

РОЗДІЛ I МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ТИСКОМ

УДК 621.735.3

DOI: 10.37142/2076-2151/2023-1(51)3

Марков О. Є.
Хващинський А. С.
Мусорін А. В.
Лисенко А. А.

ДОСЛІДЖЕННЯ МСЕ СПОСОБУ ПРОТЯЖКИ ПУСТОТІЛИХ ПОКОВОК З ДНОМ БЕЗ ОПРАВКИ

Досліджено спосіб протягування товстостінних пустотілих заготовок. Запропонований спосіб полягає в деформуванні пустотілої заготовки без оправки. Розроблено методіку проведення теоретичних досліджень МСЕ. Методика призначена для визначення теплового, деформованого стану та формозміни заготовки при деформуванні пустотілих заготовок без використання оправки. Змінними параметрами були внутрішній діаметр пустотілої заготовки, який варіювався в інтервалі 0.30; 0.55; 0.80. На основі скінчено-елементного моделювання були встановлені: розподіл температур і інтенсивності логарифмічних деформацій в об'ємі пустотілої загото

вки після протягування без використання оправки. Визначався діаметр отвору пустотілої заготовки, який утворюється при протягуванні даним способом. Встановлювалися залежності інтенсивності подовження і потовщення стінки пустотілої заготовки. Був розроблений спеціальний показник для оцінювання подовження пустотілої заготовки. Було визначено, що при збільшенні внутрішнього діаметру подовження пустотілої заготовки збільшується та знижується інтенсивність зменшення отвору. Загальною залежністю змодельованих схем протягування є те, що величина подовження пустотілої заготовки несуттєво змінюється для різних ступенів обтискань при сталих відносних розмірах пустотілої заготовки. Це дозволило встановити рекомендовану подачу для збільшення подовження пустотілої поковки та зменшення ступеня закриття отвору. Раціональна подача повинна складати $(0.05...0.15)D$. Результати скінчено-елементного моделювання перевірялися експериментальними дослідженнями на свинцевих зразках. Була запропонована методіка експериментального моделювання. Встановлено, що при внутрішньому діаметрі заготовки $(0.5...0.6)D$, спостерігається максимум потовщення стінки. Встановлено, що результати з формозмінення заготовки, які отримані у теоретичному дослідженні МСЕ, на 9...14 % більше за експериментальні. Достовірність результатів теоретичного моделювання підтверджується даними експерименту зі зменшення внутрішнього діаметру пустотілої заготовки. Різниця теоретичних результатів й експериментальних складає 9...12 %. Встановлені закономірності дають можливість визначати остаточний діаметр отвору пустотілої заготовки. За результатами моделювання встановлено, що протягування трубних заготовок без оправки цілком можливе. Цей спосіб розширює можливості техпроцесів виготовлення трубних заготовок

Ключові слова: товстостінна заготовка, протягування, деформування, заковування отвору, МСЕ, напружений стан, деформований стан

Пріоритетним завданням розвитку енергетичного машинобудування є зниження собівартості деталей та підвищення їх механічних властивостей [1–3]. До цих деталей належать товстостінні пустотілі заготовки. Ці поковки необхідно виготовляти деформуванням на оправці. Однак товстостінні пустотілі заготовки виготовляються з суцільних валів із використанням операції висвердлювання отвору [4]. В результаті збільшується час механічної обробки, підвищуються витрати металу і відбувається перерізання волокна. Це пов'язано з тим, що при довжині пустотілих заготовок більш 400 мм та діаметрі отвору менше 30 мм використання оправки під час протягування неможливо [5]. Тому проблема виготовлення заготовок товстостінних пустотілих заготовок на сьогодні є актуальною, яка потребує всебічного аналізу та удосконалення [6].

У роботі [7] на основі використанням енергетичного методу розроблена модель для встановлення осьової витяжки заготовки при деформуванні трубних заготовок на радіально-

кувальних машинах. Авторами роботи визначено вплив обтискання та подачі пустотілої заготовки на силу та змінення профілю в меридіональному перерізі пустотілі заготовки. Однак встановлена модель не дозволяє встановити поперечну деформацію металу при деформуванні, що потребує розв'язок задачі у 3D постановці.

