

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.7

УДК:621.791.92

Перемітько В.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-9032-6116,
e-mail: vperemitko1965@gmail.com

Коломоєць І.В., PhD, ст. викладач, ORCID: 0000-0003-3650-2929,
e-mail: ikolomojets94@gmail.com

Сухомлин В.І., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-3673-1353, e-mail: v_suhomlyn@ukr.net

Носов Д.Г., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-1588-684X, e-mail: nosov_dstu@ukr.net

Євдокимов А.В., здобувач третього (освітньо-наукового) рівня, e-mail:
a.evdokimov@steel-work.net

Барлет М.Є., здобувач третього (освітньо-наукового) рівня
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Peremitko Valerii, Doctor of technical sciences, Professor of Machinery and Welding Technology department

Kolomojets Igor, Philosophy doctor, Senior lecturer of Machinery and Welding Technology department

Sukhomlyn Volodymyr, Candidate of technical sciences, Docent of Condensed State Physics department

Nosov Denys, Candidate of technical sciences, Docent of Machinery and Welding Technology department

Yevdokymov Anton, postgraduate student

Barlet Mykyta, postgraduate student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ВІДНОВЛЕННЯ ЛОПАТОК АГЛОМЕРАЦІЙНИХ МАШИН ДУГОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ З УРАХУВАННЯМ МЕХАНІЗМУ НАСТУПНОГО ЗНОШУВАННЯ

У роботі наведено рекомендації щодо дугового наплавлення лопаток агломераційних машин з урахуванням умов наступної експлуатації. Наплавлено шари металу дротами Велтек Н-460, Велтек Н-50 та стрічкою План Т-250 із локальним попереднім нанесенням карбідів титану та бору. Виявлено вплив карбідів на структуру та властивості наплавлених шарів. Обрано оптимальне поєднання наплавного матеріалу та зміцнювача для формування шарів, стійких до дії абразиву. Запропоновано схему орієнтування зон підвищеної твердості для уповільнення розвитку початкового дефекту при дії газопилового потоку.

Ключові слова: наплавлення; лопатки; знос; карбіди; матриця; твердість.

The paper gives recommendations on arc welding of blades of sintering machines, taking into account the conditions of subsequent operation. Layers of metal were deposited with Weltek H-460, Weltek H-50 wires and Plan T-250 tape with local prior application of titanium and boron carbides. The influence of carbides on the structure and properties of the deposited layers has been revealed. The optimal combination of surface material and hardener was chosen to form layers resistant to abrasive action. A scheme for the orientation of zones of increased hardness is proposed to slow down the development of the initial defect during impact of gas and dust flow.

Keywords: surfacing; blades; wear; carbides; matrix; hardness.

Постановка проблеми

Об'єктами агломераційної машини, що піддаються найбільшому зносу, є її робочі лопатки. Для зазначених елементів характерними є абразивний знос або ерозія твердими частками. У 81 % випадків поверхневе руйнування лопаток є головною причиною зупинки агломераційних



