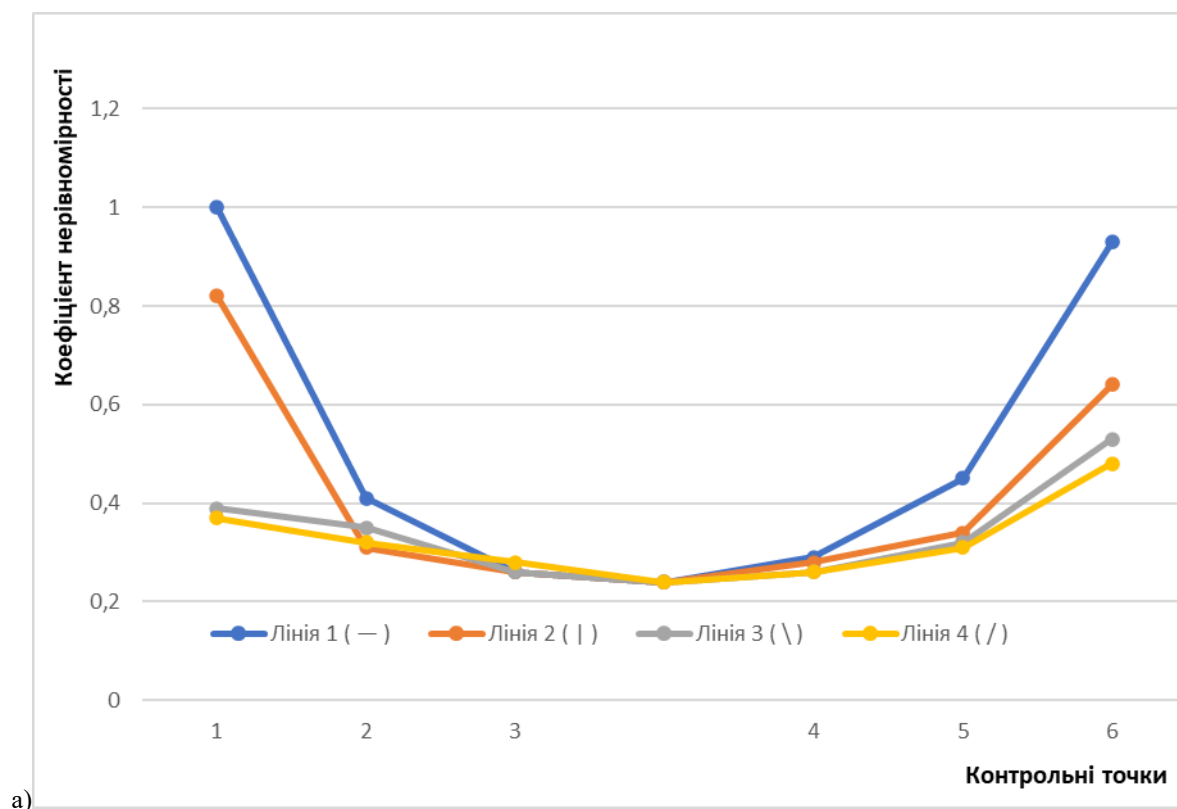


Рис. 5 - Розташування ліній та контрольних точок у перерізі при протягуванні заготовок за схемою “проходами” (а), та “по гвинту” (б).

Моделювання процесів виконано із застосуванням спеціалізованого програмного комплексу QForm, призначеного для числового аналізу та оптимізації технологій обробки металів тиском. QForm дає змогу відтворювати кінематичні, теплові та напружено-деформовані параметри процесу, що забезпечує високу точність результатів і надійність отриманих даних.

Здійснено числовий аналіз нерівномірності деформації металу при моделюванні вільного кування за схемами протягування “проходами” та “по гвинту”. Для обох схем розраховано показники нерівномірності деформацій у поперечному перерізі заготовки та побудовано графічні залежності розподілу деформацій (рис. 5).

З аналізу рис. 5а видно, що при схемі протягування “проходами” нерівномірність деформації змінюється від 0,24 до 1. Для схеми “по гвинту” (рис. 5б) цей показник коливається в межах від 0,46 до 1. Отримані результати свідчать, що використання схеми “по гвинту” зменшує нерівномірність деформації приблизно на 30 % порівняно з «проходами». Це забезпечує більш рівномірний розподіл напружень у металі, покращує пластичну течію та сприяє підвищенню якості кованих виробів.



