

УДК 621.793.620.172

DOI: 10.18372/0370-2197.3(104).18974

Л.А. ЛОПАТА¹, І.Р. КАЧИНСЬКА¹, А.Є. СОЛОВИХ², С.Є. КАТЕРИНИЧ²¹Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка Національної академії наук України, Україна²Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

СТВОРЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ПОРОШКІВ САМОФЛЮСУЮЧИХ СПЛАВІВ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИМ ПРИПІКАННЯМ

У роботі розглядається процес підвищення функціональних властивостей покриттів із порошків сплавів, що самофлюсуються, шляхом використання методу електроконтактного припикання. Показано, що найвища міцність зчеплення покриттів з основою забезпечується за рахунок створення з боку основи широкої дифузійної зони. На межі покриття – деталь не має місця наявності рідкої фази. Це свідчить про те, що, на відміну від наплавлення, при електроконтактному припиканні немає місця перегріву і зона перемішування матеріалу покриття з металом деталі. Рентгенографічне вивчення фазового складу покриттів, показує, що при оптимальних режимах електроконтактного припикання в спеченому шарі в основному зберігаються карбіди, присутні в вихідному порошку, що свідчить про збереження спадкових властивостей матеріалу покриття при електроконтактному припиканні. Ефект подрібнення карбідної фази дозволяє отримувати спечені шари з рівномірно розподіленими карбідними включеннями, що сприяє збільшенню зносостійкості покриттів. Карбідні частинки мають специфічну гострокутну форму, що свідчить про збереження вихідних властивостей та структури матеріалу покриття при електроконтактному припиканні.

Ключові слова: зносостійкі покриття, самофлюсуючі сплави, електроконтактне припикання, композиційні покриття, зносостійкість

Актуальність досліджень. Актуальним завданням сучасного матеріалознавства є підвищення рівня функціональних властивостей покриттів із затребуваного промисловістю та порівняно дешевого класу порошкових матеріалів, як сплави, що самофлюсуються (СФС). Підвищити функціональні властивості покриттів із порошків СФС можна шляхом: удосконалення відомих складів порошків та технологічних процесів нанесення покриттів із них наплавкою, напиленням, припиканням та ін., створення нових порошків і технологічних процесів нанесення покриттів із них.

Стан проблеми та постановка завдання дослідження. У роботі розглядається процес підвищення функціональних властивостей покриттів із порошків самофлюсуючихся сплавів шляхом використання методу електроконтактного припикання (ЕКП). Порівняно з наплавленням у процесі нанесення покриттів електроконтактним припиканням порошків (ЕКПП) зберігаються їх склад та властивості. Метод електроконтактного припиканням порошків відрізняється низькою енергоємністю, високою продуктивністю, мінімальною зоною термічного впливу (табл. 1).

Порівняно з традиційними методами газотермічного напилення цей метод забезпечує пористість < 3...5 % та міцність зчеплення 180-220 МПа.

Дослідженням електроконтактних методів присвячені розробки вчених у галузі контактного зварювання, наплавлення, наварювання та припикання.

Таблиця 1

Техніко-економічні показники процесів створення зносостійких композиційних покриттів

Технологічний процес	Енергоємність, квт·год/кг	Швидкість нагріву, град/с	Зона термічного впливу, мм	Продуктивність кг/год
Газополуменеве наплавлення	12-25	до 10	25-30	0,5-1,0
Електродугове наплавлення під шаром флюсу	1,5-2,0		4-10	до 8
Наплавлення в середовищі CO ₂	1,0-1,5	-	2-8	5-6
Індукційна наплавка	0,6-0,7	до 10 ²	-	7-8
Електроконтактне припикання порошків	0,3-0,4	10 ³ - 10 ⁴	0,1-1,0	6-9

Однак, у цих роботах відсутні систематичні дослідження особливостей структури, складу та властивостей одержуваних покриттів у взаємозв'язку з параметрами процесу, тобто відсутній матеріалознавчий аспект. У зв'язку з цим представляють інтерес дослідження зносостійких високоміцних покриттів на основі порошків СФС, отримані електроконтактним припиканням за рахунок встановлення взаємозв'язку технологічних параметрів процесу електроконтактного припикання із структурою, складом та властивостями покриттів.