У статті [8] запропоновано техпроцес деформування пустотілих заготовок, в якому отриману заготовку підігрівають і доштамповують. Використання додаткового штампового оснащення забезпечує умови, при яких метал заготовки плине в центральній частині.

У дослідженні [9] з використанням скінчено-елементного аналізу здійснили дослідження техпроцесу деформування пустотілих заготовок без використання ковальської оправки. На основі результатів моделювання встановлено, що розроблений техпроцес можна використовувати при незначній подачі заготовки в інструмент. Деформування без використання ковальської оправки при значних осьових подачах підвищує рівень осової сили, яка може призвести до утворення розривів.

На основі результатів роботи [10] встановлена тривимірна модель техпроцесу протягування пустотілих заготовок з використанням оправки методом скінчених елементів (МСЕ) і проаналізовано деформований стан пустотілої заготовки при протягуванні. Доведена раціональність способу обтискання з чотирьох сторін пустотілих заготовок з внутрішньою оправкою. Визначено, що кут повороту пустотілої заготовки не оказує вирішального впливу на змінення форми виробу. Встановлено, що протягування пустотілих заготовок з невеликим отвором із використанням оправки неможливе, що пояснюється викривленням тонкої оправки та складністю її витягування з поковки.

У роботі [11] експериментально досліджували способи радіального деформування трубних заготовок. Досліджуваний спосіб передбачав удосконалення оснащення для можливості протягування не на молотах, а на гідравлічних пресах. У роботі встановлена закономірність змінення стінки трубної заготовки при протягуванні.

У роботі [12] отримані результати, щодо протягування пустотілих заготовок без використання ковальської оправки. Встановлено, що відсутність оправки сприяє зменшенню отвору і слабкому подовженню пустотілі заготовки. Експериментальні дані способів протягування без використання оправки дозволили визначити, що утворювана різнотовщинність уздовж стінки пустотілої заготовки складала близько 2 %. Однак у роботі відсутні данні щодо впливу форми та розмірів ковальських бойків на подовження пустотілої заготовки при деформуванні без оправки.

У роботі [13] встановлювався вплив геометрії деформуючого інструменту на деформований та напружений стан у процесі деформування пустотілих заготовок на оправці. Встановлено, що для виготовлення пустотілої поковки із максимальною рівномірністю розподілу інтенсивностей деформацій та механічних характеристик уздовж стінки заготовки доцільно використовувати деформуючий інструмент з випуклою поверхнею. За результатами експериментального моделювання способу деформування пустотілих заготовок на радіально-кувальних машинах встановлено, що досліджуваний процес дає можливість збільшити міцність і в'язкість металу [14]. Автором роботи встановлена залежність для визначення осової, радіальної та окружної деформації заготовки. Визначено вплив обтискання на технологічні режими протягування з використанням оправки. Однак у роботах [13, 14] не встановлено вплив способу деформування на утворення текстури, що збільшує анізотропію механічних характеристик матеріалу.

Аналіз літератури дозволив визначити, що проблема виготовлення товстостінних пустотілих заготовок з дном на сьогодні остаточно не вирішена. Найпрогресивнішими методами визначені способи протягування без використання оправки. Але НДС та формозмінення отвору пустотілої заготовки у процесі протягування без використання оправки не встановлені. Тому потрібно удосконалити та дослідити процеси протягування пустотілих заготовок без використання оправки. Розробка нових техпроцесів деформування пустотілих заготовок без використання ковальської оправки потребує проведення комплексного моделювання і розробки рекомендацій для їх реалізації.

Мета роботи – розробка процесу деформування товстостінних пустотілих заготовок з дном без використання ковальської оправки для зменшення часу та витрат металу при механічній обробці пустотілих заготовок відповідального призначення.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені наступні задачі:

– розробити методику теоретичних досліджень процесів деформування пустотілих заготовок з дном без оправки;

– встановити тепловий, деформований стан та визначити вплив внутрішнього діаметру пустотілої заготовки на змінення її довжини та визначити закономірності зміни відносної товщини стінки трубної заготовки при деформуванні без використання оправки.

