

- erogeneous diffusive nucleation and their use to form new type microstructures and eliminate chemical nonuniformities in bulk industrial product made of alloy structural steels». Certificate about registration no. 68903, 2016.
3. Tkachenko I.F., Tkachenko K.I. Ob osobennostyax obrazovany'ya austeny'ta pry' nagreve legy'rovannykh stalej [Some features of the austenite formation at alloy steel heating]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, 2002, no. 12, pp. 25-27. (Rus.)
  4. Tkachenko I.F., Tkachenko K.I., Miroshnichenko V.I., Tkachenko F.K. *Sposib termichnoї obrobki dlia formuvannia stabil'nikh za parametrami nanorozmirnikh struktur u metalevikh materialakh z polimorfniimi matrichnimi fazami* [Method of heat treatment for obtaining nano-sized structures with stable parameters in metallic materials with polymorphic matrixes]. Patent UA, no. 142597, 2020. (Ukr.)
  5. Tkachenko I.F., Tkachenko F.K., Tkachenko K.I., Miroshnichenko V.I. Vpliv rivnovazhnoї dislokatsiinoї substrukтури na morfologiiu strukturnikh skladovikh pri geterogennikh fazovikh peretvorenniakh u polikristalichnikh metalevikh splavakh [Influence of equilibrium dislocation substructure on structure morphology in polycrystalline metallic materials]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Serija : Tehnični nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2016, no. 33, pp. 50-57. (Ukr.)
  6. Tkachenko I.F., Tkachenko F.K., Tkachenko K.I., Miroshnichenko V.I. Vpliv osoblivostei fazovikh peretvoren' pri nagrivanni ta okholodzhenni na strukturi i sprotiv udarnomu ruinuvanniu legovanikh konstruktsiynikh stalei [Effects of the phase transition features at heating and cooling of alloy structural steels on theirs microstructures and impact resistance]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Serija : Tehnični nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2017, no. 34, pp. 18-23.

Рецензент: Л.С. Малінов  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 17.03.2020

УДК 621.791.927.55

doi: 10.31498/2225-6733.40.2020.216035

© Самогугін С.С.<sup>1</sup>, Пірч І.І.<sup>2</sup>, Самогугіна Ю.С.<sup>3</sup>,  
Безумова (Христенко) О.А.<sup>4</sup>

## КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ПЛАЗМОТРОНІВ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОЇ НАНОСТРУКТУРИЗАЦІЇ МЕТАЛОРИЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

*Встановлені закономірності впливу конструктивних параметрів плазмотронів з секціонованою міжелектродною вставкою на ефективність процесів плазмового модифікування. Показана перспективність використання плазмотронів цього типу з дуговим каналом, що звужується, для реалізації плазмової наноструктуризації металообробного інструменту.*

**Ключові слова:** плазмотрон, наноструктуризація, плазмове модифікування, металорізальний інструмент, секціонована міжелектродна вставка.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовській державний технічний університет», м. Маріуполь, [samotugin\\_s\\_s@pstu.edu](mailto:samotugin_s_s@pstu.edu)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовській державний технічний університет», м. Маріуполь, [pirch\\_i\\_i@pstu.edu](mailto:pirch_i_i@pstu.edu)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент ДВНЗ «Приазовській державний технічний університет», м. Маріуполь, [samotugina\\_u\\_s@pstu.edu](mailto:samotugina_u_s@pstu.edu)

<sup>4</sup> аспірант, ДВНЗ «Приазовській державний технічний університет», м. Маріуполь, [khrystenko.olga@gmail.com](mailto:khrystenko.olga@gmail.com)

*Самотугин С.С., Пирч И.И., Самотугина Ю.С., Безумова (Христенко) О.А. Конструктивные особенности плазматронов для поверхностного наноструктурирования металлообрабатывающего инструмента. Установлены закономерности влияния конструктивных параметров плазматронов с секционированной межэлектродной вставкой на эффективность процессов плазменного модифицирования. Показана перспективность использования плазматронов данного типа с сужающимся дуговым каналом для реализации плазменного наноструктурирования металлообрабатывающего инструмента.*

**Ключевые слова:** плазматрон, наноструктурирование, плазменное модифицирование, металлообрабатывающий инструмент, секционированная межэлектродная вставка.