Результати досліджень. Науково-технологічною основою вибору матеріалу покриття було: з одного боку, встановлення фізико-хімічної узгодженості в системі «покриття-зміцнюєма поверхня»; з іншого – встановлення взаємозв'язку в системі «технологія-склад-структура-властивості».

У тому випадку, коли склад матеріалу для покриття заданий, на перший план виходять три основні критерії:

1) енергонасиченість

2) формованість порошкового матеріалу;

3) оптимальні температурно-годинні режими процесу отримання покриття, що формують такий його структурно-фазовий стан, який забезпечує задані функціональні властивості виробу.

Порошки, що самофлюсуються, (СФП) є важливим класом матеріалів для отримання захисних зміцнюючих покриттів (ЗЗП) і являють собою багатокомпонентні гетерогенні системи на основі нікелю Ni, кобальту Co, заліза Fe з твердими дисперсними включеннями карбідів, боридів, силіцидів.

Відповідно до фазового рентгенівського аналізу порошки, що самофлюсуються на основі заліза Fe являють собою:

1) твердий розчин α – заліза;

- 2) евтектику, що містить $Me_3(Si, B)$;
 - 3) надлишкові фази (карбіди Me_3C та бориди Me_2B).
- Порошки, що самофлюсуються на основі нікелю Ni містять:

- 1) твердий розчин нікелю;
- 2) карбіди хрому $Cr_{23}C_6$ та Cr_7C_3 ;
- 3) бориди хрому CrB ;
- 4) бориди нікелю Ni_3B .

Головна особливість порошків, що самофлюсуються - здатність розкислювати оксиди, які виринають у вигляді легкоплавкого шлаку на поверхню. Це дозволяє не використовувати спеціальні захисні середовища та флюси.

При проведенні досліджень використовували найбільш поширені порошки, що самофлюсуються на основі заліза - ПГ-С1 та на основі нікелю - ПГ-СРЗ, у тому числі зі зносостійкими добавками, зокрема порошку феросплаву вуглецевого - ФХ-800.

Процес формування покриттів при електроконтактному припикання включає:

- 1) формування (ущільнення порошкового шару) під тиском $P \geq 10$ МПа при температурах от кімнатної $T_{\text{кім.}}$ до $(0,1-0,2) T_{\text{пл.}}$;
- 2) спікання під тиском $P \geq 20-40$ МПа при пропусканні електричного струму при температурах $T \leq (0,6-0,8) T_{\text{пл.}}$;
- 3) припикання спеченого порошкового шару до зміцнюємої поверхні при тисках $P \geq 40 \dots 100$ МПа та температурах $T \leq (0,8-0,9) T_{\text{пл.}}$.

Для оцінки ефективності процесу електроконтактного припикання порошків, що самофлюсуються досліджували:

- комплекс властивостей системи «зміцнюєма поверхня - покриття» (адгезійна та когезійна міцність, пружні властивості);
- структурні особливості отриманих покриттів, зону дифузійної взаємодії (ЗДВ) та зону термічного впливу(ЗТВ);
- фізико-механічні властивості (пористість покриттів, мікротвердість, зносостійкість).

Висока міцність зчеплення покриттів $\sigma_{\text{зч.}}$ із зміцнюємою поверхнею (180-220 МПа) забезпечується за рахунок утворення з боку зміцнюємої поверхні широкої дифузійної зони товщиною до 0,02 мм за рахунок дифузії в неї нікелю Ni та хрому Cr (рис. 1).

Глибина дифузії хрому Cr в зміцнюєму поверхню (15 мкм) в системі «покриття (порошки, що самофлюсуються на основі заліза ПГ-С1) – зміцнюєма поверхня (сталь 45)» удвічі перевищує глибину дифузії нікелю Ni (7 мкм), що пов'язано з утворенням твердих необмежених розчинів в системі залізо-хром (Fe-Cr). Добавки в порошок самофлюсуючого сплаву (СФС) вуглецевого ферохрому ФХ-800 не впливає на глибину дифузії хрому.

На межі покриття – зміцнюєма поверхня деталі не має місця наявність рідкої фази (рис. 1). Це свідчить про те, що, на відміну від наплавлення, при електроконтактному припикання порошків немає перегріву та зони перемішування матеріалу покриття з матеріалом деталі.

