

УДК 669.187.56

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226182

© Білоник І.М.¹, Береговенко М.М.², Білоник Д.І.³, Капустян О.Є.⁴,
Смакограй А.Є.⁵, Шумикін С.О.⁶**ВИБІР МАТЕРІАЛУ І СПОСОБУ ЗМІЦНЕННЯ УДАРНОЇ ЧАСТИНИ
МОЛОТКІВ МЕХАНІЗМУ СТРУШУВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРІВ**

У статті представлені дані про зміцнення молотків ударного механізму струшування осаджувальних і коронуючих електродів електрофільтрів електрошлаковим наплавленням. Огляд і аналіз публікацій у сфері газоочищення дозволив виявити сформовані тенденції до підвищення ефективності передачі ударного імпульсу механізму струшування електрофільтру шляхом зниження енерговитрат і збереження високої ефективності ударного імпульсу. Оскільки ефективність роботи ударного механізму струшування електрофільтру має обернену залежність від площі контакту бойка і хвилеводу, їх пластична деформація в процесі експлуатації призводить до зменшення амплітуди і збільшення тривалості ударного імпульсу, що негативно позначається на роботі механізму струшування електрофільтрів. Визнано необхідним прагнення забезпечувати точковий контакт в ударних механізмах. Проведено аналіз матеріалів, які можна доцільно рекомендувати для виготовлення ударної частини молотка. Представлений аналіз показників твердості та хімічного складу зносостійких матеріалів, які працюють в умовах ударного впливу і володіють задовільною зварюваністю з низьковуглецевими сталями. Показано, що використання нелегованих сталей вимагає застосування термічної обробки і також призводить до погіршення зварюваності. Економічно доцільними матеріалами для зміцнення молотка є електроди вітчизняного виробництва, які не містять дорогих легуючих елементів. Запропонована і аналітично обґрунтована система легування молотка ударного механізму з метою максимального підвищення коефіцієнта корисної дії електрофільтру при збільшенні експлуатаційної надійності молотків і зниженні їх вартості шляхом електрошлакового наплавлення порошковим електродом ударної частини на хвостовик.

Ключові слова: удар, твердість, зміцнення, електрошлакове наплавлення, молоток, порошковий електрод.

I.M. Bilonik, M.M. Berehovenko, D.I. Bilonik, O.Ye. Kapustian, A.H. Smakohrai, S.O. Shumikin. Selection of a material and a hardening method for the impact part of the hammers of the electrostatic precipitators shaking mechanism. The article presents data on the hardening of the hammers of the percussive mechanism of shaking the receiving and corona electrodes of electrostatic precipitators by electroslag surfacing. The review and analysis of publications in the field of gas purification made it possible to reveal the current trends towards an increase in the efficiency of impact impulse transmission of the electrostatic precipitator shaking mechanism by reducing energy consumption and maintaining a high efficiency of the impact impulse. Since the efficiency of the percussive mechanism for shaking the electrostatic precipitator is inversely related to the contact area of the striker and the waveguide, their plastic deformation during operation results

¹ канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-3873-5307, bilonikelena@gmail.com

² директор ТОВ КаЗБеГ, м. Кривий Ріг, aek@zntu.edu.ua

³ аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0003-3274-0604, bilonikelena@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-8979-8076, aek@zntu.edu.ua

⁵ головний енергетик, ТОВ КаЗБеГ, м. Кривий Ріг, aek@zntu.edu.ua

⁶ канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0003-3407-2507, Shusa1958@ukr.net

in a decrease in the amplitude and an increase in the impact impulse duration, which negatively affects the operation of the shaking mechanism of the electrostatic precipitators. The quest for ensuring point contact in percussive mechanisms has been recognized as necessary. The analysis of the materials recommended for the manufacture of the impact part of the hammer has been carried out. An analysis of the hardness and chemical composition indicators of wear-resistant materials from low-carbon steel operating under shock conditions and possessing satisfactory weldability has been presented. It has been shown that the use of unalloyed steel requires the use of heat treatment and results in a deterioration in weldability as well. As far as economy is concerned the home produced electrodes for hardening the hammer are the most advisable as they do not contain expensive alloying elements. An analytically substantiated system for alloying the hammer of the percussive mechanism has been proposed with the aim of maximizing the efficiency of the electrostatic precipitator while increasing the operational reliability of the hammers and reducing their cost by electroslag surfacing with a powder electrode of the impact part on the shank.