*S.S. Samotugin, I.I. Pirch, Yu.S. Samotugina, O.A. Bezumova (Khristenko). Design features of the plasmatron for surface nanostructuring of the metal cutting tool. The main controlled thermophysical parameters of plasma modification are the maximum heating temperature  $T$  and cooling rate  $W$  of the surface layer. The parameters  $T$  and  $W$  during the plasma modification are not the parameters of direct control, but are complex ones, the value of which being influenced by a large number of factors – the power of the plasma jet (determined by the current strength  $I$  and the voltage in the jet  $U$ ), the pressure and flow rate of the plasma-forming gas ( $P_g, Q_g$ ), processing speed (plasmatron movement  $v$ ), pressure and flow rate of cooling water ( $P_w, Q_w$ ), processing distance  $h$ , thermophysical characteristics of the processed material, shape and dimensions of the processed product. The effective use of direct action plasmatrons is known; while indirect plasmatrons are used more widely. Of the varieties of indirect plasmatrons, the most preferable is the use of plasmatrons with a sectioned interelectrode insert (SII). The use of the plasmatrons with SII makes it possible to implement the technology of plasma nanostructuring either in a narrow range of mode parameters (microfusion); or when machining a tool with a cutting edge of a special (serrated) shape – for example, threading or thread rolling. Consequently, for a wider practical use of the plasma nanostructuring technology, it is necessary to improve the basic design of the plasmatron in order to implement the conditions for nanostructuring (simultaneous achieving high heating temperatures close to the melting temperature of the instrumental material and a cooling rate of about  $10^6 \dots 10^7$  °C/sec), for range of mode parameters and for a wide range of hardened tools. The established computational and experimental regularities make it possible to choose the optimal combinations of the design parameters of the plasmatron and the parameters of the processing mode for the implementation of the process of plasma nanostructuring of the metalworking tool. The work is performed individually for each specific combination: plasmatron – processed material (steel, alloy) – shape and size of the tool.*

**Keywords:** plasmatron, nanostructuring, plasma modification, metal-cutting tool, sectioned interelectrode insert.

**Постановка проблеми.** Розробка новітніх технологій поверхневого зміцнення (модифікування) металорізального інструменту є одним з найбільш перспективних і актуальних напрямів в сучасному машинобудуванні. У цьому напрямі особливо ефективно використання високонцентрованих джерел нагріву, з яких найбільш економічним і доступним є плазмовий струмінь. Нині накопичений досить великий досвід практичного використання плазмового зміцнення деталей і інструменту різного призначення [1-4].

Основними регульованими теплофізичними параметрами плазмового модифікування є максимальна температура нагріву  $T$  і швидкість охолодження  $W$  поверхневого шару [1]. Залежно від співвідношення параметрів  $T$  і  $W$  області оптимальної реалізації процесів плазмового модифікування показані на рисунку 1.

Параметри  $T$  і  $W$  в процесі виконання плазмового модифікування не є параметрами прямого регулювання, а є комплексними параметрами, на величину яких впливає велике число чинників – потужність плазмового струменя (визначається величиною сили струму  $I$  і напругою в струмені  $U$ ), тиск і витрата плазмоутворюючого газу ( $P_z, Q_z$ ), швидкість обробки (переміщення

плазмотрона  $v$ ), тиск и витрата охолоджувальної води ( $P_6, Q_6$ ), дистанція обробки  $h$ , теплофізичні характеристики оброблювального матеріалу, форма и розміри оброблювального виробу. На рисунку 2 показана схема процесу плазмового модифікування як об'єкта регулювання.