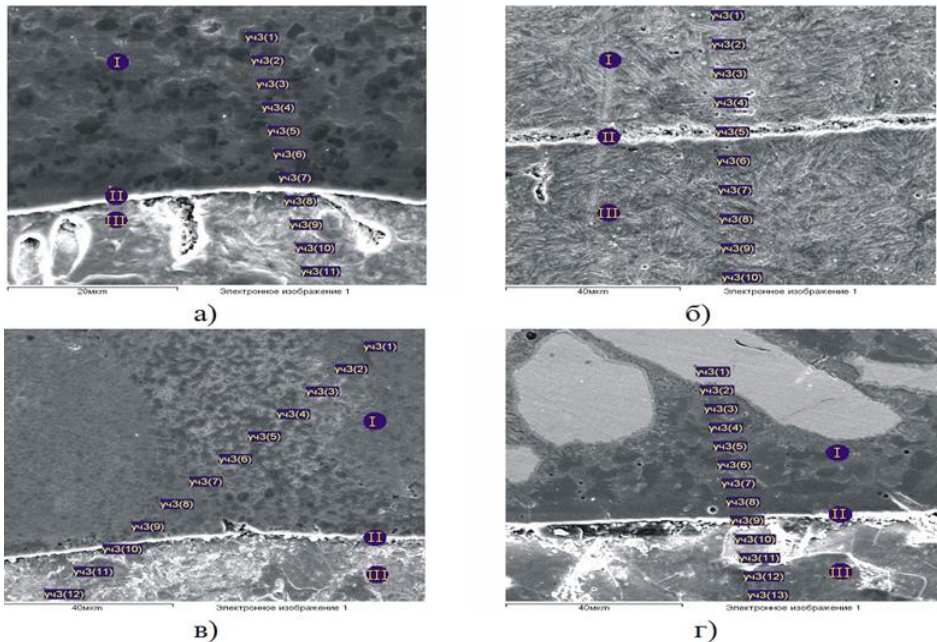


Рис. 1. Мікроструктура покриттів, отриманих електроконтактним прип'яканням порошкових матеріалів із самофлюсуючих сплавів (СФС):
а, б – ПГ-СР3; в - ПГ-С1; г - 70% ПГ-С1 та 30% ФХ-800

Рентгенографічне визначення фазового складу покриттів із порошка ПГ-С1 (СФП на основі заліза) показує, що при оптимальних режимах електроконтактного прип'якання в спеченому шарі покриття зберігаються карбіди Cr_7C_3 та $Cr_{23}C_6$, які присутні в вихідному порошку, що свідчить про збереження спадкових властивостей матеріалу покриття в процесі ЕКП. Покриття, отримане електроконтактним прип'яканням порошку ПГ-С1 складається з карбідної евтектики та твердого розчину. Структура частинок порошку ПГ-С1 складається з карбідів, високолегованого розчину вуглецю, легуючих елементів в α - та γ - залізі, легованого мартенситу та продуктів його розпаду.

Основою структури покриття з порошка ПГ-СР3 (СФП на основі заліза) є γ -твердий розчин елементів у нікелі, а його структурні складові:

- 1) евтектики $\gamma + Ni_3V$ та $\gamma + Ni_3V + Cr_nC_m$;
- 2) окремі частинки карбідів та боридів хрому.

Основні особливості структуроутворення покриттів при електроконтактному прип'якання СФП на основі заліза ПГ-С1 з добавками вуглецевого ферохрому ФХ-800 полягають у наступному:

- висока швидкість нагрівання та охолодження при додатку тиску до шара порошку призводить до розтріскування карбідних частинок (рис. 2);
- при температурах 1270 ... 1320 К чітко спостерігається розчинення карбідних частинок, що відбувається за межами зерен ферохрому. При підвищенні температури до 1370 ... 1470 К зменшується кількості частинок ферохрому в обсязі покриття та збільшується розмір дифузійної зони. Найбільш інтенсивно розчиняються дрібні карбіди розміром менше ніж 0,2 мкм.

Ефект подрібнення карбідної фази дозволяє отримувати спечені шари покриття з рівномірно розподіленими карбідними включеннями, що сприяє

збільшенню зносостійкості покриттів. Карбідні частинки мають специфічну гострокутну форму (рис. 2), що свідчить про збереження вихідних властивостей та структури матеріалу покриття при електроконтактному припиканні.