Keywords: *impact, hardness, hardening, electroslag surfacing, hammer, powder electrode.*

Постановка проблеми. В електричних осаджувальних фільтрах одним із основних вузлів є ударна система струшування осаджувальних електродів. Дана система складається з електромеханічного приводу, який обертає вал, на якому з певним кроком і кутом повороту розташовані молотки. При обертанні валу молотки за чергою, досягаючи критичної точки, по круговій траєкторії під власною вагою з прискоренням вільного падіння вдаряють об ковадла балок струшування. При цьому ударний імпульс передається через балки струшування на осаджувальні електроди і тим самим очищує їх від зібраного пилу. Аналогічно працює ударний механізм струшування коронуючих електродів [1].

Ефективність роботи ударного механізму струшування електрофільтру залежить не тільки від оптимальних енергокінематичних параметрів ударного впливу молотків на ковадлу балок струшування. Як показано в роботах [2-4], для всіх ударних механізмів потрібно забезпечувати максимальний коефіцієнт передачі енергії удару від бойка до хвилеводу. Ця вимога реалізується, якщо взаємодія контактуючих бойка і хвилеводу відбувається на мінімальній площі (точковий контакт). Зі збільшенням площі контакту коефіцієнт передачі енергії знижується [2, 5]. Слід також зазначити, що зі збільшенням площі контакту бойка і хвилеводу, які співударяються, змінюються параметри ударного імпульсу – зменшується амплітуда і збільшується тривалість. При цьому ефективність впливу ударного імпульсу на оброблюваний об'єкт знижується.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На рисунку 1 представлені молотки ударного механізму до експлуатації і після напрацювання 250×10^3 ударних циклів. Матеріал молотків: Сталь 20, 160...170 НВ. Як видно, первісна контактна поверхня молотка (рис. 1, а) зазнала пластичну деформацію і її площа істотно зросла (рис. 1, б).

Грунтуючись на класичних положеннях теорії удару [3, 5, 6], були розраховані коефіцієнти передачі енергії для представленого випадку (рис. 1). Новий молоток: площа контакту близько 10 мм^2 , коефіцієнт передачі енергії 0,9987. Молоток після напрацювання 250×10^3 ударних циклів: площа контакту близько 3500 мм^2 , коефіцієнт передачі енергії 0,8891. Визначимо енергетичні втрати, зумовлені збільшенням площі контакту. Даний молоток (рис. 1, б), згідно [7], повинен допрацювати до повного циклу експлуатації електрофільтру ще близько $(300...350) \times 10^3$ ударних циклів. Кінетична енергія одного ударного імпульсу (наприклад, для механізму фільтра ПДГС) становить 75 Дж [8]. Для нового молотка передана енергія одним імпульсом буде 74,90 Дж, для зношеного – 66,68 Дж. Величина втрати для одного удару становить 8,22 Дж. За цикл роботи $(300...350) \times 10^3$, який залишився до повного циклу експлуатації, втрати енергії на один молоток, в середньому, будуть 2671,5 кДж. Так як у фільтрах застосовують зазвичай 200-300 молотків, то загальні втрати, в середньому, складуть 801,45 МДж (0,234 МВт).

Крім того, як було зазначено вище, зі збільшенням площі контакту молотка з ковадлом балки струшування, які співударяються, ефективність дії ударного імпульсу знижується. Це негативно позначається на очищенні як осаджувальних, так і коронуючих електродів.