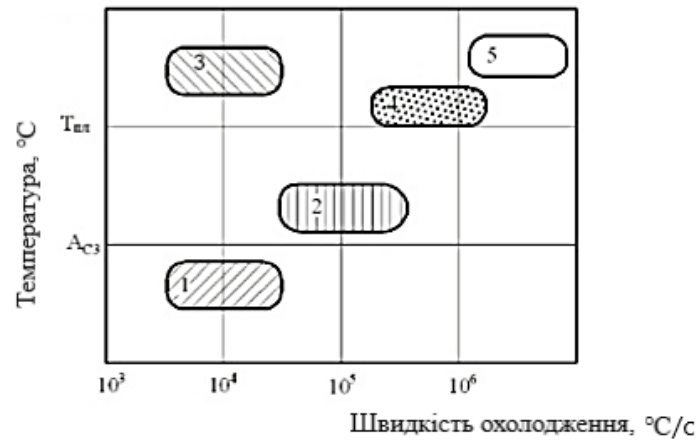


Рис. 1 – Области оптимальної реалізації процесів плазмового поверхневого модифікування: 1 – плазмовий відпуск; 2 – плазмове гартування; 3 – плазмове мікрооплавлення; 4 – плазмова наноструктуризація; 5 – плазмова аморфізація

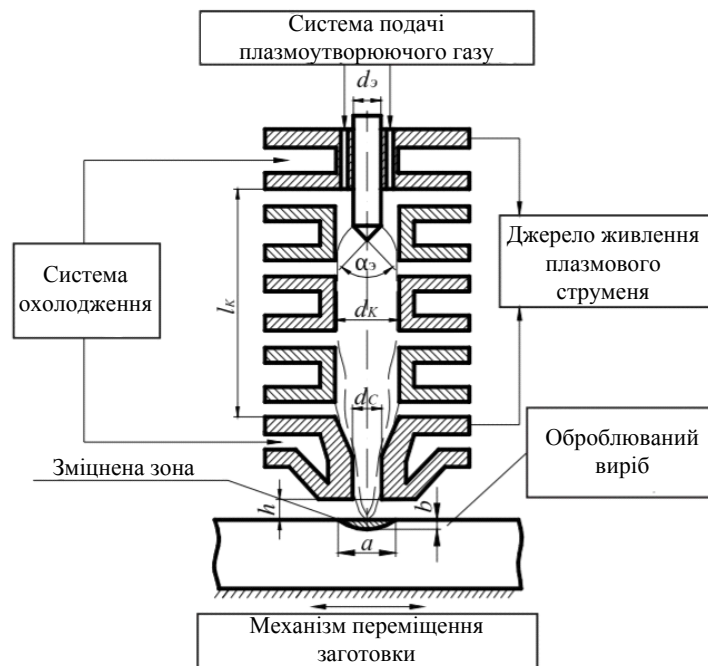


Рис. 2 – Схема плазменного технологического комплекса

Найбільш значимим елементом технологічного комплексу є пристрій для генерування плазмового струменя – плазмотрон.

Від правильного вибору типу і конструктивних параметрів плазмотрона залежать ефективність і продуктивність зміцнення, необхідний рівень властивостей.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** З аналізу літературних даних виходить, що нині відсутній погляд про перевагу використання для поверхневого гартування плазмотронів прямої або непрямої дії [5]. У роботах [2, 4, 6] описано ефективне використання плазмотронів прямої дії, проте плазмотрони непрямої дії застосовуються ширше [1, 7, 8].

При нагріві матеріалів плазмотронами прямої дії ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) нагріву на 10-30% вищий, ніж при нагріві плазмотроном непрямої дії [4]. Проте наяв-

ність на поверхні оброблюваного матеріалу анодної плями дуги значно звужує діапазон регулювання параметрів режиму нагріву при обробці без оплавлення поверхні. У свою чергу, використання плазмотронів непрямої дії дозволяє реалізувати усі види технологічних процесів плазмового модифікування (рис. 1).

З різновидів плазмотронів непрямої дії найбільш прийнятним є застосування плазмотронів з секціонованою міжелектродною вставкою (МЕВ) [1, 5]. Їх переваги – більш висока температура струменя (внаслідок досить протяжного дугового стовпа, що збільшує час перебування газу в каналі); більш висока потужність при тих же значеннях струму; високий ККД; тривалий ресурс роботи; наявність висхідної вольт-амперної характеристики, що забезпечує малу залежність напруги  $U$  від витрати газу  $Q(U \sim Q^{0,2})$ ; зменшення пульсацій параметрів дуги і потоку плазми.