Моделювання зміни форми, теплового стану заготовки та деформованого при деформуванні без використання оправки реалізувалося на основі МСЕ з використанням програмного продукту Deform 3D. В якості матеріалу обрана сталь 40X, температурний інтервал обробки тиском 1180...790 °С. Коефіцієнт Пуассона приймався 0,3, модуль пружності Юнга першого роду 2×10^5 МПа. Температура нагріву заготовки $t = 1180$ °С, швидкість руху деформуючого інструмента $v = 30$ мм/с; діаметр пустотілої заготовки $D = 1,0$ м. Внутрішній діаметру у відносному співвідношенні (d_0/D) дорівнював 0.30, 0.55, 0.80. Схема процесу деформування наведена на рис. 1. Довжина пустотілих заготовок варіювалась у діапазоні 288, 330 та 480 мм. Для кантування та утримання заготовки при деформуванні була призначена технологічна цапфа.

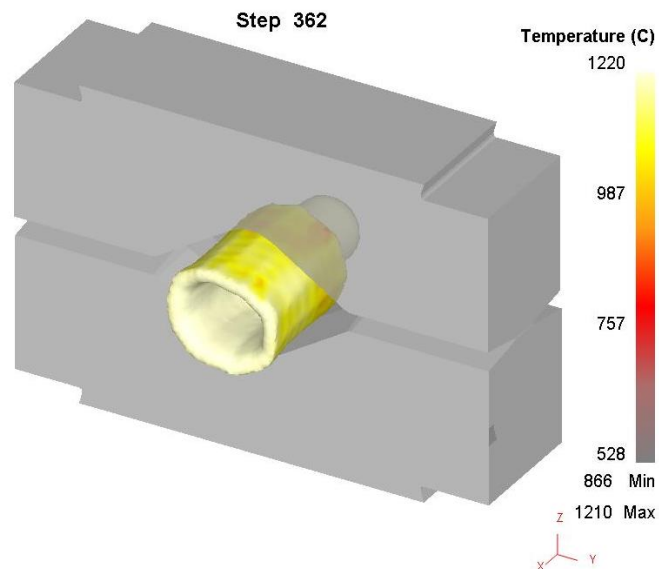


Рис. 1. 3D модель процесу протягування пустотілих заготовок без оправки

Був удосконалений техпроцес деформування пустотілих заготовок без використання ковальської оправки, яка передбачала операції прошивання та протягування. Остаточне протягування заготовок проводиться без використання оправки. На сьогодні даний метод є малодослідженим, крім цього, немає рекомендації для впровадження цього способу деформування.

Зміна форми трубних заготовок при деформуванні без використання ковальської оправки залежить від деформованого стану (ДС). ДС залежить від форми та розмірів деформуючого інструменту та параметрів деформування. Процес протягування пустотілих заготовок без використання оправки реалізується зі збільшенням стінки пустотілої заготовки. Тому для визначення закономірностей змінення внутрішнього діаметру трубної заготовки слід дослідити вплив протягування пустотілих заготовок бойками з вирізами.

Для точного встановлення ДС слід визначити розподіл температур поковки при деформуванні. Розподіл температур після деформування дозволить визначити потрібну кількість підігрівань. Розподіл температур у заготовці визначався МСЕ.

Аналіз даних розподілу температур у тілі заготовки після деформування на 20 % визначив, що перепад температур за об'ємом відповідає температурному діапазону деформування сталі 40X для досліджуваних розмірів пустотілої заготовки (рис. 2). Середній перепад температур в об'ємі поковки становить 350 °С. В результаті кількість нагрівань у порівнянні з базовою технологією знизилась з двох до одного нагріву. Встановлені результати можна пояснити тим, що при деформуванні без використання оправки не відбувається відвід теплової енергії у бік охолоджувальної оправки, як при базовому способі деформування. В результаті розширюються технічні можливості деформування трубних заготовок в наслідок збільшення кількості натискань за один нагрів.