Мета дослідження – підвищення ефективності роботи механізму струшування електро-

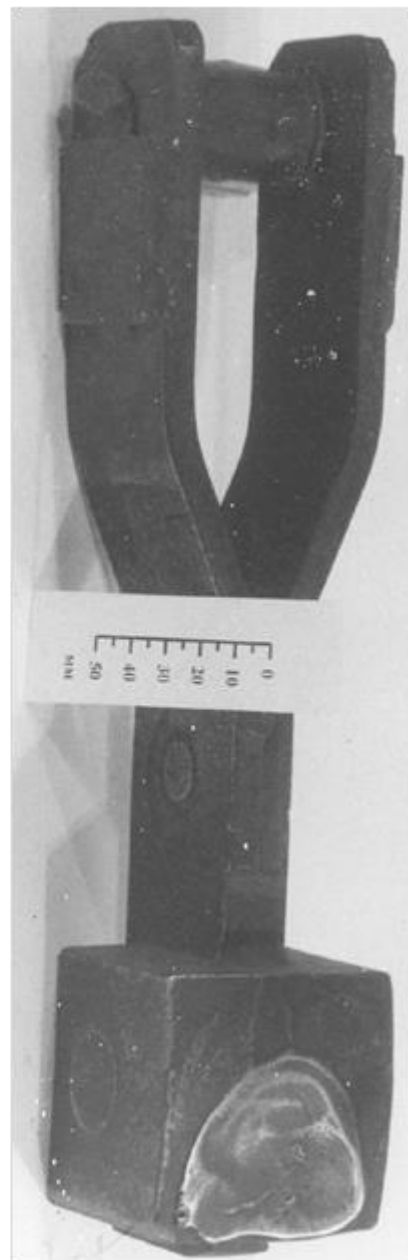
фільтру шляхом формування ударної частини молотка матеріалом, який володіє підвищеною стійкістю до пластичної деформації в умовах дії ударних навантажень та забезпечує мінімальну і незмінну площу ударного контакту молотка з ковадлом балки струшування протягом усього циклу експлуатації.

Для цього необхідно:

- 1) провести аналіз матеріалів, які можна рекомендувати для виготовлення ударної частини молотка;
- 2) вибрати матеріал і спосіб зміцнення ударної частини молотків;
- 3) виготовити дослідні зразки молотків із зміцненою ударною частиною;
- 4) дослідити структуру і властивості металу зміцненої частини молотка;
- 5) провести випробування молотків із зміцненою ударною частиною;
- 6) дати рекомендації для промислового застосування молотків із зміцненою ударною частиною.



а



б

Рис. 1 – Молоток до експлуатації (а) і після напрацювання 250×10^3 циклів (б)

Виклад основного матеріалу. Для зміцнення ударної частини молотків рекомендуються матеріали, які володіють твердістю 30-35 HRC, гарною зварюваністю і зносостійкістю в умовах дії ударних навантажень і тертя метал по металу [8, 9].

До таких матеріалів можна віднести сталі з вмістом вуглецю 0,20-0,45% – Сталі 20, 30, 35, 45. Однак, для даних сталей отримати зазначену твердість можна тільки термічною обробкою, і також слід врахувати, що підвищення вмісту вуглецю погіршує зварюваність.

Розглянемо зносостійкі матеріали, які працюють в умовах ударного впливу і володіють задовільною зварюваністю з низьковуглецевими сталями. Таким вимогам, наприклад, відповідають матеріали для наплавлення фірми Lincoln Electric і, зокрема, Wearshield ABR, а також Wearshield BU-30, які добре чинять опір ударним навантаженням і помірному абразивному впливу.

Для наплавлення, що зміцнює ударну частину молотка, можна рекомендувати матеріали фірми Esab. Такі, як ОК Weartrode 50 або Weartrode 45, або Weartrode 35. Наплавлений метал добре зарекомендував себе при дії ударних навантажень і абразивному зносі. Провідним українським виробником зносостійких наплавочних матеріалів є фірма ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК». Для наплавлення, що зміцнює ударну частину молотка, можна застосувати матеріали ВЕЛТЕК-Н290, ВЕЛТЕК-Н350-PM або ВЕЛТЕК-Н370-PM (табл.).

Таблиця

Хімічний склад і твердість наплавленого металу [10-12]

Марка	Хімічний склад наплавленого металу, мас. %						Твердість, HRC
	C	Mn	Si	Cr	Mo	інші	
Wearshield ABR [10]	0,2	1,1	0,75	6,5	0,40	-	28-53
Wearshield BU-30 [10]	0,16	0,87	1,14	1,49	0,58	-	32-38
ОК Weartrode 35 [11]	0,09	0,9	0,8	3,0	-	-	32
ОК Weartrode 45 [11]	0,3	2,0	0,8	1,3	-	-	45
ОК Weartrode 50 [11]	0,46	0,4	0,5	6,0	0,5	-	>45
ВЕЛТЕК-Н290 [12]	0,1	0,6	0,5	0,5	0,5	0,3 Ni	24-30
ВЕЛТЕК-Н350-PM [12]	0,2	1,2	0,8	1,1	0,4	-	34-44
ВЕЛТЕК-Н370-PM [12]	0,15	0,6	0,8	3,0	1,2	0,4 V	30-42
ОЗН-300М	0,10	3,0	1,3	-	-	-	30-35