Принципова розрахункова схема плазмотрона з МЕВ для поверхневого модифікування матеріалів показана на рис. 2. Основними конструктивними параметрами його являються: кут заточування вольфрамового електроду  $\alpha_e$ , внутрішній діаметр каналу  $d_k$ , діаметр отвору сопла  $d_c$ , довжина каналу (міжелектродного проміжку)  $l_k$ . Великий досвід використання плазмотронів цього типу для реалізації процесів поверхневого модифікування за рахунок швидкісного гартування або мікрооплавлення (області 2 і 3 на рис. 1) [1] дозволив встановити діапазон оптимальних значень конструктивних параметрів [9]:  $\alpha_e = 90^\circ \pm 5$ ;  $d_k = 15 \pm 5$  мм;  $d_c = 6 \pm 2$  мм;  $l_k = 120 \div 165$  мм. Проте останнім часом усе більш широке застосування отримують новітні технології поверхневого модифікування – лазерна і плазмова наноструктуризація – область 4 на рис. 1 [10-12]. Вона успішно може бути реалізована із застосуванням плазмотронів з МЕВ даного типу (рис. 2) [13, 14]. Як приклад на рисунку 3 показана мікроструктура металу модифікованої зони на сталі Р6М5 після плазмової наноструктуризації зразків [13] і різьбонарізних гребінок [14]. Така мікроструктура ідентифікована в роботах як нанокристалічна мартенситно-карбідна суміш з середнім розміром часток 50-150 нм.

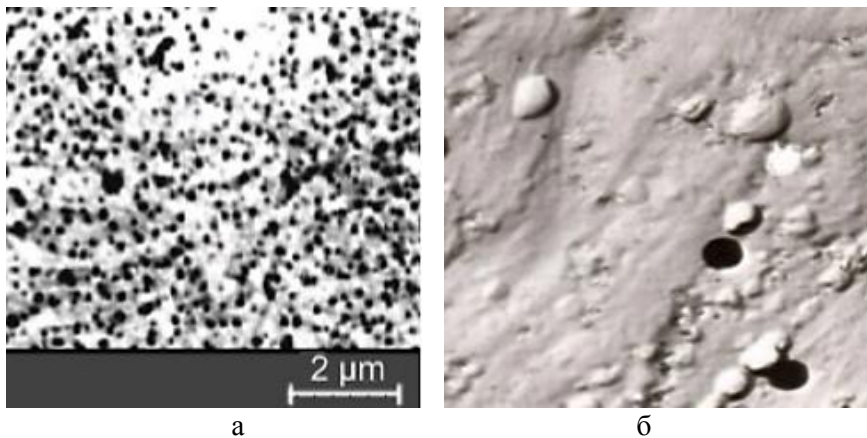


Рис. 3 – Мікроструктура сталі Р6М5 після плазмової наноструктуризації: а – оптична металографія ( $\times 2000$ ); б – електрона мікроскопія ( $\times 9000$ )

Використання плазмотронів розглянутого типу (рис. 2) з конструктивними параметрами у вказаному вище діапазоні дозволяє реалізувати технологію плазмової наноструктуризації (область 4 на рис. 1) або у вузькому діапазоні параметрів режиму (мікрооплавленні) [13], або при обробці інструменту з різальною кромкою спеціальної (зубчастої) форми – наприклад, різьбонарізного [14] чи різьбонакатного [15].

**Метою даної роботи** є удосконалення базової конструкції плазмотрона з метою реалізації умов наноструктуризації (досягнення одночасно високих значень температури нагріву, близької до температури плавлення інструментального матеріалу, і швидкості охолодження близько  $10^6 \dots 10^7$  °C/c), для ширшого діапазону параметрів режиму і для широкої номенклатури зміцнюваного інструменту.

**Виклад основного матеріалу.** У загальному випадку при нагріві тіла плазмовим струменем зміна питомого теплового потоку по плямі нагріву описується законом нормального розподілу Гауса [1, 4, 16]:

$$q(r) = q_m \cdot e^{-k \cdot r^2}, \quad (1)$$

де  $q_m$  – максимальна щільність потоку на осі струменя;  $k$  – коефіцієнт зосередженості, що характеризує форму кривої нормального розподілу.

