

РОЗДІЛ II ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.735.3

DOI: 10.37142/2076-2151/2024-1(53)53

Марков О. Є.
Шевцов С. А.
Алдохін М. Д.
Панов В. В.
Ровенский С. Г.

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ ОБКОЧУВАННЯ СНАРЯДІВ З ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ

Робота спрямована на розв'язання актуальної технічної та наукової проблеми щодо удосконалення технологічних процесів виробництва заготовок для деталей типу артилерійських гільз на базі застосування операції тангенціального обкочування інструментом тертя, що дають можливість виготовляти пустотілі деталі з дном. Методом скінчених елементів проводилося моделювання технологічного процесу обкочування днища інструментом тертя, що дало можливість визначити раціональну форму та розміри трубних заготовок, що обкочувалися, і температуру їх попереднього нагрівання. Розроблено рекомендації щодо проектування енергозберігаючих технологічних процесів обкочування деталей типу гільз, що дозволяють встановити товщину стінки трубної заготовки перед обкочуванням, температуру нагріву пустотілих заготовок, а також величину відносної подачі заготовки до інструменту тертя. Встановлені рекомендації було перевірено експериментальними дослідженнями на сталевих заготовках. За результатами досліджень було встановлено, що обкочування сферичних днищ треба реалізовувати для трубних заготовок з відносною товщиною стінки (D/s), яка знаходиться в діапазоні 15...20. Гомологічна температура нагріву пустотілої заготовки становила 0,8, а відносна подача трубної заготовки в інструмент тертя склала 0,9. Апробація визначених співвідношень у лабораторних умовах довела, що встановлені рекомендації щодо змінення форми та розмірів сферичних днищ у процесі тангенціального обкочування інструментом тертя. Виявлені у роботі закономірності формозмінення заготовки розширили технологічні можливості процесу тангенціального обкочування днищ та дозволили встановити можливості досліджуємого процесу. Результати макроструктурних досліджень на сталевих виробках підтвердили результати скінчено-елементного моделювання про вплив тангенціального обкочування сферичного днища на підпор в осьовій зоні. За результатами досліджень було встановлено, що використовувати цей спосіб можна для виробів, що мають дно з осьовим отвором (артилерійські гільзи, гідроциліндри та ін.). Осьові дефекти в цьому разі будуть видалятися при висвердлювання осьового отвору.

Ключові слова: деформація, трубна заготовка, обкочування, нагрів, днище, інструмент тертя, МСЕ

У сучасних умовах важливим питанням для України є розвиток машинобудування для виготовлення продукції подвійного призначення з одночасним підвищенням якості та зниження собівартості виробленої металопродукції [1–3]. Всі подібні деталі відносяться до виробів відповідального призначення і значна частина їх виробляється способами гарячого пластичного деформування [4]. Особливе місце серед цих виробів займають тонкостінні деталі з дном (газові балони, корпуси вогнегасників, корпуси гідроциліндрів, артилерійські гільзи та ін.). Ці вироби мають специфічну форму і складаються з кількох частин (пустотілий корпус, днище та горловина), які зварюються. Собівартість зазначених виробів висока. Виготовлені таким способом деталі не гарантують високої надійності з'єднання металу днища та корпусу балона [5]. В результаті ударна в'язкість та міцність металу балона у зоні зварного шва залишаються низькими. У умовах роботи можливий обрив днища виробу під впливом високого тиску.

З використанням енергетичного методу авторами роботи [6] встановлено модель визначення поздовжньої деформації металу у процесі радіального обкочування. Запропонована модель дозволяє встановлювати силу деформування в залежності від ступеня обтиску. Однак запропонована модель не дозволяє встановлювати радіальний плин матеріалу під час деформації, що потребує вирішення завдання у тривимірній постановці.