Слід зазначити, що всі вище розглянуті матеріали хоча і забезпечують необхідну твердість 280-320 НВ, але їх застосування вимагає додаткової термічної обробки або вони містять дорогі легуючі елементи, такі як хром, молібден, нікель (Wearshield ABR, Велтек-Н290).

Більш економічним матеріалом для наплавлення є дріт Нп-85 (ДСТУ 10543-82). Незважаючи на те, що наплавлений метал такими дротами має необхідну твердість 260-340 НВ, його застосування обмежено для експлуатації в умовах ударних навантажень.

Відомий матеріал для наплавлення ОЗН-300М, який не містить дорогих легуючих елементів і має гарну зварюваність, рекомендований для наплавлення деталей з вуглецевих і низьколегованих сталей, які працюють в умовах дії інтенсивних ударних навантажень і тертя метал по металу. Даний матеріал володіє підвищеною стабільністю показників твердості і зносостійкості в широкому діапазоні швидкостей охолодження, що дозволяє застосовувати різні технології наплавлення при збереженні якісних показників. Перераховані вище характеристики стали підставою для зміцнення ударної частини молотків даним матеріалом.

Для проведення даної роботи вибрали молоток, конструкція якого представлена на рисунку 2. При виготовленні даних молотків за стандартною технологією застосовують Сталь 20.

З аналізу технологічності виготовлення молотка (рис. 2) доцільно операцію зміцнення ударної частини об'єднати з формуванням ударної частини електрошлаковим приплавленням (або ж вертикального ЕШН). При цьому, на хвостовик зі Сталі 20 (180×60×12 мм) наплавляють ударну частину (діаметром 105 мм і товщиною 50 мм). Схема процесу приведена на рисунку 3.

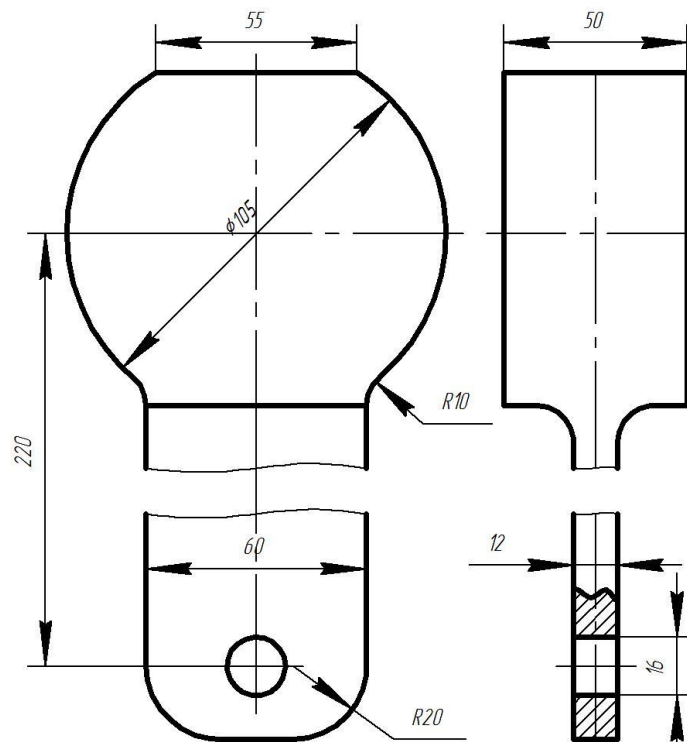


Рис. 2 – Конструкція молотка, який пропонується для зміцнення ЕШН ударної частини