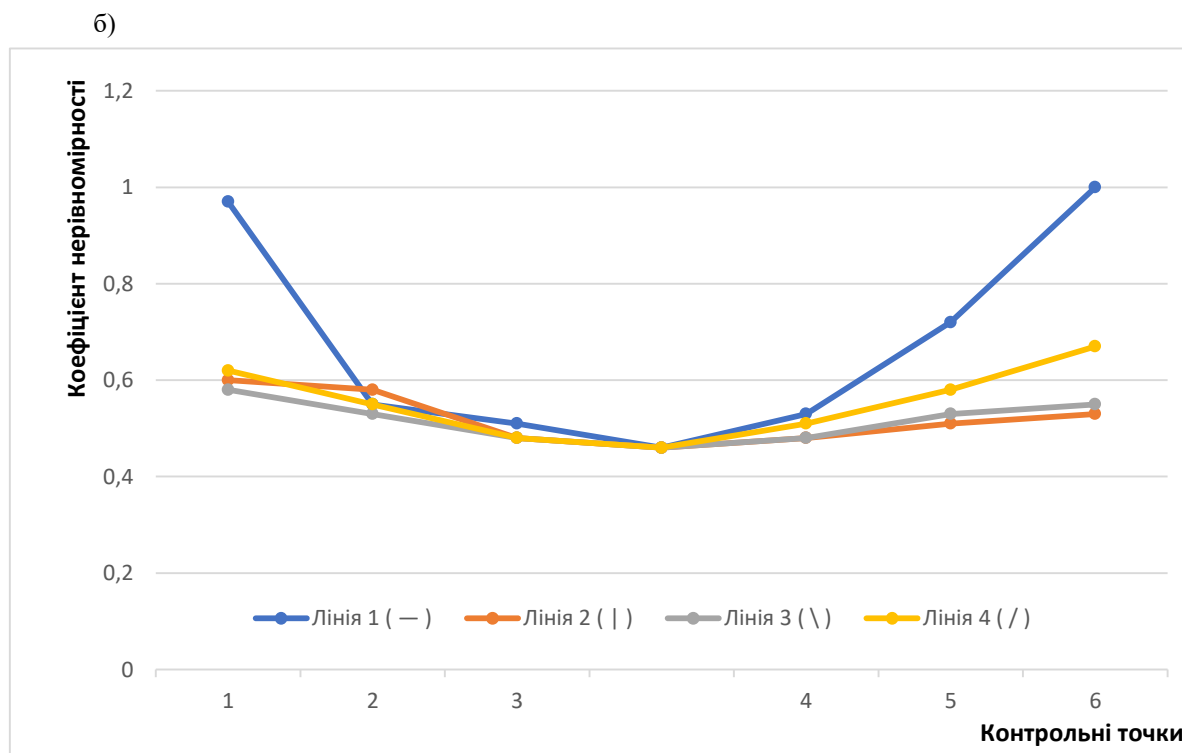


Рис. 5 – Графіки розподілу коефіцієнту нерівномірності деформації – при протягуванні за схемою “проходами” (а) та при протягуванні за схемою “по гвинту” (б).

Схема “по гвинту” покращує умови течії металу, зменшує концентрації напружень, усуває центральну зону недеформованого металу, підвищуючи якість поковок. Такий підхід дозволяє знизити ризик виникнення внутрішніх порожнин і тріщин, забезпечити однорідну структуру металу та покращити механічні властивості.

Висновки.

У ході дослідження встановлено, що кінематична схема ковальського протягування суттєво впливає на характер пластичної течії металу та рівномірність деформації при вільному куванні. Моделювання процесу в середовищі *QForm* показало, що схема “по гвинту” забезпечує більш рівномірний розподіл деформацій у поперечному перерізі заготовки порівняно з схемою “проходами”, зменшуючи різницю між максимальними та мінімальними значеннями інтенсивності деформації приблизно на 30%.

Отримані результати свідчать, що використання схеми “по гвинту” сприяє покращенню умов течії металу, зменшенню концентрацій напружень у центральній частині заготовки, підвищенню однорідності структури та загальної якості поковок.

Список літератури

1. Choi, S.K., Chun, M.S., Van Tyne, C.J., & Moon, Y.H. Optimization of Open-Die Forging of Round Shapes Using FEM Analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1 (2006), pp. 88–95. Advanced Steel Processing and Products Research Center, Colorado School of Mines, USA.
2. Данченко В.М., Гринкевич В.О., Головка О.М. Теорія процесів обробки металів тиском. - Дніпропетровськ: Пороги, 2008. - 370 с.
3. Кальченко П.П., Марков О.Е. Новые технологические процессыковки крупных прессовых поковок. - Краматорск: ДГМА, 2014. - 100 с.
4. Dyja H., Banaszek G., Mroz S., Berski S. Modelling of shape anvils in free hot forging of long products. - *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 157–158. - p. 131–137.
5. Cockcroft M.G., Latham D.J. “Ductility and workability of metals”, - *Inst Metals*, T. 96, №1, - p. 33-39.
6. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: навч. посіб. - Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. - 226 с.
7. Huda Z. Metal forming processes: fundamentals, analysis, calculations. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2024. – 307 p.