Н. W. Sizek розробив технологію виготовлення складнопрофільованих пустотілих виробів, в якій частину заготовки нагрівають та деформують у штампі [7]. Поєднання торцевого та радіального деформування забезпечує перебіг металу в центральних частинах заготовки. Після висадки ступінчастого профілю вісь виробу формується з використанням оправки, а це значно ускладнює процес виробництва.

А. Ghaei та ін. методом скінчених елементів (МСЕ) здійснили моделювання процесу радіального деформування труб [8]. Аналіз отриманих результатів дозволили встановити, що цей процес ефективний при малих осьових подачах. Осьові напруження на внутрішній поверхні пустотілої заготовки призводять до тріщиноутворення внаслідок появи розтягуючих напружень [9]. За результатами моделювання МСЕ в роботі [10] було встановлено 3D-модель процесу радіальної деформації трубних заготовок та проведено аналіз напружено-деформованого стану (НДС) заготовки. Доведено ефективність процесу всебічного деформування трубної заготовки. Однак деформування порожнистих заготовок даним способом ускладнює конструкцію обладнання [11].

S. P. Vurkin та співавтори досліджували експериментальними методами радіальне деформування трубних заготовок [12]. Цей спосіб є новим підходом до вдосконалення обладнання для забезпечення оптимальної конструкції та відмови від деформування на молотах. У роботі [13] було встановлено вплив геометрії деформуючого інструменту на НДС заготовки у процесі деформування. За результатами робіт було встановлено, що для забезпечення мінімальної неоднорідності механічних властивостей завтовшки стінки доцільно використовувати інструмент із опуклою геометрією.

F. Knauf із співавторами моделювали процес обтиску труб [14]. Були деформовані труби різного діаметра з різною товщиною стінки. Обтискання труб проводили чотирма інструментами, що дозволило направити течію металу в осьовому напрямку. У роботі R. Korpensteiner із співавторами встановлено вплив способу деформування на ефективність опрацювання при обтиску довгомірних заготовок з використанням різної геометрії інструменту [15]. Було встановлено, що в цьому випадку можна отримати рівномірні механічні властивості в поздовжньому та поперечному напрямках.

Мета роботи – дослідження якості днищ гільз, що виготовляються із трубчастих заготовок на основі ротаційного обкочування інструментом тертя (ІТ) та можливості їх застосування для серійного виробництва.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання: 1. Встановити ефективну температуру нагрівання заготовок перед обкаткою ІТ, яка сприятиме заварюванню отвору днища і не призводитиме до перегріву та перепалу металу заготовки. 2. Визначити відносну подачу заготовки в ІТ перед обкаткою, яка сприятиме закриттю отвору днища. 3. Встановити раціональну відносну товщину стінки труби (D/s) для виготовлення днищ із меншими витратами металу. 4. Провести експериментальні дослідження нового технологічного процесу тангенційного обкочування ІТ сферичного днища. Провести металографічні дослідження днища гільзи. Зробити висновок про можливість виготовлення цим способом деталей типу гільз.

Дослідження процесу проводилося за різних початкових гомологічних температурах ($t_{\text{ном}}$) в діапазоні 0,6; 0,7 та 0,8. Відносна товщина стінки труби (D/s) варіювалася в діапазоні 10; 15; 20. Відносна подача заготовки в ІТ (l/D) становила 0,8 і була постійною. Тепловий стан заготовки у процесі обкочування було встановлено з допомогою МСЕ (рис. 1). Аналіз результатів розподілу температур у поздовжньому перерізі дозволив встановити, що температура розподіляється нерівномірно за перерізом заготовки. Максимальний розігрів заготовки локалізується в осьовій зоні днища, що пояснюється тривалим контактом заготовки з ІТ та максимальним накопиченням деформації у цій зоні. Мінімальну температуру має заготовка у місці захоплення патроном верстата. Такий розподіл температур можна пояснити максимальним розігрівом днища труби та інтенсивним охолодженням заготовки з боку захоплення верстата, а також нерівномірним початковим нагріванням. За перерізом пустотілої заготовки при тангенціальному обкочуванні ІТ градієнт температур не виходить за межі температурного інтервалу

гарячої обробки тиском для співвідношень змодельованих розмірів заготовки. Визначення раціональних режимів потребує встановлення напруженого стану заготовки у процесі тангенціального обкочування. Після встановлення розподілу температур було визначено розподіл середніх напружень за об'ємом заготовки після обкочування (рис. 2).