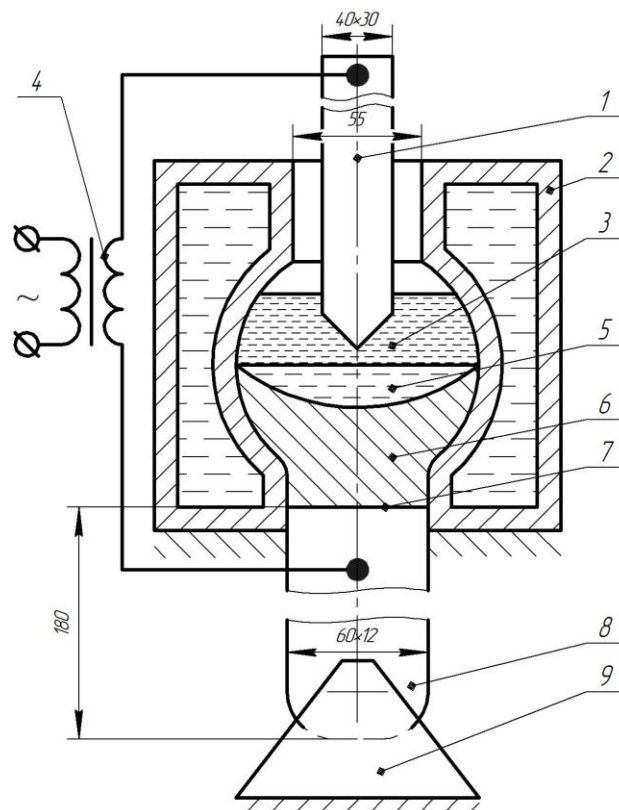


Рис. 3 – Схема процесу ЕШН: 1 – електрод, який витрачається; 2 – кристалізатор; 3 – шлакова ванна; 4 – джерело живлення; 5 – металева ванна; 6 – наплавлений метал ударної частини, який закристалізувався; 7 – зона сплавлення ударної частини з хвостовиком; 8 – хвостовик; 9 – фіксатор

Важливою перевагою литого електрошлакового металу є підвищена чистота за неметалевими включеннями, сіркою і фосфором, а також монолітність і висока щільність. Ці властивості забезпечують підвищену контактну витривалість [13], що збільшує опір зносу і пластичній деформації при ударній дії.

Необхідний хімічний склад наплавленого металу при ЕШН можна отримати наступним чином [14]:

1. Використовувати прокат сталей необхідного або близького до нього хімічного складу і при потребі ввести за допомогою дозаторів легуючі добавки на поверхню шлакової ванни. При цьому способі відбувається значний угар легуючих елементів.

2. Ввести легуючі добавки за допомогою лігатурного електрода суцільного перетину. Цей спосіб дає найкращі результати по розчиненню і засвоєнню легуючих елементів в металевій ванні. Однак, для отримання лігатурного електрода необхідно мати металургійний комплекс (плавильний агрегат, установка напівбезперервного лиття). Також немінучі втрати високолегованого металу при виготовленні лігатурного електрода.

3. В якості електрода, який витрачається, застосувати порошкову стрічку або коробчастий порошковий електрод, заповнений шихтою з лігатури або феросплавів. При даному випадку забезпечується точне дозування легуючих компонентів, висока однорідність хімічного складу наплавленого металу. Цей спосіб дозволяє отримувати широку гаму хімічних складів наплавленого металу [14].

Тому для ЕШН ударної частини молотків застосували коробчасті порошкові електроди, конструкція яких представлена на рисунку 4.