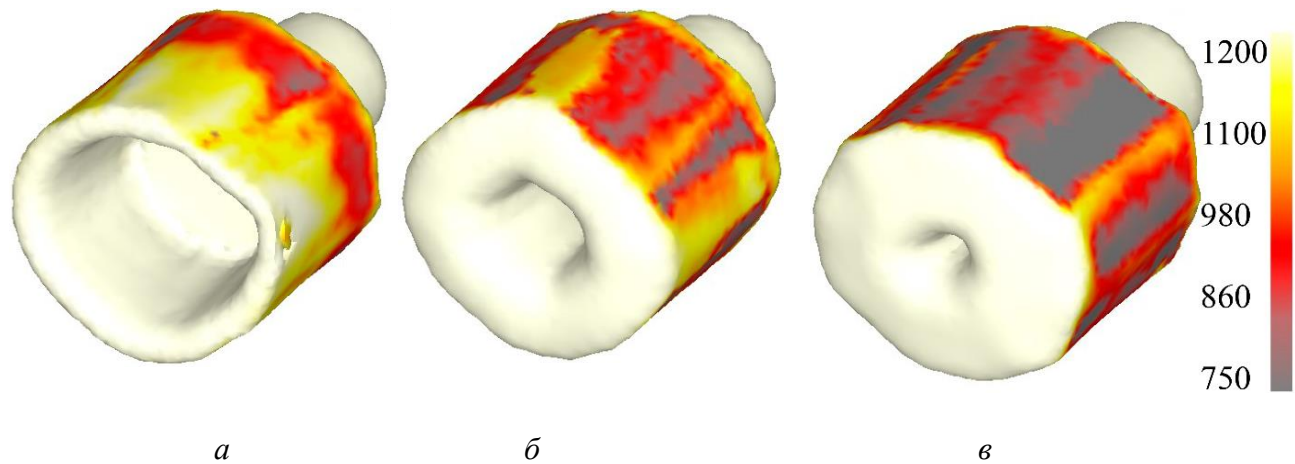


Рис. 2. Розподіл температур після деформування без використання оправки для різних внутрішніх діаметрів (d_0/D): а – 0.80; б – 0.55; в – 0.30

При деформуванні змінюється поперечний переріз заготовки. При зростанні перерізу заготовки до деформації і при однаковому ступені обтискання довжина після деформування заготовки буде збільшуватися (згідно закону сталості об'єму).

Було проведено дослідження процесу деформування пустотілих заготовок без використання оправки бойками з вирізом 115° та подачею 50 % від вихідного діаметру заготовки (рис. 3). Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що при деформуванні без використання оправки зменшується отвір пустотілої заготовки (рис. 4). Зменшення внутрішнього діаметру складається зі збільшення стінки та зменшення зовнішнього діаметру.