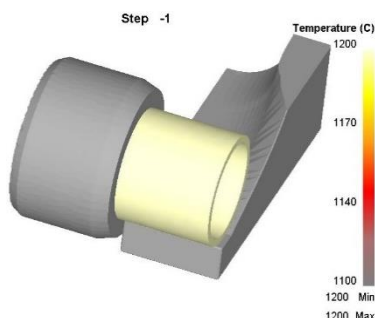


Рис. 1. Скінчено-елементна модель процесу тангенціального обкочування ІТ відносною товщиною стінки при постійній подачі заготовки в ІТ

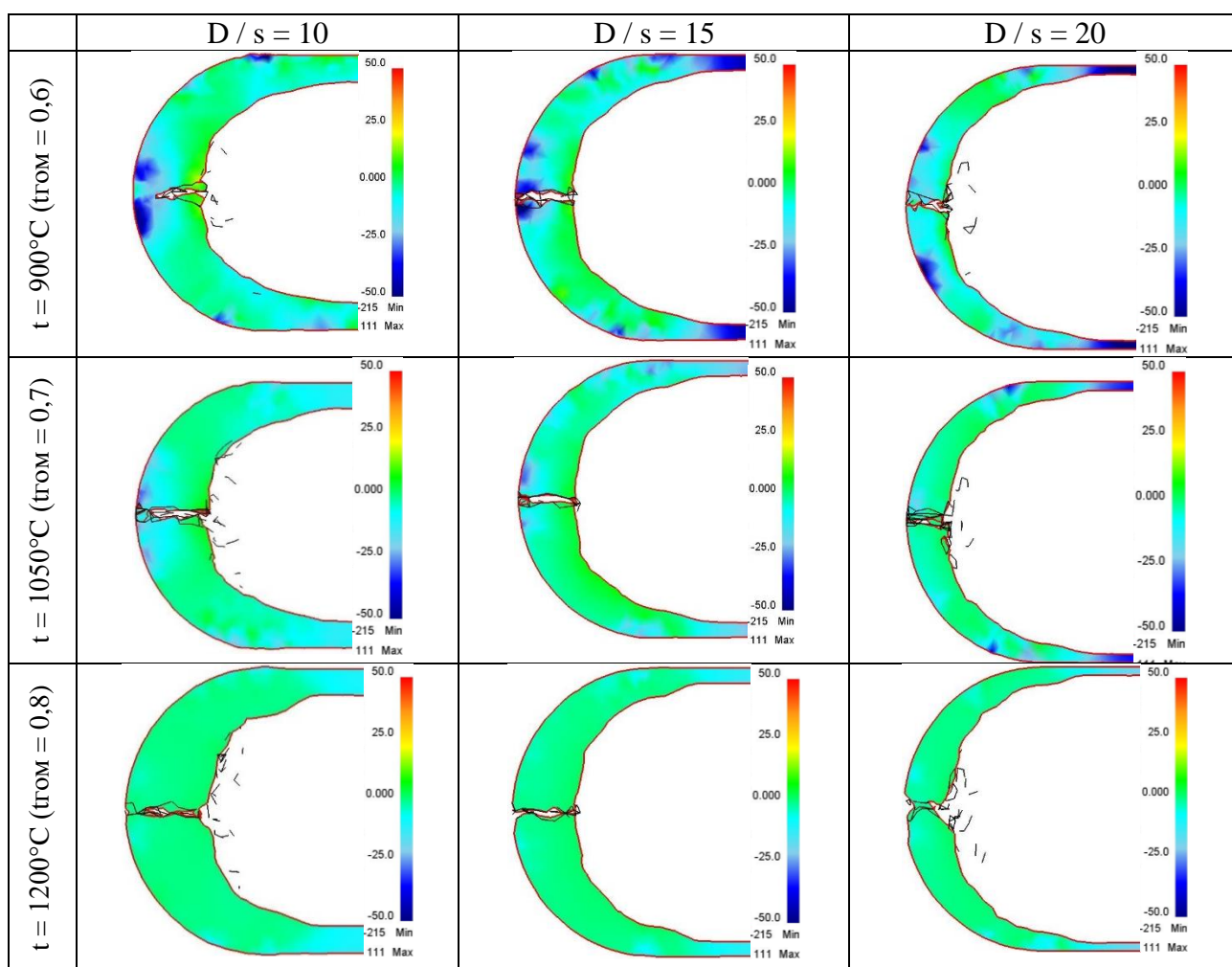


Рис. 2. Розподіл середніх напружень у заготовках із різною початковою температурою та відносною товщиною стінки при сталій подачі заготовки в ІТ

Обкочування призводить до збільшення товщини стінки днища. Товщина днища поступово збільшується від трубної ділянки до осьової зони. Зазначена закономірність характерна для порожнистих заготовок з різною відносною товщиною стінки та початковою температурою нагріву.

На основі скінчено-елементного моделювання процесів тангенціальної обкочування ІТ було встановлено раціональні параметри заготовок для бездефектного виготовлення днищ із трубних заготовок. Для розробки технологічного процесу можливості впровадження отриманих результатів необхідно провести експериментальну верифікацію в умовах, наближених до промислових.

Діаметр труби становив 90 мм, товщина стінки труби дорівнювала 4,5 мм, абсолютна подача заготовки в інструмент становила 82 мм, а температура нагрівання труби 1200 °С. Таким чином, підлягали перевірці такі встановлені технологічні рекомендації:

- відносна товщина стінки труби для виготовлення бездефектного днища $D/s = 20$;
- відносна подача заготовки в ІТ $l/D = 0.925$;
- гомологічна температура 0.8Тпл.

Зазначені параметри входять до рекомендованих інтервалів для обкочування трубних заготовок. Процес індукційного нагріву трубної заготовки струмами високої частоти (2,4 кГц) представлено на рисунку 3. Тривалість нагріву становила 70 с. Матеріал труби – сталь 34ХН.



Рис. 3. Індукційне нагрівання та обкочування трубної заготовки перед обкочуванням