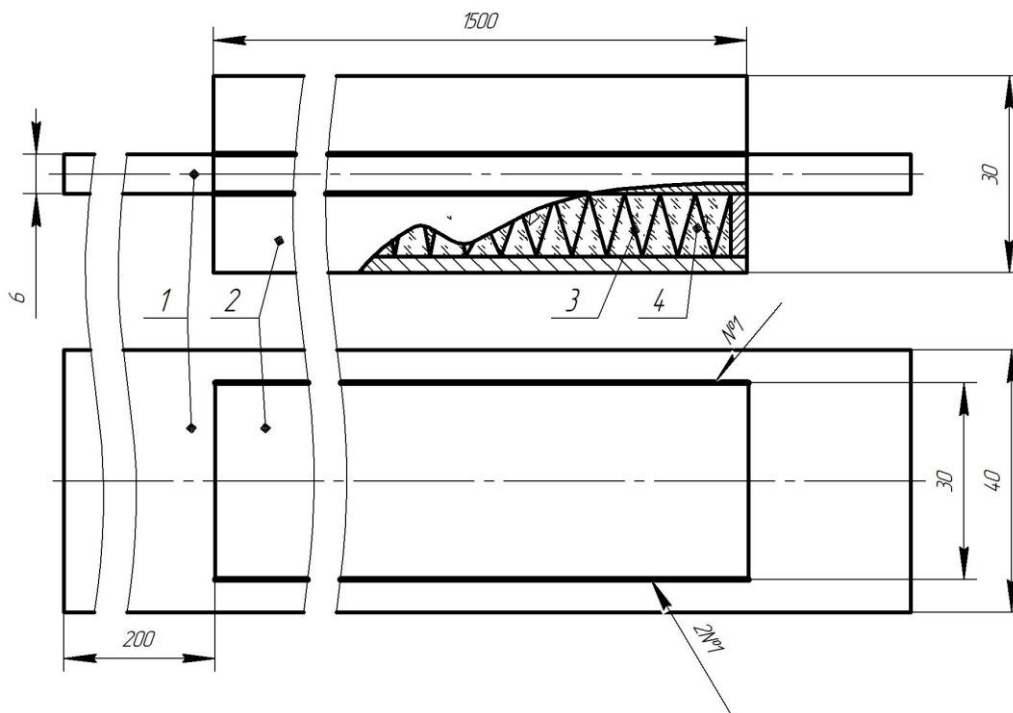


Рис. 4 – Порошковий електрод, який витрачається, для ЕШН: 1 – сердечник; 2 – коробчаста оболонка; 3 – металева вставка; 4 – шихта

Висновки

1. Встановлено: при експлуатації молотків, виготовлених із Сталі 20, відбувається пластична деформація і значне збільшення площі контактної частини, що призводить до підвищених енерговитрат у механізмі струшування електрофільтру.

2. В результаті аналізу матеріалів, які володіють підвищеною стійкістю до пластичної деформації, гарною зварюваністю і не містять дорогих легуючих елементів, запропоновано ударну частину молотків наплавляти металом наступного хімічного складу, %: 0,10 C; 3,00 Mn; 1,30 Si; 0,02 S; 0,03 P.

3. Обґрунтовано доцільність застосування електрошлакового процесу з використанням порошкового коробчастого електрода, який витрачається, для наплавлення ударної частини молотка.

Перелік використаних джерел:

1. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов : справ. изд. / Г.М.-А. Алиев. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Билоник И.М. Определение силовых параметров взаимодействия бойка с наковальней в механизме встряхивания электрофильтра / И.М. Билоник, П.К. Штанько, А.С. Петрашев, А.А. Шумилов // Надежность и долговечность механизмов, элементов конструкций и биомеханических систем: тез. докл. XIV Междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь, 2006. – С. 101-105.
3. Алимов О.Д. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремьянц. – М. : Наука, 1985. – 354 с.
4. Манжосов В.К. Моделирование продольных ударов в стержневых системах : монография / В.К. Манжосов, В.В. Слепухин. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 208 с.
5. Зукас Дж. Динамика удара. Механика деформируемого твердого тела / Дж. Зукас. – М. : Мир, 1985. – 206 с.
6. Пановка Я.Г. Введение в теорию механического удара / Я.Г. Пановка. – М. : Наука, 1977. – 224 с.
7. Типовая инструкция по эксплуатации электрофильтров: РД 34.27.504-91. – М., 1993. – 44 с.
8. Чекалов Л.В. Практическая экотехника: электрическая и механическая очистка газов / Л.В. Чекалов. – Семибратово : Кондор-Эко, 2008. – 156 с.
9. Полевой С.Н. Упрочнение машиностроительных материалов: справочник / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов. – М. : Машиностроение, 1994. – 496 с.
10. Lincoln Electric: Hardfacing products [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.lincolnelectric.com/en-us/consumables/hardfacing/Pages/hardfacing.aspx>.
11. Hardfacing electrodes [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.esabasia.com/asia/en/products/filler-metals/covered-stick-electrodes-smaw/hardfacing-electrodes/index.cfm>.
12. Порошковые дробы для наплавления производства ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://weldtech-group.com/ukr/surfacing>.
13. Электрошлаковый металл / под. ред. Б.Е. Патона, Б.И. Медовара. – К. : Наукова думка, 1981. – 680 с.
14. Калинин Н.А. Исследование характера оплавления электродного торца при электрошлаковой наплавке порошковым электродом / Н.А. Калинин, И.М. Билоник, П.К. Штанько, А.А. Шумилов // Вісник СевНТУ. – 2011. – Вип. 120. – С. 247-252. – (Серія : Механіка, енергетика, екологія).