Рис. 2. Фрактограми покриття (x500), отриманого електроконтактним припиканням шихти з 60% ПГ-С1 та 40% ФХ-800 (1-ділянка руйнування частинок ФХ-800)

Наявність на міжфазному кордоні «покриття-змцнюєма поверхня» дифузійної зони (ДЗ) до 0,02 мм (рис. 1) та мінімальної зони термічного впливу (ЗТВ) до 1,8 мм (рис. 3, а) характеризується зміною мікротвердості (рис. 3, б).

Для порівняння слід зазначити, що при газополуменовому напиленні зона термічного впливу становить 24 ... 30 мм, при плазмовому напиленні – 4 ... 8 мм, при електродуговому напиленні – 2 ... 10 мм (табл. 1). Розміри зони термічного впливу (ЗТВ), її структура та властивості залежать від термічного циклу процесу електроконтактного припикання (рис. 3, в).

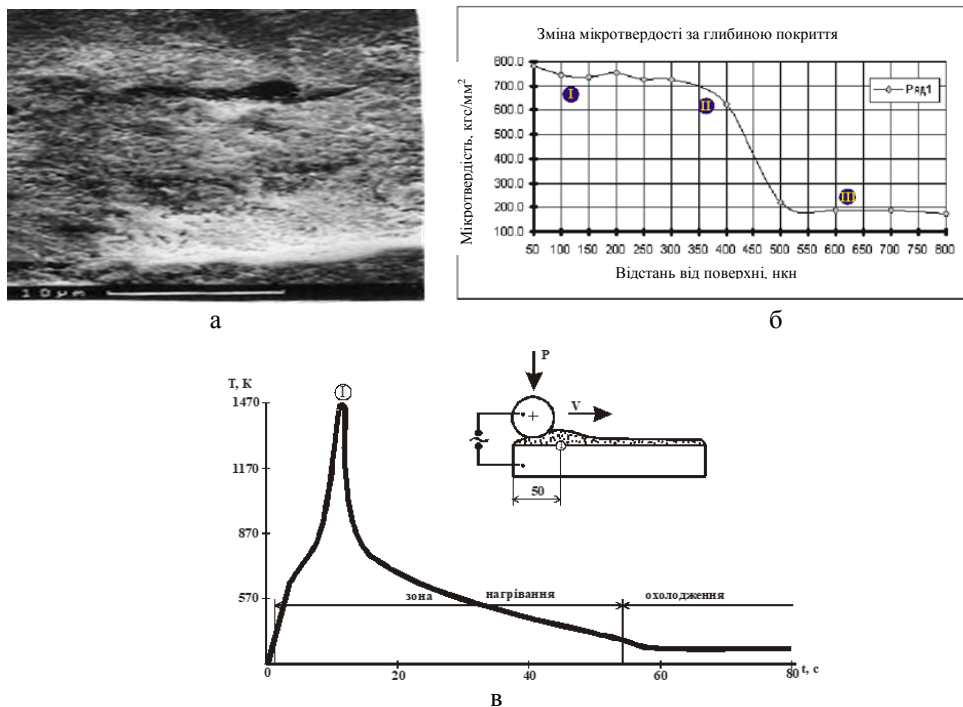


Рис. 3. Характеристика процесу електроконтактного припикання (матеріал покриття – шихта ПГ-С1+ФХ-800):

а - зони термічного впливу (x100); б - зміна мікротвердості; в - термічний цикл ЕКП

Імпульсний температурно-силовий вплив у процесі електроконтактного припикання покриття збільшує диспергування частинок твердої фази, сприяє збільшенню мікротвердості (рис. 3, б), а, отже, і зносостійкості покриття, що дозволяє підвищити термін служби деталей.

Таким чином, введення до складу покриттів з порошків сплавів ПГ-С1, ПГ-СР3 та ін., що самофлюсуються, ферохрому вуглецевого ФХ-800 та імпульсний температурно-силовий вплив у процесі формування покриття, що збільшує диспергування частинок твердої фази, сприяють підвищенню мікротвердості, зносостійкості покриттів та терміну служби деталей.