Умовний діаметр плями нагріву  $d_n$  нормально-кругового джерела, на межі якого  $q_m \cdot (d_n / 2) = 0,05q_m$ , дорівнює:

$$d_n = \frac{3,46}{\sqrt{k}}. \quad (2)$$

Встановлений наступний характер впливу конструктивних параметрів плазмотрона і параметрів режиму на ефективну теплову потужність  $q$  [5, 16]:

- зі збільшенням сили струму  $q_m$  збільшується,  $d_n$  практично не змінюється, а  $k$  підвищується;

- зі збільшенням витрати плазмоутворюючого газу  $q_m$  спочатку різко зростає, а при великих витратах знижується,  $d_n$  змінюється трохи, а  $k$ , як і  $q_m$ , має максимум при деякому значенні витрати газу;

- зменшення  $d_k$  призводить до різкого підвищення  $q_m$ ,  $d_n$  не змінюється при великих значеннях  $d_k$  і зменшується при малих значеннях  $d_k$ ;

- зменшення  $d_c$  призводить до підвищення  $q_m$  та  $k$ , но при цьому знижується ефективний ККД плазмового нагріву і потрібно інтенсивніше водяне охолодження плазмотрона.

Отже, зміна конструктивних параметрів плазмотрона і параметрів режиму плазмового нагріву впливають на ефективність плазмового нагріву неоднозначно. Дослідженнями встановлено, що найбільш універсальним параметром регулювання як конструктивних, так і технологічних параметрів з метою реалізації технології плазмової наноструктуризації (область 4 на рис. 1) є коефіцієнт зосередженості. Аналогічний висновок зроблений і автором роботи [4]. Попередніми дослідженнями встановлено, що ефективним методом підвищення коефіцієнта зосередженості для плазмотронів з МЕВ прийнятого типу (рис. 2) являється звуження каналу плазмотрона у напрямі течії газу, що призводить до підвищення ентальпії плазмового потоку на виході з сопла, перерозподілу напруженості електричного поля і локального теплообміну по довжині каналу. На рисунку 4 показана схема до розрахунку міри звуження каналу  $S_k = d_{k1} / d_{k2}$ , де  $d_{k1}$  та  $d_{k2}$  – діаметр каналу, відповідно, в катодній і прианодній секціях МЕВ (а), і характер зміни твердості в зоні наноструктуризації на сталі X12M (б).

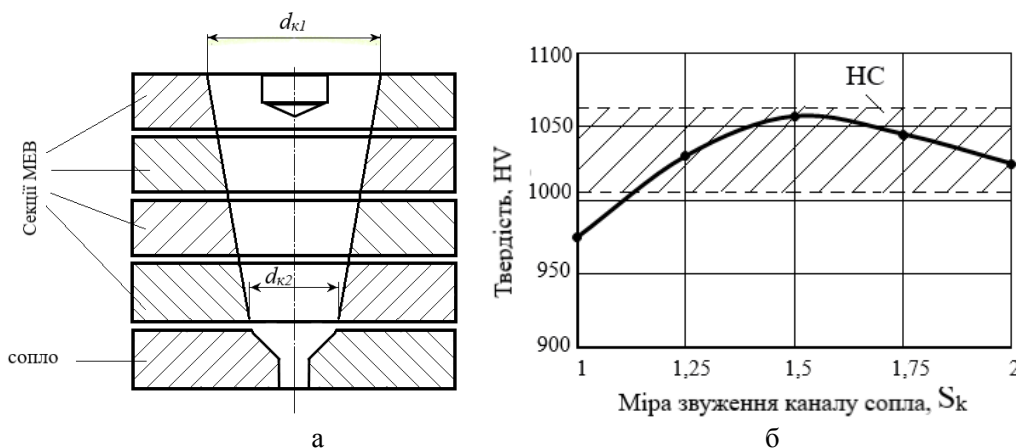


Рис. 4 – Схема до розрахунку міри звуження каналу плазмотрона  $S_k$  (а) і характер впливу  $S_k$  на твердість модифікованої зони на сталі X12M (б); НС – область наноструктуризації

Встановлені розрахунково-експериментальні закономірності дозволяють вибирати оптимальні поєднання конструктивних параметрів плазмотрона і параметрів режиму обробки для реалізації процесу плазмової наноструктуризації металообробного інструменту. Робота виконується індивідуально для кожного конкретного поєднання: плазмотрон – оброблюваний матеріал (сталь, сплав) – форма і розмір інструменту. Цей підхід реалізований при відробітку технології

плазмової наноструктуризації різьбонарізних гребінок із сталі Р6М5 [14]. На рисунку 5 приведена номограма для визначення оптимальних значень струму плазмового струменя і швидкості обробки плазмотроном з  $S_k = 1,5$ .

