

УДК 621.621.45.032.3

doi: 10.32620/aktt.2024.6.04

К. Б. БАЛУШОК, С. Л. ЧИГІЛЕЙЧИК

Публічне акціонерне товариство «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна

СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ МЕТОДОМ ПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Визначення сфери застосування адитивних технологій методом плазмового наплавлення при виготовленні авіаційних двигунів вирішується за рахунок забезпечення механічних та службових властивостей жароміцних нікелевих та титанових сплавів при виробництві заготовок, необхідних для експлуатації та визначення технологічних можливостей даного методу. Для визначення механічних властивостей були вироблені зразки розміром $140 \times 70 \times 14$ мм з жароміцних нікелевих сплавів: ЭП 648ВІ, ВЖ 98ВІ та титанових сплавів ВТ6, ВТ20. Після виробництва всі зразки проходили термічну обробку, згідно технічних умов для кожного сплаву. На цих зразках були визначені механічні властивості для ЭП 648ВІ (поперечний напрям: $\sigma_B=83,5$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=63,5$ кгс/мм²; $\delta=11,2$ %; $\psi=21,8$ %; поздовжній напрям: $\sigma_B=87,5$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=57,3$ кгс/мм²; $\delta=21,8$ %; $\psi=23,5$ %), для ВЖ98 (в поперечному напрямі: $\sigma_B=83,5$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=63,5$ кгс/мм²; $\delta=11,2$ %; $\psi=21,8$ % поздовжній напрям: $\sigma_B=87,5$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=57,3$ кгс/мм²; $\delta=21,8$ %; $\psi=23,5$ %), для ВТ6 (поперечний напрям: $\sigma_B=92,2$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=84,8$ кгс/мм²; $\delta=17,2$ %; $\psi=54,3$ %; поздовжній напрям: $\sigma_B=98,9$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=91,0$ кгс/мм²; $\delta=9,8$ %; $\psi=22,5$ %) та для ВТ20 (поперечний напрям: $\sigma_B=115$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=108$ кгс/мм²; $\delta=15$ %; $\psi=29,3$ %; поздовжній напрям: $\sigma_B=114$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=103$ кгс/мм²; $\delta=14,0$ %; $\psi=37,6$ %). Отримані властивості жароміцних нікелевих та титанових сплавів не поступають заготовкам, що отримані методами лиття та кування. Визначена сфера застосування адитивних технологій методом плазмового наплавлення при виготовленні авіаційних двигунів. Для жароміцних нікелевих сплавів це деталі, що входять до соплових апаратів, жарових труб та камер згоряння. Для титанових сплавів це деталі, що входять в состав корпусів. З технологічних можливостей метод плазмового наплавлення найбільш раціонально застосовувати при виробництві циліндричних та конусних заготовок деталей діаметром від 150 до 1500 мм. Технологію адитивного плазмового виробництва впроваджено в серійне виробництво на АТ «Мотор Січ». На даний момент виробується понад 20 різних типів деталей авіаційних двигунів.

Ключові слова: адитивні технології; плазмове наплавлення; механічні властивості; авіаційні двигуни; виробництва.

Вступ

Аддитивне виробництво (АВ) в останні роки стало одним із самих перспективних напрямів розвитку світової промисловості. Адитивні технології є новими технологіями виробництва деталей з металу, які в цілому ряді випадків можуть замінити класичні способи, такі як лиття та штампування. Серед основних переваг даної технології можна виділити те, що з допомогою автоматизованого комп'ютерного управління з'являється можливість пошарового виготовлення нового виробу за його трьохмірною 3D моделлю. При цьому значно скорочується час і витрати на отримання нового виробу за рахунок виключення проміжних стадій виготовлення оснащення та прес-форм. Це дає можливість досвідної реалізації конструкторського проекту (при проектуванні нових виробів або доопрацювання з метою покращення характеристик існуючих) із мінімальними витратами через 2-3 тижні.

Крім того дана технологія дає можливість:

- мінімізувати вплив «людського фактору»;
- скоротити чисельність персоналу, вирішити проблему нестачі кваліфікованого персоналу - модельників, формувальників тощо.
- усунути необхідність утримування, зберігання і ремонту модельного оснащення, особливо для відносно габаритних виробів;
- покращити умови праці.

До теперішнього часу розроблений цілий ряд різноманітних технологій АВ металів в тому числі і титанових сплавів, різняться за:

- матеріалом, що витрачається – порошок, дріт або порошок у суміші із в'язучою речовиною;
- джерелом нагріву – лазер, електронний промінь, плазма, електрична дуга тощо;
- методом формування шарів – вибіркоче розплавлення (спікання) підготовленого шару порошку, пряме сплавлення присадочного матеріалу на попередній шар або інжекційне лиття [1, 2].



Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

На даний момент при виготовленні виробів із титанових та нікелевих сплавів більш широко застосовуються технології на основі лазерного або ЕВЗ обладнання з використанням у якості присадочного матеріалу – порошків. Основна перевага даних способів – це можливість отримання виробів із значною геометричною точністю відносно чистою поверхні. Однак продуктивність даних способів дуже низька (до 1 кг на годину) та обмежує їх застосування при виготовленні великорозмірних корпусних виробів. Також слід відмітити відносно високу вартість обладнання (більш 1 млн. EUR). Тому перспективним напрямком для вирощування великорозмірних корпусних нікелевих та титанових виробів може бути застосування плазмового наплавлення з використанням у якості присадки – дроту або порошку. Обладнання для плазмового наплавлення у порівнянні із лазерним та ЕВЗ відносно недороге (до 200 тис. EUR). А використання дроту у деяких випадках, крім його відносно низької ціни у порівнянні із порошком дає 100% ефективність використання матеріалу (коефіцієнт використання для порошкових матеріалів становить від 30 до 70%)[3]. Також даний спосіб дає можливість досягнення значно більшої масової продуктивності (до 10 кг на годину). Все це робить даний спосіб при вирощуванні великих заготовок деталей (навіть з урахуванням великих припусків на механічну обробку у зв'язку із більш грубою поверхнею) з точки зору економічності найбільш ефективним [4].

Постановка задачі

Актуальним завданням є визначення сфери застосування адитивних технологій методом плазмового наплавлення при виготовленні авіаційних двигунів.

Це завдання вирішується при врахуванні наступних питань:

-забезпечення механічних та службових властивостей жароміцних нікелевих та титанових сплавів при вирощуванні заготовок необхідних для експлуатації;

-визначення технологічних можливостей даного методу.

Результати

Для визначення механічних властивостей були вирощені зразки розміром 140*70*14 мм з наступних матеріалів:

Жароміцні нікелеві сплави: ЕП 648ВИ, ВЖ 98ВИ;

Титанові сплави: ВТ6, ВТ20.

Після вирощування всі зразки проходили термічну обробку, згідно технічних умов для кожного сплаву.

На цих виразках були визначені механічні властивості:

Для ЕП 648ВИ:

– поперечний напрям: $\sigma_B=83,5$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=63,5$ кгс/мм²; $\delta=21,2$ %; $\psi=21,8$ % [5];

– поздовжній напрям: $\sigma_B=87,5$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=57,3$ кгс/мм²; $\delta=11,8$ %; $\psi=23,5$ %.

Для ВЖ98:

– в поперечному напрямі: $\sigma_B=83,5$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=63,5$ кгс/мм²; $\delta=11,2$ %; $\psi=21,8$ %;

– поздовжній напрям: $\sigma_B=87,5$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=57,3$ кгс/мм²; $\delta=21,8$ %; $\psi=23,5$ % [6].

Для ВТ6:

– поперечний напрям: $\sigma_B=92,2$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=84,8$ кгс/мм²; $\delta=17,2$ %; $\psi=54,3$ %;

– поздовжній напрям: $\sigma_B=98,9$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=91,0$ кгс/мм²; $\delta=9,8$ %; $\psi=22,5$ %.

Для ВТ20:

– поперечний напрям: $\sigma_B=115$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=108$ кгс/мм²; $\delta=15$ %; $\psi=29,3$ %;

– поздовжній напрям: $\sigma_B=114$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2}=103$ кгс/мм²; $\delta=14,0$ %; $\psi=37,6$ % [7].

Отримані властивості жароміцних нікелевих та титанових сплавів не поступаються заготовкам, що отримані методами лиття та кування. Це дає можливість застосування адитивних технологій методом плазмового наплавлення при виготовленні авіаційних двигунів.

З технологічних можливостей метод плазмового наплавлення найбільш раціонально застосовувати при вирощуванні циліндричних та конусних заготовок деталей діаметром від 150 до 1500 мм, для яких не вимагається після вирощування отримання високої чистоти поверхні. Це пов'язано з тим, що для жароміцних нікелевих сплавів ХН50ВМТЮ-ВИ і ХН60ВТ-ВИ після вирощування з метою отримання необхідної міцності та спеціальних службових властивостей необхідна високотемпературна термообробка (більше 1000°C), а для ВТ-6 та ВТ 20 (більше 750 °C), тому заготовка деталі під вирощування повинна мати припуски на механічну обробку після термообробки (мінімум 1,5 мм на бік) [15].