Висновки. Імпульсний температурно-силовий вплив у процесі формування покриттів при електроконтактному припикання призводить до диспергування частинок твердої фази, що сприяє збільшенню мікротвердості та зносостійкості отриманих покриттів у 2-3 рази. Розроблена технологія отримання покриттів із порошків сплавів, що самофлюсуються, електроконтактним припиканням зумовлює зниження вартості виготовлення та відновлення деталей за рахунок заміни легованої сталі на низьковуглецеву сталь з покриттями із порошків СФС при підвищенні ресурсу деталей у 3-5 разів.

Список літератури

1. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.Н. Інженерія поверхні. Київ, Наукова думка. 2007. 559с.
2. Лопата Л.А., Николайчук В.Я., Барановский В. Н. Создание износостойких композиционных покрытий на основе порошков самофлюсующихся сплавов электроконтактным припеканием Проблемы трибологии. 2015, №4. С. 92-98.
3. Лопата Л.А. Корж В.Н. Волков Ю. В. Николайчук В.Я. Упрочнение никель-хромовых сплавов электроконтактным припеканием композиционных порошков системы (NiCr-Cr₃C₂). Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы международного научно-технического семинара (26-28 февраля 2014, г. Свалява). Киев, АТМ України. 2014. С. 139-141.
4. В.Н. Корж, Л.А. Лопата, В.Я. Николайчук Предпосылки управления качеством формируемого покрытия и соединения его с деталью при электроконтактном припекании Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація». Випуск 23. Кіровоград, КНТУ. 2010. С. 339-344.
5. В.Я. Николайчук Дослідження впливу технологічних параметрів процесу електроконтактного припикання на властивості покриттів Сучасні застосування фундаментальних наук у виробничих процесах – 2013: Збірник наукових праць II регіональної науково - практичної конференції молодих науковців. Вінниця, ВНАУ. 2013 С. 106-111.
6. Лопата Л.А. Дудан А.В. Кожевникова Е.Е. Оптимизация технологических режимов процесса нанесения покрытий электроконтактным припеканием Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 14-й международной научно-технической конференции (2-6 июня 2014, Свалява). Киев, АТМ України. С. 66-68.

L. A. LOPATA, I. K. KACHYNSKA, A. E. SOLOVYKH, S. Ye. KATERINICH

CREATION OF WEAR-RESISTANT COMPOSITES COATED ON THE BASIS OF POWDER-BASED SELF-FLOWING ALLOYS BY ELECTRO-CONTACT SINTERING

The paper examines the process of increasing the functional properties of coatings made from powders of self-fluxing alloys by using the method of electric contact sintering. It has been shown that the adhesive strength of the coatings is high. with the base is ensured by the formation of a wide diffusion zone on the side of the base. There is no liquid phase at the coating-part boundary. This indicates that, unlike surfacing, during electrical contact sintering there is no overheating and no mixing zone of the coating material with the metal of the part. X-ray study of the phase composition of coatings shows that under optimal conditions of electric contact sintering, the carbides present in the original powder are mainly retained in the sintered layer, which indicates the preservation of the hereditary properties of the coating material during electric contact sintering. The effect of grinding the carbide phase makes it possible to obtain sintered layers with evenly distributed carbide inclusions, which helps to increase the wear resistance of coatings. Carbide particles have a specific acute-angled shape, which indicates the preservation of the original properties and structure of the coating material during electrical contact sintering. Impulse temperature-force influence in the process of coating formation during electric contact cauterization leads to the dispersion of solid phase particles, which helps to increase the microhardness and wear resistance of the obtained coatings by 2-3 times. The developed technology for obtaining coatings from self-fluxing alloy powders by electric contact sintering leads to a decrease in the cost of manufacturing and restoration of parts due to the replacement of alloy steel with low-carbon steel with coatings from SFP SFS while increasing the resource of parts by 3-5 times.

