

УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ПРИЧИНИ І ВИДИ ЗНОШУВАННЯ ВАЛІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ І ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ І ТЕРМІНУ СЛУЖБИ

Посвятенко Е.К., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, pek1943@ukr.net, orcid.org/0000-0001-6606-1365

Головащук М.В., Національний транспортний університет, Київ, Україна, mihajlogolovasuk@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5329-2612

CONDITIONS OF OPERATION, CAUSES AND TYPES OF WEAR OF SHAFTS OF ENGINES OF INTERNAL COMBUSTION AND INCREASE OF THEIR WEARABILITY AND LIFE

Posviatenko E.K., Doctor of Technical Science, professor, National Transport University, Kyiv, Ukraine, pek1943@ukr.net, orcid.org/0000-0001-6606-1365

Golovashchuk M.V., National Transport University, Kyiv, Ukraine, mihajlogolovasuk@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5329-2612

Постановка проблеми.

Проблему енергозбереження найефективніше можна вирішити під час впровадження технологій поверхневого зміцнення. Зміцнюючі покриття та технології є найбільш пріоритетним напрямком розвитку у сучасному двигунобудуванні. Несправності та дефекти деталей двигунів впливають на його технічний стан. Як показав аналіз різних груп деталей двигунів, кількість і конструктивна значущість деталей типу «вал» є визначальними у забезпеченні їх працездатності. Зі всіх відновлюваних типорозмірів деталей – 60% становлять деталі типу «вал» (рис.1).

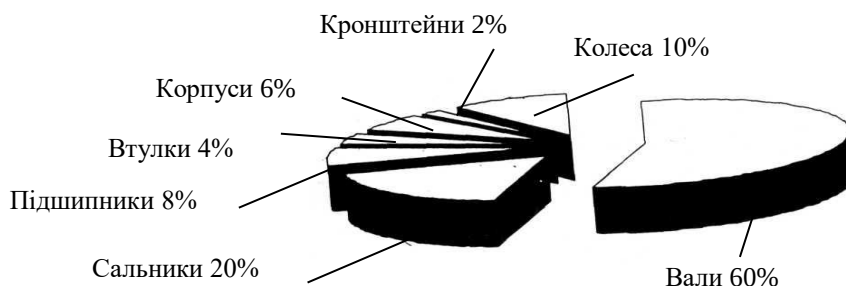


Рисунок 1 – Статистика виходу з ладу деталей двигунів

Figure 1 – Failure statistics of engine parts

До деталей типу «вал» двигунів відносяться як власне вали (колінчастий, розподільний), так і деталі, що мають конструктивні поверхні характерні для валів (осі, шкворні, втулки та ін.). Серед деталей двигунів найчастіше виходять з ладу і вимагають ремонту колінчасті та розподільні вали. Вони є відповідальними, дорогими та найбільш високонавантаженими деталями. Деталі типу «вал», зокрема колінчасті та розподільні вали, працюють в умовах тертя зі змащенням.

У процесі експлуатації знакозмінні навантаження, що діють на вал, викликають тертя та зношування його шийок; вигини та скручування внаслідок згинальних, крутильних та осьових його коливань, втомні руйнування у місцях переходу шийок у щоби та у місцях виходів оливних каналів. Зношування шийок валу в цілому визначає термін їх служби. Шийки валів у парі з підшипниками працюють в умовах динамічних знакозмінних навантажень. Поєднання шийка валу – підшипник працює в умовах гідродинамічного мастила. Стабільність режиму гідродинамічного тертя часто порушується і виникає напіввідке, а іноді напівсухе тертя. У таких умовах різко зростає швидкість зношування робочої поверхні валу та підшипника, що негативно впливає на ресурс двигунів. Зносу корінних шийок колінчастого валу сприяють сила інерції та відцентрова сила. Тиск газів та інерційна сила передають колінчастому валу поштовхи, скручують його та згинають, викликаючи пружні деформації. В результаті пружних деформацій у валі виникають внутрішні напруження.