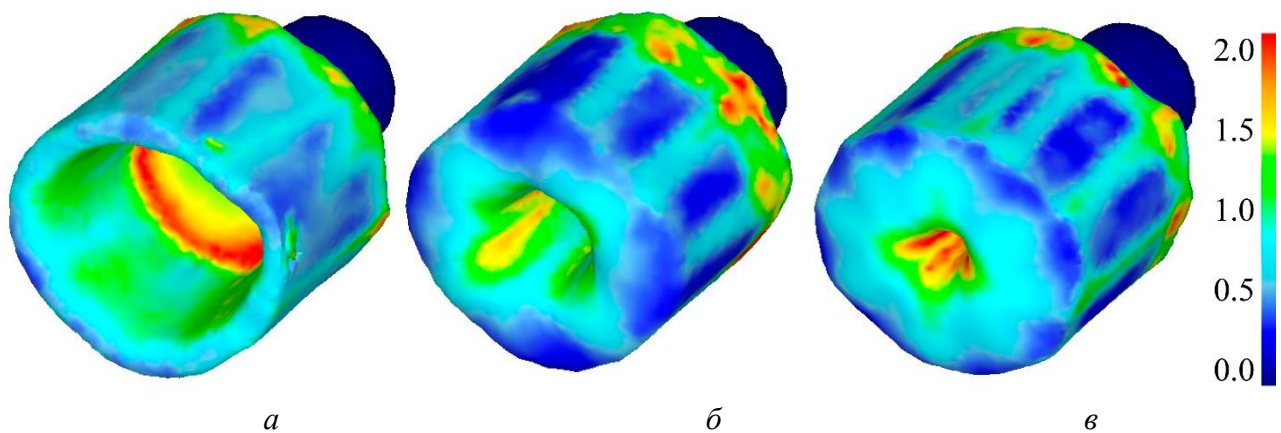


Рис. 3. Деформований стан після деформування без оправки для заготовок з внутрішнім діаметром (d_0/D): а – 0.80; б – 0.55; в – 0.30

При обтисканні заготовки з рівними зовнішніми діаметрами на однакову деформацію, зменшення внутрішнього діаметра визначається потовщенням стінки пустотілої заготовки. При протягуванні без використання ковальської оправки визначено вплив внутрішнього діаметру заготовки (d_0/D) на її подовження (рис. 4). Визначено, що при збільшенні внутрішнього діаметру заготовки зростає поковочний внутрішній діаметр. Одночасно зменшується подовження заготовки (ψ).

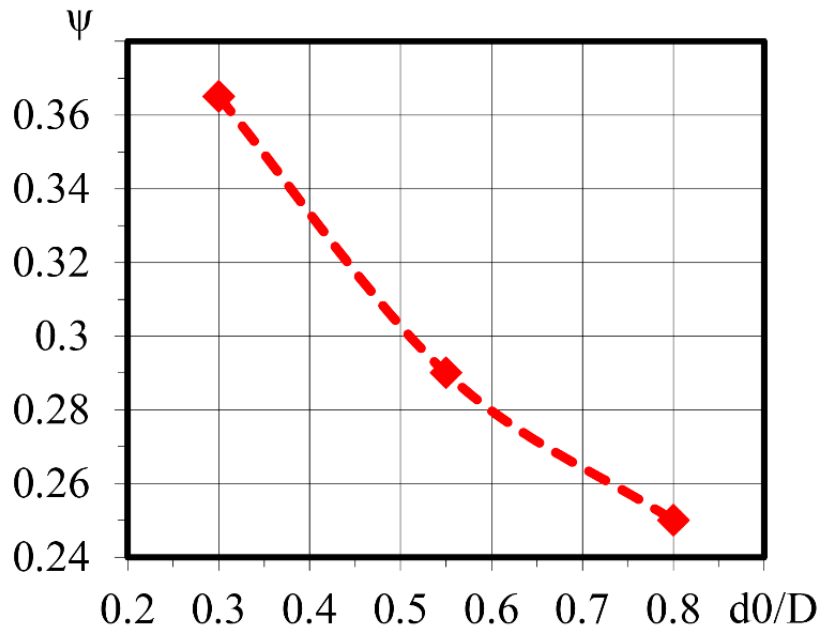


Рис. 4. Залежність подовження заготовки від відносного внутрішнього діаметра при обтисканні пустотілої заготовки на 20 %

Змінення внутрішнього діаметру для різних розмірів заготовки, слід проводити на базі параметра, який враховує подовження. Цей параметр визначається відношенням різниці площ заготовки до деформації та поковки до площі, яка обтискається

$$f = \frac{F_0 - F_K}{F_{обт}} = \frac{(D^2 - d_0^2) - (D_K^2 - d_1^2)}{D^2 - D_K^2},$$

де F_0 , F_K – початкова та кінцева площа поперечного перерізу заготовки; $F_{обт}$ – площа поперечного перерізу заготовки, що обтискається; D , d_0 – зовнішній та внутрішній діаметри вихідної заготовки; D_K , d_1 – зовнішній та внутрішній діаметри поковки.

Запропонований показник дозволяє встановити подовження пустотілої заготовки при різній деформації трубної заготовки. Інакше кажучи цей параметр показує частину площі трубної заготовки що обтискається, яка спричинює подовження пустотілої заготовки. Коли $f \rightarrow 0$ подовження пустотілої заготовки не відбувається. Коли $f \rightarrow 1$ ($F_0 - F_K = F_{обт}$) вся зміна площі направлена на збільшення подовження пустотілої заготовки.