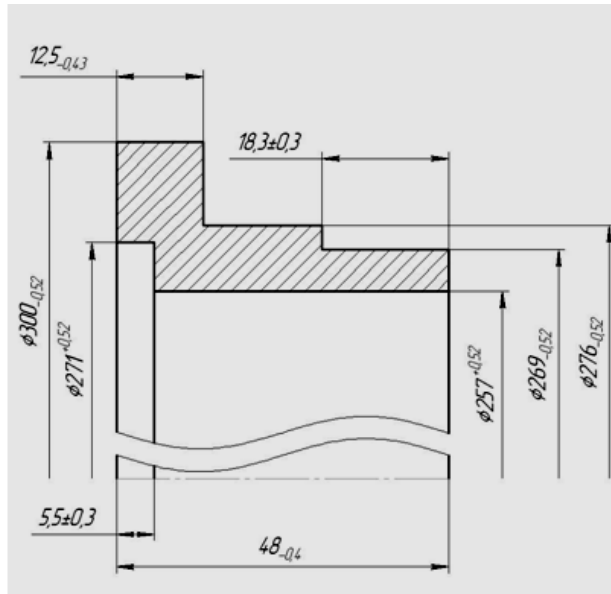
Для жароміцних нікелевих сплавів це деталі, що входять до соплових апаратів, жарових труб та камер згорання авіаційних двигунів. Для титанових сплавів це деталі що входять в состав корпусів.

Приклади застосування

Технологію адитивного плазмового вирощування впроваджено в серійне виробництво на

АТ «Мотор Січ». На даний момент вирощується понад 20 різних типів деталей авіаційних двигунів.

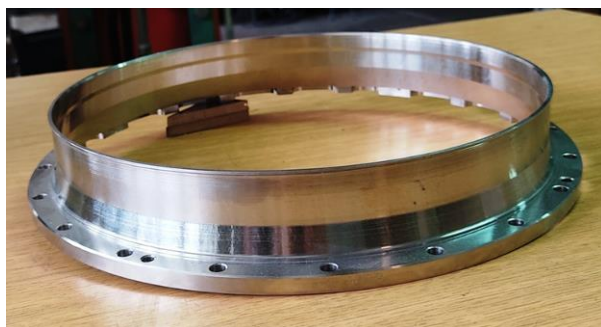
Приклади впроваджених у серійне виробництво вирощених заготовок наведено на рис. 1 та 2.



а

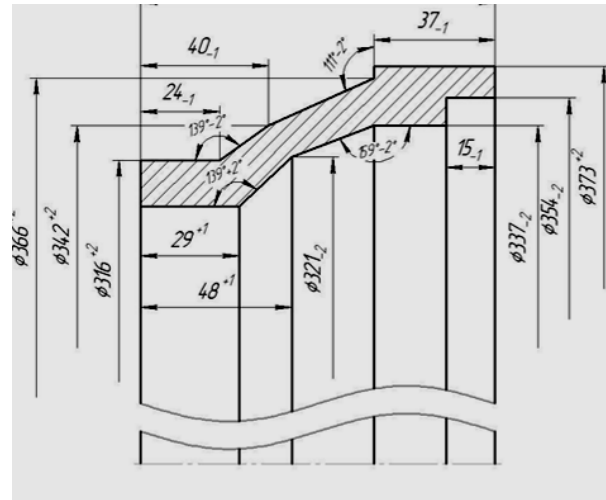


б



в

Рис. 1. Ескіз (а) та зовняшній вигляд вирощеної заготовлі деталі з сплаву ЕП 648ВИ до та після механічної обробки (б) та (в) відповідно



а



б



в

Рис. 2. Ескіз (а) та зовняшній вигляд вирощеної заготовлі деталі (б) з сплаву ВЖ 98ВИ до та після механічної обробки (б) та (в) відповідно

Висновки

1. Встановлено, що рівень механічних властивостей вирощених заготовок методом плазмового наплавлення з жароміцних нікелевих та титанових сплавів не поступаються заготовкам, що отримані методами лиття та кування.

2. Визначена сфера найбільш ефективного застосування вирощених заготовок методом плазмового наплавлення – це циліндричні та конусні заготовки деталей (діаметром від 150 до 1500 мм), що входять до соплових апаратів, жарових труб, камер згорання (нікелеві сплави) та в состав корпусів (титанові сплави).