Другим важливим показником якості днища є його суцільність. Цілісність металу можна встановити на основі металографічних досліджень - аналізу макро-і мікроструктури в осьовій зоні днища. Для цього розрізані днища шліфувалися, після чого з одержаних темплетів готувався макрошліф.

Розподіл температур підтвердив припущення, що в процесі тангенціальної обкочування ІТ підігрівати трубну заготовку не потрібно. Було встановлено, що в процесі обкочування з початковим підігрівом заготовок з різною товщиною стінки до температур 900 ... 1200 °С, не відбувається охолодження заготовки, а також різкого підвищення температури. Це дозволило встановити важливу для практики процесу тангенціальної обкочування ІТ технологічну рекомендацію щодо температури нагрівання заготовок. Ця температура становить 1200°С ($t_{гом} = 0,8$). Рівень цієї температури достатній для максимальної пластичності металу, мінімального зусилля обкочування, заварювання стін осьової зони днища, а також виключення утворення перегріву та перепалу металу.

Був додатково встановлений напружений стан металу трубної заготовки у процесі обкочування (рис. 2). Напружений стан аналізувався на основі даних розподілу середніх напружень за поздовжнім перерізом днища. Середні напруження дозволять встановити рівень та знак діючих напружень на основі яких можна пояснити механізм закриття отвору днища.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що при підвищенні температури рівень стискаючих напружень у днищі знижується: середні напруження змінюються від від'ємних (стискаючих) з величин – 50 МПа до – 10 МПа. Отримана закономірність пояснюється зниженням опору деформації при підвищенні температури деформування. Максимальні стискаючі напруження виникають на зовнішній поверхні днища, що можна пояснити впливом ІТ. При зменшенні товщини стінки заготовки рівень стискаючих напружень в зоні отвору знижується, що пояснюється меншою товщиною днища, а відповідно і меншим зусиллям тангенціального обкочування.