При збігу періодів і напрямків тиску газів та інерційної сили, з одного боку, і внутрішніх пружних напруг – з іншого, амплітуда коливань валу зростає, що призводить до утворення в найбільш напружених місцях (галтелях та щоках) втомних тріщин, розвиток яких може спричинити несправність валу. Знос корінних шийок значною мірою залежить від неспіввідносності корінних підшипників і шийок, неспіввідносності колінчастого валу та валу муфти зчеплення, а також від незбалансованості колінчастого валу, маховика та муфти зчеплення. При збільшенні динамічних навантажень та кількості обертів колінчастих валів двигунів має місце таке негативне явище як фретин. Крім сил тертя, на знос шийок впливає конструкція валу та його жорсткість.

Внаслідок експлуатації колінчасті вали можуть мати такі дефекти: овальність; конусність; прогин; пошкодження шатунних та корінних шийок (задири, тріщини, вм'ятини, хвилястість, сліди корозії); пошкодження або зношування отворів під болти кріплення маховика; знос гнізда в торці колінчастого валу під шарикопідшипник валу муфти зчеплення; знос шпонкової канавки; знос оливозгінного різьблення; знос посадкових місць під шестерні та шків вентилятора. За статистикою пошкодження валів становлять: 75% – внаслідок викривлення їхньої осі; 70% – внаслідок дефектів колінчастих валів по щоках, 20% – але мотилеві шийки, 10% – по рамових підшипниках. В експлуатації частіше зустрічаються несправності, викликані циклічними згинальними напруженнями, що виникають через нерівномірне зношування сполучення шийки валу – підшипник.

Ресурс деталей двигунів обумовлений зносостійкістю деталей, що є важливою експлуатаційною характеристикою, що лімітує термін їхньої служби. Найбільш раціональним та економічно доцільним вирішенням проблеми, яка пов'язана з підвищенням зносостійкості деталей, є нанесення на їх робочі поверхні зносостійких покриттів. Виготовлення деталей двигунів зі зносостійкими покриттями обмежено, що є однією з причин недостатнього терміну служби. Тому розробка ефективних способів виготовлення деталей із покриттями підвищеної зносостійкості – одне з найважливіших завдань підвищення терміну служби автотракторних двигунів. У зв'язку з цим розробка комплексу науково обґрунтованих технологічних рішень щодо збільшення терміну служби валів автотракторних двигунів, зокрема щодо підвищення їх зносостійкості, є актуальним науковим завданням у галузі двигунобудування.

Розглянемо використовувані практично способи збільшення терміну служби валів. У ремонтному виробництві України, за нинішньої економічної ситуації, найчастіше відновлення деталей типу «вал» здійснюється двома способами: наданням їх поверхням нових, так званих ремонтних розмірів і повним відновленням початкових розмірів зношених місць деталей.

При першому способі, який отримав назву способу ремонтних розмірів, зі зношеної частини валу (наприклад, шийка) знімається шар металу з метою усунення відхилень від правильної геометричної форми. Отриманий після обробки новий розмір називається ремонтним. Спосіб ремонтних розмірів найбільш економічний через простоту (весь ремонт зводиться до механічної обробки). Однак цей метод ускладнює технологічний процес ремонту через різноманітність валів різних розмірів.

При другому способі вал спочатку піддається механічній обробці для надання їй правильної геометричної форми, потім нарощується її поверхня, після чого проводиться механічна обробка під номінальний розмір. Спосіб відновлення початкових розмірів дорожчий, але позбавлений недоліків, властивих способу ремонтних розмірів, тому вважається більш прогресивним.

Існують різні технологічні способи відновлення зношених, пошкоджених деталей: механічна та слюсарна обробка, зварювання та наплавлення, пластичне деформування, електролітичне нарощування, напилення, припикання, електрофізичні засоби обробки і т.п.

Сьогодні основним напрямком при відновленні деталей типу «вал» можна вважати нанесення покриттів на зношені поверхні валу. Нанесення покриттів – один з основних шляхів підвищення твердості та зносостійкості деталей типу «вал» та збільшення терміну їхньої служби. Зміцнюючі покриття та технології є найбільш пріоритетним напрямком розвитку у сучасному двигунобудуванні. Більшість деталей типу «вал» двигунів можна відновлювати різними методами наплавлення та напилення (табл. 1). Головний недолік методів наплавлення – «холодні» та «гарячі» тріщини в зоні термічного впливу (ЗТВ), які різко знижують ресурс відновлюваної деталі. Наплавлення вимагає фінішної механічної обробки посадочних місць для необхідного розміру і чистоти поверхні.