Деформування пустотілих заготовок звичайними бойками не призводить до помітного подовження пустотілої заготовки. Збільшення внутрішнього діаметру пустотілої заготовки призводить до зменшення довжини. Це можна пояснити таким чином – при значних внутрішніх діаметрах та тонких стінках метал буде текти у напрямку потовщення стінки поковки, ніж на збільшення її довжини. В результаті слід удосконалити спосіб протягування пустотілих заготовок без використання ковальської оправки для збільшення довжини поковки.

Розроблено новий спосіб протягування пустотілих заготовок без використання оправки. Встановлено розподіл температур, деформацій при протягуванні без використання

оправки. Одержані результати дозволили визначити раціональні геометричні параметри трубної заготовки до деформування без використання оправки, а також переваги перед існуючими способами протягування пустотілих виробів:

– при деформуванні без оправки змінюється розподіл температур та деформацій трубної заготовки. В результаті при обтисканні метал тече не тільки у поздовжньому напрямку, але й поперек осі поковки;

– запропоновано параметр подовження трубної заготовки, що визначає швидкість подовження трубної заготовки над швидкістю потовщення стінки, який дозволяє оцінити формозмінення заготовки при протягуванні без використання оправки.

До обмежень розробленого способу деформування товстостінних пустотілих заготовок слід віднести те, що деформування без використання оправки призводить до течії металу поперек осі пустотілої заготовки, що приводить до подовшення стінки та ускладнення керованості формозміни заготовки. Це потребує точно витримувати задані режими деформування.

Встановлені в роботі рекомендації по геометричним параметрам заготовок є значущими науково-практичними напрацюваннями, які можна використовувати в теорії та технології процесів деформування пустотілих виробів без використання оправки.

ВИСНОВКИ

Визначено, що перепад температур в об'ємі поковки не виходить за границі гарячої обробки тиском. Середній перепад температури в об'ємі поковки становить 350 °С. В результаті кількість нагрівань при остаточному протягуванні у порівнянні з базовою технологією деформування знизилась з 2 до 1 нагріву. Визначено, що при збільшенні внутрішнього діаметру заготовки подовження збільшується та зменшується заковування отвору. Загальна залежність змодельованих процесів деформування – подовження відбувається незначно при різних рівнях деформування для фіксованих розмірів трубної заготовки. Це дозволило встановити рекомендовану подачу і зменшення заковування внутрішнього діаметру.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Markov O., Zlygoriev V., Gerasimenko O., Hrudkina N., Shevtsov S. Improving the quality of forgings based on upsetting the workpieces with concave facets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 5(1-95). pp. 16-24. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142674>
2. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A., Kosilov M. Development of a new process for expanding stepped tapered rings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 2. pp. 16-24. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160395>
3. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. 2. pp. 52–60. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00877>
4. Baoguang S., Xiuhong K., Dianzhong L. A novel technique for reducing macrosegregation in heavy steel ingots. *J. Materials Processing Technology*. 2010. 210. pp. 703–711.
5. Zhu Baiqing, Lu Haixing, Tong Yifei, Li Dongbo, Xia Yong Research on Charging Combination Based on Batch Weight Fit Rule for Energy Saving in Forging. *Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2015. Article ID 531756, 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/531756>
6. Kun Chen, Yitao Yang, Guangjie Shao Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot. *Computational Materials Science*. 2012. 51. pp. 72–77.
7. Yunjian Wu, Xianghuai Dong, Qiong Yu Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 93 (2015). pp. 102–110.
8. Sizek H. W. Radial Forging . *Metalworking : Bulk Forming*. 2005. pp. 172–178.
9. Ghaei A., Movahhedy M.R., Karimi A. Taheri Ghaei, A. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel. *Materials & Design*. 2008. 29. pp. 867–872.
10. Fan L., Zhigang Wang, He Wang 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014. 16. pp. 329–334.
11. Burkin S. P., Korshunov E. A., Kolmogorov V. L., Babailov N. A., Nalesnik V. M. A vertical automated forging center for the plastic deformation of continuouslycast ingots. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. 58. Pp. 170–173.