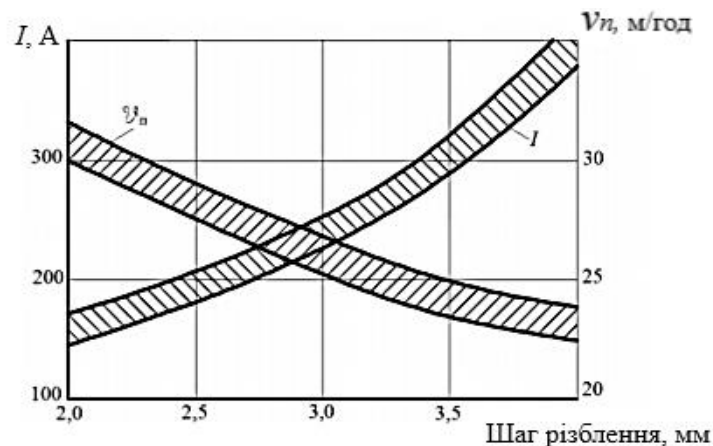


Рис. 5 – Области оптимальних значень сили струму плазмового струменя  $I$  і швидкості переміщення плазмотрона  $v_n$  залежно від величини кроку метричного різьблення при плазмовому модифікуванні різьбонарізних гребінок із сталі Р6М5

Таким чином, виконані аналіз і дослідження впливу конструктивних параметрів плазмотронов з секціонованою міжелектродною вставкою на ефективність процесів плазмового модифікування свідчать про досить широкі можливості плазмотронов цього типу при реалізації різних схем зміцнення: поверхневого гартування (з оплавленням або без), поверхневої наноструктуризації.

### Висновки

1. Досліджений спільний вплив конструктивних параметрів плазмотрона з секціонованою міжелектродною вставкою і параметрів режиму плазмового нагріву на ефективність процесів плазмового модифікування. Встановлена перевага використання комплексного регульованого параметра – коефіцієнта зосередженості плазмового струменя.

2. Для досягнення необхідних теплофізичних умов плазмової наноструктуризації (температура нагріву, близька до температури плавлення оброблюваного матеріалу і швидкість охолодження близько  $10^6 \dots 10^7$  °C/c) необхідно використати плазмотрони з дуговим каналом, що звужується, з мірою звуження  $S_k = 1,5 \pm 0,1$ .

### Перелік використаних джерел:

1. Самотугин С.С. Плазменное упрочнение инструментальных материалов / С.С. Самотугин, Л.К. Лещинский. – Донецк : Новый мир, 2002. – 338 с.
2. Сафонов Е.Н. Плазменная закалка деталей машин / Е.Н.Сафонов. – Нижний Тагил : НТИ УрФУ, 2014. – 116 с.
3. Лашенко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление / Г.И. Лашенко. – К. : Экотехнология, 2003. – 64 с.
4. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А.Е. Балановский. – Иркутск : ИрГТУ, 2006. – 180 с.
5. Самотугин С.С. Оптимизация конструкции плазмотрона для поверхностного упрочнения материалов / С.С. Самотугин, И.И. Пирч, В.А. Мазур // Сварочное производство. – 2002. – № 12. – С. 32-35.
6. Самотугин С.С. Плазменное градиентное упрочнение стальных изделий / С.С. Самотугин, В.А. Гагарин. – Мариуполь : ПГТУ, 2017. – 151 с.
7. Крапошин В.С. Поверхностная закалка стали 9ХФ при нагреве теплом плазменной горелки / В.С. Крапошин, А.В. Бобров, О.С. Гапоненко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – № 11. – С. 13-17.