При призначенні способу відновлення та валу зміцнюючими зносостійкими покриттями враховують його матеріал, форму, розміри, види пошкоджень та враховувати такі положення:

- по-перше, розплавлення основи та покриття у процесі відновлення небажано, оскільки призводить до зміни хімічного складу та властивостей матеріалів покриття та деталі, і в результаті, визначає необхідність використання низки технологічних заходів;

– по-друге, перебіг процесів кристалізації наплавленого металу у вільних умовах без використання зовнішнього механічного фактора зумовлює утворення у покритті зварювальних дефектів;

– по-третє, тепловий режим нанесення покриттів на поверхні, що відновлюються, деталей різних розмірів і форм повинен забезпечувати сприятливий характер розподілу залишкових напруг. Зокрема, в покритті і в зоні з'єднання його з поверхнею, що відновлюється, бажано утворення стискаючих залишкових напруг, які підвищують опір втоми;

– і-четверте, тривалість процесу нанесення покриттів повинна бути мінімальною, щоб його структура не зазнавала небажаних змін [1-4].

Таблиця 1 – Способи відновлення деталей типу «вал»

Table 1 – Methods of restoring parts of the type «shaft»

Деталь	Спосіб відновлення
Колінчастий вал (шийки)	Автоматична наплавка під шаром флюсу Автоматичне наплавлення порошковим дротом Наплавлення у вуглекислому газі Широкошарова наплавка Вібродугове наплавлення Електроконтактне приварювання металевої стрічки Плазмове напилення Електродугове напилення Газополум'яне напилення Газополум'яне напилення шнуровими матеріалами
Розподільчий вал (шийки)	Вібродугове наплавлення Наплавлення у вуглекислому газі Автоматична наплавка під шаром флюсу Газополум'яне напилення Електродугове напилення

Електродугове напилення (ЕДН) застосовується для відновлення зношених посадочних місць чавунних, високовуглецевих та високолегованих сталевих деталей типу «вал». Перевага ЕДН перед наплавленням: тривалість наплавлення 1 год 10 хв, витрата дроту 1,3 кг, тривалість ЕДН – 24 хв, витрата дроту – 0,95 кг. ЕДН – один з найбільш економічних методів розпилення сталевих дротяних матеріалів і характеризується наступними перевагами: одержанням покриттів завдовжки від 0,1 до 10 мм; відсутністю значного термічного впливу на деталь; технологічною гнучкістю; низькою собівартістю відновлення (в 1,4-1,8 рази нижче за наплавлення). Обладнання, на якому виробляють напилення, є порівняно простим, легким та його можна досить швидко переміщати. Габарити деталей не лімітують застосування ЕДН. При реалізації ЕДН твердість покриттів становить 35-40 HRC, міцність зчеплення не перевищує 80 МПа, пористість становить 10-20% [1-4].

Таким чином, у роботі вирішувалося одне з актуальних завдань підвищення ресурсу найбільш відповідальних деталей двигунів – валів за рахунок створення на їх робочих поверхнях зносостійких покриттів методом ЕДН.

Мета проведених досліджень – створення способу формування зносостійких покриттів методом електродугового напилення (ЕДН) та встановлення впливу його технологічних режимів на властивості покриттів, для підвищення експлуатаційних властивостей (зносостійкості) та терміну служби валів двигунів. Загальна схема досліджень складалася з наступних етапів:

1) аналіз умов експлуатації деталей типу «вал» двигунів, встановлення їх основних дефектів та способів їх усунення. Вибір способу відновлення та його характеристика;

2) дослідження властивостей відновлених поверхонь валів з покриттями: пористості, адгезійної та когезійної міцності системи покриття-деталь, витривалості, мікротвердості та зносостійкості;

3) оптимізація режиму ЕДН покриттів та розробка технологічного процесу відновлення валу та практичних рекомендацій.

Технологічний процес (ТП) нанесення покриттів на зношені шийки розподільних валів двигунів складається з наступних операцій: миття, дефектації, механічної обробки (з метою зняття дефектного шару), дробоструминної обробки перед ЕДН (для підвищення шорсткості відновлюваної поверхні та міцності зчеплення дроту) 40X13 (рис. 2), чистове механічне оброблення (шліфування) та контролю.