Моделювання процесу тангенціальної обкочування дозволило встановити, що відносна подача заготовки в ІТ не призводить до повного змикання стінок труби в зоні осьової днища, що пояснюється малою кількістю об'єму заготовки металу.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що у структурі металу днища присутні оксидні плівки, які не сприяли повному заварюванню осьового отвору днища. Чітко розрізняються два довгасті вклучення (плівки), які розділені щільним шаром металу. Результати металографічних досліджень на натурних виробках підтверджують результати теоретичного дослідження про незначний вплив обкочування сферичного днища на підпір в осьовій зоні та повне його заварювання. Слід удосконалити даний технологічний процес для виключення утворення дефектів у днищі гільзи або використовувати його для гільз, що мають у днищі осьовий отвір.

ВИСНОВКИ

1. Ефективна початкова гомологічна температура підігріву заготовок перед обкаткою має становити 0,8. Ця температура сприятиме заварюванню отвору днища і не призводитиме до перегріву та перепапу металу заготовки.
2. Відносну подачу заготовки в ІТ перед обкочуванням слід призначати в діапазоні 0,9...0,95, що сприятиме закриттю та заварюванню отвору днища.
3. Відносну товщину стінки труби доцільно вибирати в діапазоні 15...20 для виготовлення днищ з меншими витратами металу.
4. Випробовано новий технологічний процес тангенціальної обкочування сферичного днища. Результати металографічних досліджень на натурних виробках підтверджують результати теоретичного дослідження про незначний вплив обкочування сферичного днища на опір в осьовій зоні. Слід удосконалити даний технологічний процес для виключення утворення дефектів у днищі гільзи або використовувати цей спосіб для виробів, що мають осьовий отвір (артилерійські гільзи, гідроциліндри та ін), що забезпечить висвердлювання осьового дефекту.

REFERENCES

1. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A., Kosilov M. Development of a new process for expanding stepped tapered rings (2019). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1-98), pp. 39-46. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.160395 <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160395>
2. Markov O., Gerasimenko O., Khvashchynskyi A., Zhytnikov R., Puzyr R. Modeling the technological process of pipe forging without a mandrel (2019). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1-99), pp. 42-48. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.167077 <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.167077>
3. Hrudkina N., Aliieva L., Abhari P., Markov O., Sukhovirska L. Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radialbackward extrusion of parts with a flange (2019). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1-101), pp. 49-57. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.179232 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179232>
4. Markov O., Panov V., Karnaukh S., Khvashchynskyi A., Zhytnikov R., Kukhar V., Kosilov M., Rizak P. Determining the deformed state in the process of rolling conical shells with a flange (2020). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1-108), pp. 34-41. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216523
5. Hrudkina N., Aliiev I., Markov O., Savchenko I., Sukhovirska L., Tahan L. Designing a kinematic module with rounding to model the processes of combined radial-longitudinal extrusion involving a tool whose configuration is complex (2021). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1-110), pp. 81-89. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.227120
6. Wu Y., Dong X., Yu Q. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 93 (2015). pp. 102–110.
7. Sizek H. W. Radial Forging. *Metalworking* : Bulk Forming 2005. pp. 172–178.
8. Markov O., Kosilov M., Panov V., Kukhar V., Karnaukh S., Ragulina N., Bochanov P., Rizak P. Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool (2019). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1-102), pp. 19-25. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.183663 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183663>
9. Ghaei A., Movahhedy M. R., Taheri A. Karimi. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel. *Materials & Design*. 2008. № 29. pp. 867–872.
10. Fan L., Wang Z., Wang H. 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes. *Journal of Manufacturing Processes*. 16 (2014). pp. 329–334.
11. Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhibankov I., Markov O. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression (2020). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1-104), pp. 15-22. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.198433
12. 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 continuously-cast ingots. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, 58. pp. 170–173.