8. Петров С.В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности / С.В. Петров, А.Г. Сааков. – Киев : ТОПАС, 2000. – 220 с.
9. Корсунов К.А. Повышение эффективности работы электродуговых плазмотронов для обработки материалов / К.А. Корсунов, Р.Н. Брожко // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1, № 2. – С. 161-167.
10. Коротков В.А. Наноструктурирование стали плазменной дугой / В.А.Коротков, С.П. Ананьев, В.Я. Шур // Технология машиностроения. – 2010. – № 4. – С. 5-7.
11. Чирков А.А. Лазерно-плазменное наноструктурирование поверхностных слоев сталей при атмосферных условиях / А.А. Чирков // Фотоника. – 2008. – № 4. – С. 28-30.
12. Тополянский П.А. Финишное плазменное упрочнение – нанотехнология (к 25-летию создания) / П.А. Тополянский, Н.А. Соснин, С.А. Ермаков // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта : Теория и практика. – СПб. : Изд-во Пол. ун-та, 2012. – Ч. 2. – С. 344-366.
13. Самотугин С.С. Плазменное микро- и наноструктурирование поверхности инструментальных сталей / С.С. Самотугин, В.А. Мазур // Упрочняющие технологии и покрытия, 2013. – № 4. – С. 29-37.
14. Самотугин С.С. Нанотехнологии в машиностроении: плазменное модифицирование резьбонарезного инструмента / С.С. Самотугина, О.А. Христенко // Вісник Приазовського державного технічного університету / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2018. – Вип. 37. – С. 105-114. – (Серія : Технічні науки). – Mode of access : DOI: 10.31498/2225-6733.37.2018.160266.
15. Плазменное субмикронное и наноструктурирование инструмента из стали Х12М / С.С. Самотугин, Ю.С. Самотугина, О.А. Христенко, Т.К. Ткаченко, В.И. Лавриненко // Технология машиностроения. – 2020. – № 5. – С. 42-52.
16. Николаев А.В. Плазменно-дуговой нагрев вещества / А.В. Николаев // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. – М. : Наука, 1973. – С. 20-32.

#### References:

1. Samotugin S.S., Leshchinsky L.K. *Plazmennoye uprochneniye instrumentalnykh materialov* [Plasma hardening of instrumental materials]. Donetsk, Novy Mir Publ., 2002, 338 p. (Rus.)
2. Safonov E.N. *Plazmennoye uprochneniye detaley mashin* [Plasma hardening of machine parts]. Nizhny Tagil, NTI UrFU Publ., 2014. 116 p. (Rus.)
3. Lashchenko G.I. *Plazmennoye uprochneniye i napyleniye* [Plasma hardening and spraying]. Kiev, Ecotechnology Publ., 2003. 64 p. (Rus.)
4. Balanovsky A.E. *Plazmennoye poverkhnostnoye uprochneniye emetallov* [Plasma surface hardening of metals]. Irkutsk, ISTU Publ., 2006. 180 p. (Rus.)
5. Samotugin S.S., Pirch I.I., Mazur V.A. Optimizatsiya konstruktssii plazmotrona dlya poverkhnostnogo uprochneniya materialov [Optimization of the design of a plasmatron for surface hardening of materials]. *Svarochnoy eproizvodstvo – Welding production*, 2002, no. 12, pp. 32-35. (Rus.)
6. Samotugin S.S. Gagarin V.A. *Plazmennoye gradiyentnoye uprochneniye stal'nykh izdeliy* [Plasma gradient hardening of steel products, monograph]. Mariupol, PSTU Publ., 2017. 151 p. (Rus.)
7. Kraposhin V.S., Bobrov A.V., Gaponenko O.S. Poverkhnostnaya zakalka stali 9KHF pri nagreve teplom plazmennoy gorelki [Surface hardening of steel 9CrW when heated by the heat of a plasma torch]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Metallurgy and heat treatment of metals*, 1989, no. 11, pp. 13-17. (Rus.)
8. Petrov S.V., Saakov A.G. *Plazma produktov sgoraniya v inzhenerii poverkhnosti* [Plasma of combustion products in surface engineering]. Kiev, TOPAS Publ., 2000. 220 p. (Rus.)
9. Korsunov K.A., Brozhko R.N. Povysheniye effektivnosti raboty elektrodugovykh plazmotronov dlya obrabotki materialov [Improving the efficiency of electric arc plasmotrons for material processing]. *Uspekhi prikladnoi fiziki – Advances in Applied Physics*, 2013, vol. 1, no. 2, pp.161-167. (Rus.)
10. Korotkov V.A., Ananiev S.P., Shur V.Ya. Nanostukturirovaniye stali plazmennoy dugoy [Nanostructuring of steel with a plasma arc]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya – Mechanical Engineering*, 2010, no. 4, pp. 5-7. (Rus.)
11. Chirkov A.A. Lazerno-plazmennoye nanostukturirovaniye poverkhnostnykh sloeyv staley pri atmosferynykh usloviyakh [Laser-plasma nanostructuring of surface layers of steels under atmos-