Рисунок 2 – Процес нанесення покриттів на розподільний вал методом ЕДН
Figure 2 – The process of coating the camshaft by EDN

Процес електродугового напилення покриттів на шийки розподільного валу представлений на рис. 2, а сам розподільний вал відновлений вал з покриттям і після механічної обробки представлений на рис. 3.



а



б

Рисунок 3 – Розподільний вал 14-04-20-1 двигуна Д-160.111-1 з покриттям і після обробки
Figure 3 – Camshaft 14-04-20-1 of the D-160.111-1 engine with a covering and after processing

Висновки.

У роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання, пов'язане з підвищенням терміну служби системи «покриття-відновлювана поверхня» на прикладі валів ДВЗ методом ЕДН, що відображено у таких результатах:

- запропоновано на підставі аналізу літературних джерел та патентно-інформаційних досліджень підвищувати зносостійкість та термін служби валів ДВЗ шляхом відновлення їх робочих поверхонь способом ЕДН покриттів;

- вибрано обладнання та матеріали для експериментальних досліджень. Як досліджувані матеріали використовували дрід 40Х13;

- розроблено математичні моделі, що описують взаємозв'язок технологічних параметрів процесу нанесення покриттів з їх властивостями та визначено оптимальні параметри процесу, що забезпечують необхідні властивості покриттів. Встановлено, що міцність зчеплення покриттів становила 100...150 МПа, а пористість 51...10 %;

- прийнято рішення дослідити механічні властивості системи «відновлена поверхня-покриття» (когезійну та адгезійну міцність, деформативність, рівень напруги в покритті та зоні адгезійного контакту, вид руйнування системи) на одному зразку за одне випробування за допомогою експериментально-розрахункової методики;

- запропоновано визначати оптимальне співвідношення адгезійної та когезійної міцності – за допомогою критерію адгезійно-когезійної рівномірності, який дозволить керувати якістю одержуваного покриття та з'єднання його з відновлюваною поверхнею, що полягають в отриманні необхідної структури в зоні їх з'єднання за допомогою контролю величини деформації процесу і т.д.;

– на підставі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено технологію відновлення валів, яка полягає в ЕДН дроту 40X13. Розроблено ТП відновлення валів, який складається з наступних операцій: миття, дефектація, механічна обробка (МО) з метою зняття дефектного шару, струминно-абразивна обробка (САО) перед ЕДН для підвищення шорсткості відновлюваної поверхні та міцності зчеплення покриття, ЕДН покриттів, чистове та контроль шийок валу з напиленням покриттям;

– проведені лабораторні та стендові випробування валів показали, що зносостійкість поверхонь, відновлених за допомогою технології ЕДН у 2,5-5 рази вище, ніж поверхонь, відновлених газополуменевим напиленням (ГПН) та у 1,5-1,7 рази – порівняно з новими валами. Термін служби відновлених валів збільшився у 2...2,5 рази порівняно з новими деталями та деталями, відновленими ГПН.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Канарчук В.Є., Посвятенко Е.К., Лопата Л.А. Інженерія поверхні деталей транспортних засобів: сучаний стан і перспективи // Вісник Національного транспортного університету. – 2000. – Вип. 4. – С.3–14
2. Інженерія поверхні: Підручник / Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. – Київ: Наукова думка, 2007. – 559 с.
3. Influence a material and the technological factors on improvement of operation properties of machine parts by reliefs and film coatings / Posviatenko E., Posviatenko N, R. Budyak and et. // Eastern-european journal of enterprise technologies. – 2018. – № 5/12 (95). – С. 48 – 56.
4. Posviatenko Eduard, Posviatenko Natalija Cold plastic deformation as an effective method of engineering surface machine parts // Scientific letters of academic society of Michal Baludansky. – 2019. – № 1 (7). – Р. 73–78