References:

1. Alyev H. M.-A. *Tekhnika pyleulavlivaniia i ochistki promyshlennykh gazov* [Dust collection and cleaning technology of industrial gas]. Moscow, Metallurgii Publ., 1986. 544 p. (Rus.)
2. Bylonyk Y.M., Shtanko P.K., Petrashev A.S., Shumylov A.A. *Opredelenie silovykh parametrov vzaimodeistviia boika s nakovalnei v mekhanizme vstriakhivaniia elektrofiltra. Tezisy doklada XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhniceskoi konferentsii «Nadezhnost i dolgovechnost mekhanizmov, elementov konstrukticii i biomekhanicheskikh sistem»* [Abstracts of the 14th International Scientific and Technical Conference «Reliability and durability of mechanisms, structural elements and biomechanical systems»]. Sevastopol, 2006, pp. 101-105. (Rus.)
3. Alymov O.D., Manzhosov V.K., Eremiants V.E. *Udar. Rasprostranenie voln deformatsii v udarnykh sistemakh* [Hit. Propagation of deformation waves in shock systems]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 354 p. (Rus.)
4. Manzhosov V.K., Slepukhyn V.V. *Modelirovanie prodolnykh udarov v sterzhnevyykh sistemakh* [Simulation of longitudinal impacts in rod systems]. Ulianovsk, UIGTU Publ., 2011. 208 p. (Rus.)
5. Zukas Dzh. *Dinamika udara. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Impact dynamics. Deformable Solid Mechanics]. Moscow, Mir Publ., 1985. 206 p. (Rus.)
6. Panovka Ya.H. *Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara* [Introduction to the theory of mechani-

- cal shock]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 224 p. (Rus.)
7. *РД 34.27.504-91. Tipovaia instruktsiia po ekspluatatsii elektrofiltrov* [Typical operating instructions for electrostatic precipitators]. Moscow, 1993. 44 p. (Rus.)
 8. Chekalov L.V. *Prakticheskaia ekotekhnika: elektricheskaia i mekhanicheskaia ochistka gazov* [Practical eco-technology: electrical and mechanical gas cleaning]. Semibratovo, Kondor-Eko Publ., 2008. 156 p. (Rus.)
 9. Polevoi S.N., Evdokymov V.D. *Uprochnenie mashinostroitelnykh materialov* [Strengthening engineering materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1994. 496 p. (Rus.)
 10. *Lincoln Electric: Hardfacing products* Available at: <https://www.lincolnelectric.com/en-us/consumables/hardfacing/Pages/hardfacing.aspx> (accessed 12 September 2020).
 11. *Hardfacing electrodes* Available at: <https://www.esabasia.com/asia/en/products/filler-metals/covered-stick-electrodes-smaw/hardfacing-electrodes/index.cfm> (accessed 15 September 2020).
 12. *Poroshkovi droty dlia naplavlennia vyrobnytstva TOV «TM Veltek»* (Flux-cored wires for surfacing produced by OOO «TM Veltek») Available at: <https://weldtech-group.com/ukr/surfacing> (accessed 14 September 2020).
 13. Paton B.Ye., Medovar B.Y. *Elektroshlakovyi metall* [Electroslag metal]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981. 680 p. (Rus.)
 14. Kalynyn N.A., Bylonyk Y.M., Shtanko P.K., Shumylov A.A. Issledovanie kharaktera oplavleniia elektrodnogo tortca pri elektroshlakovoi naplavke poroshkovym elektrodom [Investigation of electrode end fusion nature during electroslag surfacing with a powder electrode]. *Visnyk SevNTU. Serii: Mekhanika, enerhetyka, ekolohiia – Bulletin of SevNTU. Series: Mechanics, Energy, Ecology*, 2011, vol. 120, pp. 247-252. (Rus.)

Рецензент: О.А. Мітяєв

д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка»

Стаття надійшла 18.10.2020