Внесок авторів: формулювання проблеми – С. Л. Чигілейчик; огляд та аналіз інформаційних джерел – С. Л. Чигілейчик; постановка задачі – К. Б. Балушок; побудова моделі та проведення моделювання – К. Б. Балушок; оцінка результатів – С. Л. Чигілейчик; формулювання висновків – К. Б. Балушок.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Подяка

Автори висловлюють подяку керівництву АТ «Мотор Січ»

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Experimental Investigation on Laser Cutting Post Process of Additive Manufactured Parts of Poly Lactic Acid (PLA) by 3D Printers Using FDM Method* [Text] / M. Moradi, H. Falavandi, M. K. Moghadam, & M. S. M. Meiabadi // *Modares Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 20, iss. 4. – P. 999-1009. – Available at:

<http://mme.modares.ac.ir/article-15-31700-en.html> – 12.08.2024.

2. *Досвід впровадження адитивних технологій при ремонті деталей ГТД зі сплавів ЕП 648 ВІ (ХН50ВМТЮБ-ВІ) в умовах серійного виробництва* [Текст] / С. Л. Чигілейчик, І. А. Петрик, О. В. Овчинников, С. В. Кирилах // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 1. – С. 57-63. DOI: 10.32620/aktt.2022.1.07.

3. *A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement* [Text] / B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, & J. Norrish // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 35. – P. 127-139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

4. *Формування критеріїв оцінки придатності застосування присадних матеріалів з нікелевих стопів у адитивних технологіях 3D-наполення* [Текст] / О. В. Яровицін, М. О. Черв'яков, & др. // *Металофізика та новітні технології*. – 2024. – Т. 46, вип. 2. – С. 129-149. DOI: 10.15407/mfint.46.02.0129.

5. *Оценка возможности применения технологии послойного формирования способом плазменной наплавки деталей из титановых сплавов узлов вертолетов ГТД* [Текст] / И. А. Петрик, С. Л. Чигілейчик, & др. // *Современная электрометаллургия*. – 2018. – № 3. – С. 45-51. DOI: 10.15407/sem2018.03.07.

6. *Гнатенко, М. О. Виготовлення авіаційних деталей з жароміцних нікелевих сплавів методом адитивного плазмового наплавлення* [Текст] / М. О. Гнатенко, С. Л. Чигілейчик, & С. С. Сахно // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 5. – С. 48-51. DOI: 10.32620/aktt.2021.5.06.

7. *Understanding the impact of oxygen and nitrogen content in metal powder on microplasma multilayers deposition of aircraft GTE blade edges* [Text] / K. A. Yuschenko, O. V. Yarovytsyn, H. D. Khrushchov I. A. Petryk, & S. L. Chyhileychik // *Proceedings of 9th International conference of young scientist on welding and related technologies, PWI NAS of Ukraine, 23-26 May 2017*. – P. 257-261.

References

1. Moradi, M., Falavandi, H., Moghadam, K. M., & Meiabadi, M. S. M. Experimental Investigation on Laser Cutting Post Process of Additive Manufactured Parts of Poly Lactic Acid (PLA) by 3D Printers Using FDM Method. *Modares Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, iss. 4, pp. 999-1009. Available at: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-31700-en.html> (accessed 12 Aug. 2024).

2. Chihyleychyk, S. L., Petryk, I. A., Ovchynnikov, O. V., & Kyrylakha, S. V. Dosvid vprovadzhennya adytyvnykh tekhnolohiy pry remonti detaley HTD zi splaviv EP 648 VI (KHN50VMTYUB-VI) v umovakh seriynoho vyrobnytstva [Experience in implementing additive technologies during repair of GTE parts from alloy EP 648 VI (KHN50VMTYUB-

VI) under conditions of serial production]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 1, pp. 57-63. DOI: 10.32620/akt.2022.1.07. (In Ukrainian).

3. Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 35, pp. 127-139. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

4. Yarovytsyn, O. V., Cherv'yakov, M. O., & et al. Formuvannya kryteriyiv otsinky prydatnosti zastosuvannya prysadnykh materialiv z nikelevykh stopiv u adytyvnykh tekhnolohiyakh ZD-natoplennya [Formation of Criteria for Evaluating the Suitability of the Use of Filler Materials Made of Nickel Alloys in Additive Technologies of 3D-Surfacing]. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2024, vol. 46, no. 2, pp. 129-149. DOI: 10.15407/mfint.46.02.0129. (In Ukrainian).

5. Petrik, I. A., Chigileychik, S. L., Mitina, T. A., Marchenko, Ju. A., & Gnatenko, M. O. Otsenka vozmozhnosti primeneniya tekhnologii posloynogo formirovaniya sposobom plazmennoy naplavki detaley iz titanovykh splavov uzlov vertoletov GTD [Evaluation

of feasibility of applying the technology of layer-by-layer forming by method of plasma surfacing of titanium alloy parts of components of helicopters and gas turbine engines]. *Sovremennaja jelektrometallurgija*, 2018, no. 3, pp. 45-51. DOI: 10.15407/sem2018.03.07. (In Russian).