REFERENCES

1. Kanarchuk VE, Posvyatenko EK, Shovel LA Surface engineering of vehicle parts: current state and prospects // Bulletin of the National Transport University. – 2000. – Vip. 4. – P.3–14
2. Surface Engineering: Textbook / Yushchenko KA, Borisov YS, Kuznetsov VD, Korzh VM – Kyiv: Scientific Opinion, 2007. – 559 p.
3. Influence a material and the technological factors on improvement of operation properties of machine parts by reliefs and film coatings / Posviatenko E., Posviatenko N, R. Budyak and et. // Eastern-european journal of enterprise technologies. – 2018. – № 5/12 (95). – С. 48 – 56.
4. Posviatenko Eduard, Posviatenko Natalija Cold plastic deformation as an effective method of engineering surface machine parts // Scientific letters of academic society of Michal Baludansky. – 2019. – № 1 (7). – Р. 73–78

РЕФЕРАТ

Посвятенко Е.К. Умови експлуатації, причини і види зношування валів двигунів внутрішнього згоряння і підвищення їх зносостійкості і терміну служби / Е.К. Посвятенко, М.В. Головащук // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К. : НТУ, 2022. – Вип. 1 (51).

В статті розглядається напрям енергозбереження який можна вирішити під час впровадження технологій поверхневого зміцнення.

Мета роботи: створення способу формування зносостійких покриттів методом електродугового напилення (ЕДН) та встановлення впливу його технологічних режимів на властивості покриттів, для підвищення експлуатаційних властивостей (зносостійкості) та терміну служби валів двигунів.

Об'єкт дослідження – процес нанесення покриттів на деталі типу «вал» методом ЕДН.

Дослідження склалися з наступних етапів:

- 1) аналіз умов експлуатації деталей типу «вал» двигунів, встановлення їх основних дефектів та способів їх усунення. Вибір способу відновлення та його характеристика;

- 2) дослідження властивостей відновлених поверхонь валів з покриттями: пористості, адгезійної та когезійної міцності системи покриття-деталь, витривалості, мікротвердості та зносостійкості;
- 3) оптимізація режиму ЕДН покриттів та розробка технологічного процесу відновлення валу та практичних рекомендацій.

Розроблено математичні моделі, що описують взаємозв'язок технологічних параметрів процесу нанесення покриттів з їх властивостями та визначено оптимальні параметри процесу, що забезпечують необхідні властивості покриттів.

Встановлено, що міцність зчеплення покриттів становила 100...150 МПа, а пористість 51...10 %.

Прийнято рішення дослідити механічні властивості системи «відновлена поверхня-покриття» (когезійну та адгезійну міцність, деформативність, рівень напруги в покритті та зоні адгезійного контакту, вид руйнування системи) на одному зразку за одне випробування за допомогою експериментально-розрахункової методики;

Запропоновано визначати оптимальне співвідношення адгезійної та когезійної міцності – за допомогою критерію адгезійно-когезійної рівномірності, який дозволить керувати якістю одержуваного покриття та з'єднання його з відновлюваною поверхнею, що полягають в отриманні необхідної структури в зоні їх з'єднання за допомогою контролю величини деформації процесу і т.д.

На підставі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено технологію відновлення валів, яка полягає в ЕДН дроту 40Х13. Розроблено ТП відновлення валів, який складається з наступних операцій: миття, дефектація, механічна обробка (МО) з метою зняття дефектного шару, струминно-абразивна обробка (САО) перед ЕДН для підвищення шорсткості відновлюваної поверхні та міцності зчеплення покриття, ЕДН покриттів, чистове та контроль шийок валу з напиленням покриттям;

Проведені лабораторні та стендові випробування валів показали, що зносостійкість поверхонь, відновлених за допомогою технології ЕДН у 2,5-5 рази вище, ніж поверхонь, відновлених газополуменевим напиленням (ГПН) та у 1,5-1,7 рази – порівняно з новими валами. Термін служби відновлених валів збільшився у 2...2,5 рази порівняно з новими деталями та деталями, відновленими ГПН.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЗОНА ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ, ЕЛЕКТРОДУГОВЕ НАПИЛЕННЯ, ГАЗОПОЛУМЕНЕВЕ НАПИЛЕННЯ, СТРУМИННО-АБРАЗИВНА ОБРОБКА, МЕХАНІЧНА ОБРОБКА .

ABSTRACT

Posvyatenko E.K., Golovashchuk M.B. Operating conditions, causes and types of wear of internal combustion engine shafts and increase their wear resistance and service life. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue 1 (51).