- pheric conditions]. *Fotonika – Photonics*, 2008, no. 4, pp. 28-30. (Rus.)
12. Topolyansky P.A., Sosnin N.A., Ermakov S.A. Finishnoye plazmennoye uprochneniye – nanotekhnologiya (k 25-letiyu sozdaniya) [Final plasma hardening – nanotechnology (to the 25th anniversary of its creation)]. *Tekhnologii uprochneniya, nanoseniya pokrytiy i remonta: Teoriya i praktika – Technologies of hardening, coating and repair: Theory and practice*, 2012, vol. 2, pp. 344-366. (Rus.)
  13. Samotugin S.S., Mazur V.A. Plazmennoye mikro- i nanostrukturirovaniye poverkhnosti instrumental'nykh staley [Plasma micro- and nanostructuring of the surface of tool steels]. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya – Strengthening technologies and coatings*, 2013, no. 4, pp. 29-37. (Rus.)
  14. Samotugin S.S., Samotugina Yu.S., Khristenko O.A. Nanotekhnologii v mashinostroyenii: plazmennoyemodifitsirovaniyerez'bonareznogoinstrumenta [Nanotechnologies in mechanical engineering: plasma modification of thread-cutting tools]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2018, no. 37, pp. 105-114. doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160266. (Rus.)
  15. Samotugin S.S., Samotugina Yu.S., Khristenko O.A., Tkachenko T.K., Lavrinenko V.I. Plazmennoye submikro- i nanostrukturirovaniye instrumenta iz stali KH12M [Plasma submicro- and nanostructuring of a tool made of Cr12Mo steel]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya – Mechanical engineering technology*, 2020, no. 5, pp. 42-52. (Rus.)
  16. Nikolayev A.V. Plazmenno-dugovoy nagrev veshchestva [Plasma-arc heating of matter]. *Plazmennyye protsessy v metallurgii i tekhnologii neorganicheskikh materialov – Plasma processes in metallurgy and technology of inorganic materials*, 1973, pp. 20-32. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 27.01.2020

UDC 621.791:669.14.018.256

doi: 10.31498/2225-6733.40.2020.216163

© Morgay F.V.<sup>1</sup>, Ivanov V.P.<sup>2</sup>, Solidor N.A.<sup>3</sup>

#### INVESTIGATION OF CORROSION RESISTANCE OF WELDED FLEXIBLE COMPENSATION ELEMENTS FROM AUSTENITIC STEELS OPERATING IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

*The main characteristics of welded flexible compensating elements made of austenitic steels AISI 304 and AISI 316 are considered, and an analysis of the types of corrosion arising during their operation is carried out. Metallographic studies and studies to assess the resistance to pitting and intergranular corrosion have been carried out. Research has been carried out on the chemical composition of materials for the manufacture of metal hoses and bellows expansion joints, as well as research on resistance to corrosion cracking. As a result of the experiments carried out, the effect of heat treatment and the degree of deformation on the corrosion resistance of austenitic steels AISI 304 and AISI 316 in various environments has been determined.*

**Keywords:** flexible compensating elements, stainless steel, metallographic research, corrosion resistance, microplasma welding.

<sup>1</sup> PhD студент, SHEI «Priazovskyi state technical university», Mariupol

<sup>2</sup> Dsc (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Mariupol, ORCID: 0000-0003-3339-7633

<sup>3</sup> Cand.Sc. (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi state technical university», Mariupol, ORCID: 0000-0002-3861-7933