Key words: wear-resistant coatings, self-fluxing alloys, electric contact cauterization, composite coatings, wear resistance

References

1. Yushenko K.A., Borisov Yu.S., Kuznecov V.D., Korzh V.N. *Inzheneriya poverhni*. Kiyiv, Naukova dumka. 2007. 559 s.
2. Lopata L.A., Nikolajchuk V.Ya., Baranovskij V, N. Sozdanie iznosostojkikh kompozicionnyh pokrytij na osnove poroshkov samoflyusuyushih slyav splavov elektrokontaktym pripekaniem *Problemi tribologiyi*. 2015, №4. S. 92-98.
3. Lopata L.A., Korzh V.N., Volkov Yu.V., Nikolajchuk V.Ya. Uprochnenie Ni-Cr splavov elektrokontaktym pripekaniem kompozicionnyh poroshkov sistemy (NiCr-Cr₃C₂). *Sovremennye problemy podgotovki proizvodstva, zagotovitel'nogo proizvodstva, obrabotki, zboriki i remonta v promychlennosti i na transporte: mezhdun: Tezisy dokl. nauch. - tehn. Seminar (26-28 fevr. 2014. Svalyava)*. Kiev, ATM Ukrainy. 2014. C. 139-141.
4. Korzh V.N., Lopata L.A., Nikolajchuk V.Ya. *Predposylki upravleniya kachestvom formiruemogo pokrytiya i soedineniya ego s detalju pri elektrokontaktym pripekaniiu. Tehnika v silskogospodarskomu vyrobnyctvi, galuzeve machynobuduvannya, avtomatyzaciya: Zbirnyk naukovyh prac. Kirovogradsky nacionalny tehniczny universitet (KNTU)*. Kirovograd, 2010. V. 23. C. 339-344.
5. V.Ya. Nikolajchuk *Doslidzhennya vplivu tehnologichnih parametriv procesu elektrokontaktynogo pripikannya na vlastivosti pokryttiv Suchasni zastosuvannya fundamentalnih nauk u virobnychih procesah - 2013: Zbirnyk naukovih prac II regionalnoyi naukovo - praktichnoyi konferenciyi molodih naukovciv*. Vinnicya, VNAU. 2013 S. 106-111.
6. Lopata L.A. Dudan A.V. Kozhevnikova E.E. *Optimizaciya tehnologicheskikh rezhimov processa naneseniya pokrytij elektrokontaktym pripekaniem Inzheneriya poverhnosti i renovaciya izdelij: Materialy 14-j mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii (2-6 iyunya 2014, Svalyava)*. Kiev, ATM Ukrainy. S. 66-68.

Lopata Larisa Anatolyivna - candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher of the department of strength of materials and structural elements in thermoforce fields and gas flows, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of National Academy of Sciences of Ukraine, 2, Salovo-botanical Street, Kyiv, Ukraine, 01014, E-mail: beryuza@ukr.net, [ORCID: 0000-0002-2053-9252](https://orcid.org/0000-0002-2053-9252)

Kachynska Iryna Richardivna - chief engineer-researcher of the department of resistance of materials and structural elements to fatigue and impulse loads G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of National Academy of Sciences of Ukraine, 2, Salovo-botanical Street, Kyiv, Ukraine, 01014, E-mail: kir508@ukr.net; [ORCID: 0009-0006-7623-2897](https://orcid.org/0009-0006-7623-2897)

Solovykh Andriy Yevhenovich - candidate of technical sciences, dotsent of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National University. (Kropyvnytskyi, ave. University 8, 25006, Ukraine), E-mail: ekskntu09@gmail.com, [ORCID: 0000-0001-5780-3582](https://orcid.org/0000-0001-5780-3582)

Katerinich Stanislav Yevhenovich - candidate of technical sciences, dotsent of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National University. (Kropyvnytskyi, ave. University 8, 25006, Ukraine), E-mail: katerinichs@ukr.net, [ORCID: 0000-0003-30520747](https://orcid.org/0000-0003-30520747)

Лопата Лариса Анатоліївна - кандидат техн. наук, доцент, науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках, Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренко Національної академії наук України, вулиця Садово-ботанічна, 2, м. Київ, Україна, 01014. E-mail: beryuza@ukr.net <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>

Качинська Ірина Річардівна – головний інженер – дослідник відділу опору матеріалів і елементів конструкцій руйнуванню від втоми та імпульсних навантажень Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренко Національної академії наук України, вулиця Садово-ботанічна, 2, м. Київ, Україна, 01014. E-mail: kir508@ukr.net <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>

Солових Андрій Євгенович - канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету, (проспект Університетський 8, м. Кропивницький, 25006. Україна), тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: ekskntu09@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>

Катеринич Станіслав Євгенович - канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету (проспект Університетський 8, м. Кропивницький, 25006. Україна), тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: katerinichs@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>