8. Švajger M. Open die forging technology with failure analysis, – Ljubljana: SMR Premium GmbH; Infodoc S.r.l., 2023. – 207 p.
9. K.G. Kakandikar, A. Agrawal, D.R. Kumar. Metal forming processes: developments in experimental and numerical approaches – Boca Raton: CRC Press, 2022. – 338 p.
10. Reinisch, N., Rudolph, F., Günther, S., Bailly, D., Hirt, G. Successful pass schedule design in open-die forging using double deep Q learning // *Processes*. – 2021. – Vol. 9, No. 7. – Article 1084.
11. Технологічні процеси за фахом. Кування і штампування : навчальний посібник / В.В. Кухар, Б.С. Каргін, О.С. Аніщенко, С.Б. Каргін, А.Г. Присяжний. – Маріуполь : ПДТУ, 2017. – 144 с.
12. Emerging Trend in Forging Operation Omolayo M. Ikumapayi, Esther T. Akinlabi, and Peter Onu (https://www.researchgate.net/publication/344006048_Emerging_Trend_in_Forging_Operation)
13. Якість металопродукції навч. посібник / Є. І. Шифрін, Є. І. Сокол, В. Л. Чухліб [та ін.] ; Нац. техн. ун-т “Харків. політехн. ін-т”. – Харків, 2025. – 415 с.
14. Кування і гаряче об’ємне штампування: Методичні рекомендації / Носуленко В. І., Мірзак В. Я. ; Міносвіти і науки України, Центральнoукраїнський нац. техн. ун-т, каф. обробки металів тиском та спецтехнологій. – Кропивницький : ЦНТУ, 2019. – 66 с.
15. Di Schino A. Open-die forging process simulation: a simplified industrial approach based on artificial neural network // *AIMS Materials Science*. – 2021. – №8(5): - p. 685–697.
16. Марков О., Хващинський А., Мусорін А., Маркова М., Лисенко А. Дослідження нового способу кування великих зливків на основі осадження профільованих заготовок / О. Марков, А. Хващинський, А. Мусорін, М. Маркова, А. Лисенко // *Технічні науки та технології*. - 2022. - № 1 (27). - С. 45-53р.
17. Ebrahimi R, Najafizadeh A (2004) A new method for evaluation of friction in bulk metal forming. *J Mater Process Technol* 152(2):136–143 p.
18. Афтандіянц Є.Г., Зазимко О.В., Похиленко Г.М. Технологія обробки металів і сплавів тиском. - Видавничий центр НУБіП, Київ, 2020.– 60с.
19. Сівак Р.І. “Розвиток наукових основ механіки немонотонного пластичного деформування та удосконалення технологічних процесів обробки металів тиском” - Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук - Вінниця, 2018, 43с.
20. Qform UK. URL: <https://www.qform3d.com/> (accessed June 01, 2025).
21. Wang B., Han Y., Zeng W., Zhai Y. Improving the deformation uniformity within forgings by applying preform optimization based on FEM. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, Vol. 223. - pp. 285–293.
22. Wolfgarten, M., Merklein, M., and Hirt, G. Analysis of Process Forces and Geometrical Correlations for Open-Die Forging with Superimposed Manipulator Displacements. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 276 (2020), Article No. 116408.
23. Чухліб В. Л., Ашкелянець А. В., Губський С. О., Петров О. В., Дуванський О. М., Палієнко В. О., Окунь А. О. Розробка технологічної концепції проектування процесів кування з урахуванням впливу режиму деформування на якість поковок // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Гідрравлічні машини та гідроприводи. – 2021. – № 1 (1323). – С. 95–101.

References (transliterated):

1. Choi, S.K., Chun, M.S., Van Tyne, C.J., & Moon, Y.H. Optimization of Open-Die Forging of Round Shapes Using FEM Analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1 (2006), pp. 88–95. Advanced Steel Processing and Products Research Center, Colorado School of Mines, USA.
2. Danchenko V.M., Hrynkevych V.O., Holovko O.M. Teoriia protsesiv obrobky metaliv tyskom. - Dnipropetrovsk: Porohy, 2008. - 370 s.
3. Kalchenko P.P., Markov O.E. Novye tekhnolohycheskye protsessy kovky krupnykh pressovykh pokovok. - Kramatorsk: DHMA, 2014. - 100 s.
4. Dyja H., Banaszek G., Mroz S., Berski S. Modelling of shape anvils in free hot forging of long products. - *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 157–158. - r. 131–137.
5. Cockcroft M.G., Latham D.J. “Ductility and workability of metals”, - *Inst Metals*, T. 96, №1, - p. 33-39.
6. Diachenko S.S. Fizychni osnovy mitsnosti ta plastychnosti metaliv: navch. posib. - Kharkiv: Vydavnytstvo KhNADU, 2003. - 226 s.
7. Huda Z. Metal forming processes: fundamentals, analysis, calculations. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2024. – 307 r.
8. Švajger M. Open die forging technology with failure analysis, – Ljubljana: SMR Premium GmbH; Infodoc S.r.l., 2023. – 207 p.