12. Qi Zhang, Kaiqiang Jin, Dong mu, Pengju Ma, Tian Jie Rotary swaging forming process of tube workpieces. *11th International Conference on Technology of Plasticity*. ICTP 2014, 1924 October 2014. Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. *Procedia Engineering*. 81 (2014). pp. 2336–2341.
13. Sanjari M., Saidi P., Karimi A. Taheri, Hossein Zadeh M. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test. *Materials and Design*. 2012. 38. pp. 147–153.
14. Wang Z. G. The theory analysis and numerical simulation for the radial forging process of gun barrel. *Nanjing University of Science and Technology*. 2011. pp. 28–30.

Markov O., Khvashchynskiy A., Musorin A., Lysenko A. FEM study of the drawing method of hollow forgings with a bottom without a mandrel.

The method of drawing thick-walled hollow billets has been studied. The proposed method consists in the deformation of a hollow billet without a mandrel. A technique for conducting theoretical studies of the FEM has been developed. The technique is designed to determine the thermal, deformed state and shape change of the workpiece when forging hollow workpieces without using a mandrel. The variable parameters were the inner diameter of the hollow billet, which varied in the range of 0.30; 0.55; 0.80. On the basis of finite element modeling, the following were established: the distribution of temperatures and the intensity of logarithmic deformations in the volume of the pipe after drawing without using a mandrel. The diameter of the pipe hole, which is formed when broached by this method, was determined. The dependences of the intensity of elongation and thickening of the pipe wall were established. A special indicator has been developed to evaluate pipe elongation. It was determined that with an increase in the inner diameter, the elongation of the pipe increases and the intensity of the forging of the hole decreases. The general dependence of the simulated broach schemes is that the value of elongation of the hollow billet does not change significantly for different degrees of compression at constant relative dimensions of the pipe. This made it possible to set the recommended feed to increase the elongation of the hollow forging and reduce the degree of hole closure. The rational feed should be $(0.05...0.15)D$. The results of finite element modeling were verified by experimental studies on lead samples. An experimental modeling technique was developed. It has been established that at the inner diameter of the billet $(0.5...0.6)D$, there is a maximum wall thickening. It has been established that the results of the workpiece shaping, obtained in the theoretical study of the FEM, are 9...14% more than the experimental ones. The reliability of the results of theoretical modeling is confirmed by experimental data on reducing the inner diameter of the pipe. The difference between theoretical and experimental results is 9...12%. The established regularities make it possible to determine the final diameter of the pipe hole. Based on the simulation results, it was found that drawing pipe billets without a mandrel is possible. This method expands the possibilities of technical processes for the manufacture of pipe blanks.

Keywords: thick-walled workpiece, drawing, deformation, hole forging, FEM, stressed state, deformed state.

Марков Олег Євгенійович – д-р техн. наук, зав. каф. АВП ДДМА

Markov Oleg – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department DSEA

E-mail: oleg.markov.ond@gmail.com

ORCID: [0000-0002-2467-9607](https://orcid.org/0000-0002-2467-9607)

Хвощинський Антон Станіславович – аспірант ДДМА

Khvashchynskiy Anton – post graduate DSEA

E-mail: antonio.hvashherman@ukr.net

ORCID: [0000-0002-2690-8354](https://orcid.org/0000-0002-2690-8354)

Мусорін Антон Володимирович – аспірант ДДМА

Musorin Anton – post graduate DSEA

E-mail: anton.m.95@mail.ru

ORCID: [0000-0002-4145-9665](https://orcid.org/0000-0002-4145-9665)

Лисенко Антон Андрійович – аспірант ДДМА

Lysenko Anton – post graduate DSEA

E-mail: antl31@ukr.net

ORCID: [0000-0001-5454-6357](https://orcid.org/0000-0001-5454-6357)

Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), м. Краматорськ

Donbas State Engineering Academy (DSEA), Kramatorsk

Стаття поступила в редакцію 10.08.23 з.