The article considers the direction of energy saving which can be solved during the introduction of surface hardening technologies.

Purpose: to create a method of forming wear-resistant coatings by electric arc spraying (EDN) and to establish the impact of its technological modes on the properties of coatings, to improve performance (wear resistance) and service life of motor shafts.

Object of research – the process of coating parts such as «shaft» by EDN.

The study consisted of the following stages:

- 1) analysis of the operating conditions of parts such as «shaft» of engines, the establishment of their main defects and ways to eliminate them. Choice of recovery method and its characteristics;
- 2) study of the properties of the restored surfaces of shafts with coatings: porosity, adhesive and cohesive strength of the coating system-detail, durability, microhardness and wear resistance;
- 3) optimization of the EDN mode of coatings and development of the technological process of shaft restoration and practical recommendations.

Mathematical models have been developed that describe the relationship of technological parameters of the coating process with their properties and the optimal process parameters that provide the necessary properties of coatings have been determined.

It was found that the adhesion strength of the coatings was 100 ... 150 MPa, and the porosity 51 ... 10%.

It was decided to investigate the mechanical properties of the system «restored surface-coating» (cohesive and adhesive strength, deformability, stress level in the coating and the zone of adhesive contact, the type of destruction of the system) on one sample per test using experimental methods;

It is proposed to determine the optimal ratio of adhesive and cohesive strength – using the criterion of adhesive-cohesive strength, which will control the quality of the coating and its connection with the renewable surface, consisting in obtaining the desired structure in the area of their connection by controlling the deformation. etc.

On the basis of theoretical and experimental researches the technology of restoration of shafts which consists in EDN of a wire 40X13 is developed. Developed TP shaft restoration, which consists of the following operations: washing, defecting, machining (MO) to remove the defective layer, jet-abrasive treatment (CAO) before EDN to increase the roughness of the recoverable surface and the strength of the coating, EDN coatings, clean and control of necks of a shaft with a sprayed covering;

Laboratory and bench tests of shafts showed that the wear resistance of surfaces restored using EDN technology is 2.5-5 times higher than surfaces restored by gas-flame spraying (GPN) and 1.5-1.7 times – compared to new shafts . The service life of restored shafts has increased by 2 ... 2.5 times compared to new parts and parts restored by GPN.

KEY WORDS: ZONE OF THERMAL INFLUENCE, ELECTRIC ARC SPRAYING, GAS-FLAME SPRAYING, JET-ABRASIVE TREATMENT, MECHANICAL.

АВТОРИ:

Посвятенко Едуард Карпович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства, e-mail: pek1943@ukr.net, тел. +380442808203, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 101а, orcid.org/0000-0001-6606-1365

Головашук Михайло Володимирович, асистент, Національний транспортний університет, асистент кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства, e-mail: mihajlogolovasuk@gmail.com тел. +380442808203, Україна, 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, к. 101а, orcid.org/0000-0002-5329-2612

AUTHOR:

Posviatenko Eduard K., Doctor of Technical Science, professor, National Transport University, professor, department of production, repair and materials science, e-mail: pek1943@ukr.net, +380442808203, Ukraine, Kyiv, st. Omelianovicha-Pavlenko, 1, r. 101a, orcid.org/0000-0001-6606-1365

Golovashchuk Mykhailo Volodymyrovych, Assistant, National Transport University, Postgraduate Student, Department of Production, Repair and Materials Science, e-mail: mihajlogolovasuk@gmail.com tel. +380442808203, Ukraine, 01010, Kyiv, street Omelyanovich-Pavlenko, 1, room 101a, orcid.org/0000-0002-5329-2612

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Ковбасенко С.В., кандидат технічних наук, доцент, професор, Національний транспортний університет, директор Центру заочного та дистанційного навчання, Київ, Україна.

Клименко С.А., доктор технічних наук, професор, Член-кореспондент НАН України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля, Київ, Україна.

REVIEWER:

Kovbasenko SV, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, National Transport University, Director of the Center for Distance and Distance Learning, Kyiv, Ukraine.

Klymenko SA, Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Superhard Materials. V.M. Bakulya, Kyiv, Ukraine.