6. Ghnatenko, M. O., Chyghileychyk, S. L., & Sakhno, S. S. Vyghotovlennja aviacijnykh detalej z zharomicnykh nikelevykh splaviv metodom adytyvnogho plazmovogho naplavlennja [Manufacture of aviation parts from heat-related nickel alloys by multilayer plasma surfacing]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 5, pp. 48-51. DOI: 10.32620/akt.2021.5.06. (in Ukrainian).

7. Yuschenko, K. A., Yarovytsyn, O. V., Khrushchov, H. D., Petryk, I. A., & Chyhileychik, S. L. Understanding the impact of oxygen and nitrogen content in metal powder on microplasma multilayers deposition of aircraft GTE blade edges. *Proceedings of 9th International conference of young scientist on welding and related technologies, PWI NAS of Ukraine*, 23-26 May 2017, pp. 257-261.

Надійшла до редакції 06.08.2024, розглянута на редколегії 18.11.2024

THE SCOPE OF APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES BY THE METHOD OF PLASMA SURFACING IN THE MANUFACTURE OF AIRCRAFT ENGINES

Konstantin Balushok, Sergey Chigileychik

The determination of the scope of application of additive technologies by the method of plasma surfacing in the manufacture of aircraft engines is determined by ensuring the mechanical and service properties of heat-resistant nickel and titanium alloys during the production of blanks, necessary for the operation and determination of the technological capabilities of this method. To determine the mechanical properties, 140×70×14 mm heat-resistant nickel alloys ЭП 648ВІ, ВЖ 98ВІ and titanium alloys BT6, BT20 were grown. After growing, all samples underwent heat treatment according to the technical conditions for each alloy. The mechanical properties for ЭП 648ВІ were determined on these samples (transverse direction: $\sigma_B=83.5$ kgf/mm²; $\sigma_{0.2}= 63.5$ kgf/mm²; $\delta= 11.2$ %; $\psi= 21.8$ %; longitudinal direction: $\sigma_B=87.5$ kgf/mm²; $\sigma_{0.2}= 57.3$ kgf/mm²; $\delta=21.8$ %; $\psi= 23.5$ %), for ВЖ98 (transverse direction: $\sigma_B=83.5$ kgf/mm²; $\sigma_{0.2}= 63.5$ kgf/mm²; $\delta= 11.2$ %; $\psi= 21.8$ %, longitudinal direction: $\sigma_B=87.5$ kgf/mm²; $\sigma_{0.2}= 57.3$ kgf/mm²; $\delta=21.8$ %; $\psi= 23.5$ %), for BT6 (transverse direction: $\sigma_B=92.2$ kgf/mm² $\sigma_{0.2}= 84.8$ kgf/mm²; $\delta= 17.2$ %; $\psi= 54.3$ %; longitudinal direction: $\sigma_B=98.9$ кгс/мм²; $\sigma_{0.2}= 91.0$ кгс/мм²; $\delta=9.8$ %; $\psi= 22.5$ %), for BT20 (transverse direction: $\sigma_B= 115$ kgf/mm²; $\sigma_{0.2}= 108$ kgf/mm²; $\delta=15$ %; $\psi=29.3$ %; longitudinal direction: $\sigma_B=114$ kgf/mm²; $\sigma_{0.2}= 103$ kgf/mm²; $\delta= 14.0$ %; $\psi=37.6$ %). The obtained properties of heat-resistant nickel and titanium alloys are not inferior to blanks obtained by casting and forging methods. The scope of application of additive technologies by the method of plasma surfacing in the manufacture of aircraft engines is defined. For heat-resistant nickel alloys, these are parts included in nozzle devices, heat pipes and combustion chambers. For titanium alloys, these are parts included in the body. From the technological possibilities, the plasma surfacing method is most rationally used when growing cylindrical and conical workpieces of parts with a diameter of 150 to 1500 mm. The technology of adaptive plasma cultivation has been introduced into serial production at JSC "Motor Sich". Currently, more than 20 different types of aircraft engine parts are being produced.

Keywords: additive technologies; plasma surfacing; mechanical properties; aircraft engines; growing.

Балушок Константин Броніславович – канд. техн. наук, головний інженер АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Чигілейчик Сергій Леонідович – провідний інженер АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Konstantin Balushok – Candidate of Science, Chief Engineer at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: motor@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-8212-9275.

Sergey Chigileychik – Lead Engineer of Motor Sich JSC, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-2372-9078.