13. Sanjari. M., Saidi P., Karimi Taheri A., Hossein-Zadeh M. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test. *Materials and Design*. 38 (2012). pp. 147–153.
14. Markov O., Khvashchynskiy A., Musorin A., Lysenko, A. FEM study of the drawing method of hollow forgings with a bottom without a mandrel. *Materials Working by Pressure*. 2023. 1(52), pp. 3-9. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)3](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)3) (in Ukrainian).
15. Markov O., Stankov V., Panov V., Zinskyi V. Study of deformation method of hollow workpieces with bottom by dies with chamfer. *Materials Working by Pressure*. 2023. 1(52), pp. 71-78. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)71](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)71) (in Ukrainian).
16. Markov O., Molodetskiy V., Zinskyi V., Abhari P. Experimental study of a new process of deformation of forgings such as sleeves. *Materials Working by Pressure*. 2023. 1(52), pp. 79-85. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1\(52\)79](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)79) (in Ukrainian).

Markov O., Shevtsov S., Aldokhin M., Panov V., Rovenskiy S. Research of the method of rolling projectile from tubular workpiece.

The work is aimed at solving the current technical and scientific problem regarding the improvement of the technological processes of the production of blanks for parts such as artillery shells based on the application of the operation of tangential rolling with a friction tool, which makes it possible to manufacture hollow parts with a bottom. The finite element method was used to simulate the technological process of rolling the bottom with a friction tool, which made it possible to determine the rational shape and dimensions of the rolled pipe blanks and their preheating temperature. Recommendations have been developed for the design of energy-saving technological processes of rolling parts such as sleeves, which allow to set the wall thickness of the pipe billet before rolling, the heating temperature of hollow billets, as well as the amount of relative feed of the billet to the friction tool. The established recommendations were verified by experimental studies on steel blanks. According to the research results, it was established that the rolling of spherical bottoms should be implemented for pipe blanks with a relative wall thickness (D/s), which is in the range of 15...20. The homologous heating temperature of the hollow billet was 0.8, and the relative feed of the pipe billet into the friction tool was 0.9. Approbation of the determined ratios in laboratory conditions proved that there are established recommendations for changing the shape and size of spherical bottoms in the process of tangential rolling with a friction tool. The laws of shape change of the workpiece revealed in the work expanded the technological possibilities of the process of tangential rolling of bottoms and made it possible to establish the possibilities of the researched process. The results of macrostructural studies on steel products confirmed the results of finite element modeling on the effect of tangential rolling of the spherical bottom on support in the axial zone. Based on the results of research, it was established that this method can be used for products that have a bottom with an axial hole (artillery shells, hydraulic cylinders, etc.). Axial defects in this case will be removed when drilling an axial hole.

Keywords: deformation, pipe billet, rolling, heating, bottom, friction tool, FEM.

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.omd@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2467-9607>

Шевцов Сергій Олександрович – канд. техн. наук, каф. ВМ, ДДМА

Serhii Shevtsov – Candidate of Technical Science, Associate Professor DSEA

E-mail: sheser.ssa1@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4905-2170>

Алдохін Максим Денисович – аспірант ДДМА

Aldokhin Maksym – Graduate student DSEA

E-mail: maksimaldokhin84@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3187-7521>

Панов Володимир Володимирович – аспірант ДДМА

Panov Volodymir – Graduate student DSEA

E-mail: v.panov@emss.dn.ua

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

Ровенський Сергій Геннадійович – аспірант ДДМА

Rovenskiy Serhii – Graduate student DSEA

E-mail: katapulta13@gmail.com

ORCID: [0000-0002-4145-8413](https://orcid.org/0000-0002-4145-8413)

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.