9. K.G. Kakandikar, A. Agrawal, D.R. Kumar. Metal forming processes: developments in experimental and numerical approaches – Boca Raton: CRC Press, 2022. – 338 p.
10. Reinisch, N., Rudolph, F., Günther, S., Bailly, D., Hirt, G. Successful pass schedule design in open-die forging using double deep Q learning // Processes. – 2021. – Vol. 9, No. 7. – Article 1084.
11. Tekhnolohichni protsesy za fakhom. Kuvannia i shtampuvannia : navchalnyi posibnyk / V.V. Kukhar, B.S. Karhin, O.S. Anishchenko, S.B. Karhin, A.H. Prysiaznyi. – Mariupol : PDTU, 2017. – 144 s.
12. Emerging Trend in Forging Operation Omolayo M. Ikumapayi, Esther T. Akinlabi, and Peter Onu (https://www.researchgate.net/publication/344006048_Emerging_Trend_in_Forging_Operation)
13. Yakist metaloproduksii navch. posibnyk / Ye. I. Shyfrin, Ye. I. Sokol, V. L. Chukhlib [ta in.] ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Kharkiv, 2025. – 415 s.
14. Kuvannia i hariache obiemne shtampuvannia: Metodychni rekomendatsii / Nosulenko V. I., Mirzak V. Ya. ; Minosvity i nauky Ukrainy, Tsentralnoukrainskyi nats. tekhn. un-t, kaf. obrobky metaliv tyskom ta spetstekhnolohii. – Kropyvnytskyi : TsNTU, 2019. – 66 s.
15. Di Schino A. Open-die forging process simulation: a simplified industrial approach based on artificial neural network // AIMS Materials Science. – 2021. – №8(5): - r. 685–697.
16. Markov O., Khvashchynskyi A., Musorin A., Markova M., Lysenko A. Doslidzhennia novoho sposobu kuvannia velykykh zlyvkiv na osnovi osadzhennia profilovanykh zahotovok / O. Markov, A. Khvashchynskyi, A. Musorin, M. Markova, A. Lysenko // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. - 2022. - № 1 (27). - S. 45-53r.
17. Ebrahimi R, Najafizadeh A (2004) A new method for evaluation of friction in bulk metal forming. J Mater Process Technol 152(2):136–143 r.
18. Aftandilants Ye.H., Zazymko O.V., Pokhylenko H.M. Tekhnolohiia obrobky metaliv i splaviv tyskom. - Vydavnychiy tsentr NUBiP, Kyiv, 2020.– 60s.
19. Sivak R.I. "Rozvytok naukovykh osnov mekhaniky nemonotonnoho plastychnoho deformuvannia ta udoskonalennia tekhnolohichnykh protsesiv obrobky metaliv tyskom" - Avtoreferat dysertatsii na здобuttia naukovoho stupenia doktora tekhnichnykh nauk - Vinnytsia, 2018, 43s.
20. Qform UK. URL: <https://www.qform3d.com/> (accessed June 01, 2025).
21. Wang B., Han Y., Zeng W., Zhai Y. Improving the deformation uniformity within forgings by applying preform optimization based on FEM. Journal of Materials Processing Technology, 2015, Vol. 223. - pp. 285–293.
22. Wolfgarten, M., Merklein, M., and Hirt, G. Analysis of Process Forces and Geometrical Correlations for Open-Die Forging with Superimposed Manipulator Displacements. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 276 (2020), Article No. 116408.
23. Chukhlib V. L., Ashkelianets A. V., Hubsnyi S. O., Petrov O. V., Duvanskyi O. M., Paliienko V. O., Okun A. O. Rozrobka tekhnolohichnoi kontseptsii proiektuvannia protsesiv kuvannia z urakhuvanniam vplyvu rezhymu deformuvannia na yakist pokovok // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Hidravlichni mashyny ta hidropnyvody. – 2021. – № 1 (1323). – S. 95–101.

Надійшла (received) 12.11.2025

Відомості про авторів

Доля Володимир Сергійович (Dolia Volodymyr) - магістрант кафедри "Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском" Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: volodymyr.dolia@mit.khpi.edu.ua, ORCID: 0009-0000-7354-2300

Чухліб Віталій Леонідович (Chukhlib Vitalij) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; e-mail: profdnepro@gmail.com

Бобров Олександр Геннадійович (Bobrov Oleksandr)- Старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету озброєння та військової техніки Військового інституту танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: bobrov_ag@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8840-6405 .

Таран Ольга Василівна (Taran Olha) - Старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету озброєння та військової техніки Військового інституту танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: olga_taran@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9143-5821.