Рис. 1. Фрагмент робочої поверхні лопатки зі слідами локального зносу

починається зазвичай з найменшого дефекту (нерівності, западини, поверхневі тріщини) і, в першу чергу, зношується кромка вхідної лопатки з боку патрубка всмоктування нагнітача. Результати замірів, зазначені в [3], вказують на те, що знос вхідної кромки призводить до втрати розмірів лопатки до 30 мм.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основними матеріалами для виготовлення лопаток є сталі 30ХГСА, 20Х2, 10ХСНД. Практика реновації зазначених об'єктів зазвичай пов'язується із нанесенням на зношені ділянки матеріалу відповідних до умов експлуатації властивостей. Зазвичай це сплави, що за складом наближені до високовуглецевих сталей, чавунів або високолегованих сплавів. Наразі використовують багато способів нанесення зміцнювальних покриттів: електродугове наплавлення, газотермічне напилювання, хіміко-термічна обробка. Найпоширенішим з них залишається саме наплавлення високохромистих чавунів, а також сплав на основі нікелю КБНХЛ-2 [1—3]. Складністю, що виникає при нанесенні шарів високохромистого чавуну електродуговим наплавленням, є ймовірність виникнення тріщин. Суттєвим недоліком при застосуванні сплаву КБНХЛ-2 є те, що закидання температури під час експлуатації двигуна нерідко супроводжуються оплавленням контактних поверхонь. Останнє призводить до виходу пристрою з ладу в цілому [3]. Існуючі технології наплавлення лопаток зазвичай передбачають нанесення шарів металу незмінного за площею хімічного складу та властивостей. Враховуючи зазначені вище особливості руйнування поверхонь лопаток, ефективним вирішенням даної проблеми виглядає нанесення диференційованого шару. Дослідженнями, описаними в роботі [4], виявлено здатність шарів з орієнтуванням зон підвищеної твердості стримувати просування руйнівних процесів при терті металу по металу. У разі формування низьковуглецевої низьколегованої матриці [2, 5, 6] зафіксовано позитивний вплив від додавання карбідів на стійкість робочих шарів до абразивного зношування: твердість наплавленого шару в місцях попередньої фіксації TiC або V₄C зростала у 2,0...2,7 рази. Структура нанесеного сплаву представлена верхнім бейнітом та скупченням карбідних часток. Чергування зон більш твердого верхнього бейніту та більш в'язкого фериту в межах одного наплавленого валика може бути позитивним фактором при сприйнятті робочим шаром нерівномірно розподілених навантажень [7].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи ставилося дослідження структури та властивостей шарів металу, наплавленого матеріалами суттєво відмінними між собою за вмістом легувальних елементів (План Т-201, Велтек Н-50, Велтек Н-460G) із локальним попереднім орієнтуванням шарів зміцнювальної фази (карбідів) погоджено до напрямку розвитку початкового дефекту на робочій поверхні лопаток під час їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Для електродугового наплавлення матеріалом дослідних зразків було обрано листи товщиною 15 мм, довжиною 1800 мм та шириною 600 мм зі сталі 09Г2С. При цьому в якості на-

машин [1]. Наслідками абразивного зношування є зниження облопачування ступені, зменшення її економічності та скорочення міжремонтного періоду. Відомо, що знос лопатки носить нерівномірний характер. Спостереження за поступовим зношуванням поверхні лопатки виявили, що її руйнування починається з “оголення” основного металу під дією абразивних часток, в ролі яких зазвичай виступає магнетит Fe₃O₄ [2], яке спричиняє прискорення подальшого зношування.

Під час експлуатації внаслідок стирання утворюються канавки у вигляді вузьких смуг (рис. 1). Найбільша глибина канавок спостерігається на тих ділянках поверхонь лопаток та дисків робочих коліс, де відбувається найсильніше притискання часток силами інерції. Ерозія

плавних матеріалів застосовували дроти Велтек-Н460G та Велтек Н-50 діаметром 2 мм, а також стрічку План Т-201 шириною 10 мм та товщиною 3,2 мм. Дані матеріали застосовуються при наплавленні деталей, що працюють в умовах абразивного зношування. Наплавлення виконувалося у два проходи на установці АД-231 в середовищі аргону постійним струмом зворотної полярності. Перед застосуванням стрічки виконували заміну головки. В якості зміцнювачів застосовувалися порошки карбідів титану та бору, з огляду на їх найбільшу твердість серед поширених у практиці. Для кращої фіксації та рівномірного розподілу зміцнювача на поверхні готували суміші з ґрунтовкою ГФ-021 мм (співвідношення між порошком відповідного карбіду та ґрунтовкою становила 1:2). Отриману суспензію наносили у вигляді смуг шириною 2 мм, на віддаленні від осі дуги 8 мм (відповідно до запланованої ширини валика — 12 мм). Для уникнення пороутворення витрату суміші обмежували значенням $3,2 \cdot 10^{-2}$ кг/пог.м смуги. Параметри режимів, на яких виконувалося наплавлення, наведені в табл. 1. Висота наплавленого шару становила 6,0...8,5 мм.

Таблиця 1. Параметри режимів електродугового наплавлення

Дроти			Стрічка		
I _н , А	U _д , В	v _н , м/год	I _н , А	U _д , В	v _н , м/год
360 ± 10	30 ± 10	44 ± 10	600 ± 10	32 ± 1	32 ± 1

З наплавлених листів вирізалися зразки довжиною 30 мм та шириною 40 мм. Заміри твердості проводили у 9 точках за методом Бринеля. Дослідження структури виконували на фотомікроскопі Neophot 21. Результати вимірювань твердості наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Результати вимірювань твердості наплавлених шарів

Марка наплавленого матеріалу	Твердість металу без внесення зміцнювача, НВ		Твердість шару, наплавленого із TiC, НВ		Твердість шару, наплавленого із B ₄ C, НВ	
	1 шар	522	1 шар	530	1 шар	555
План Т 201	2 шар	573	2 шар	611	2 шар	621
	1 шар	363	1 шар	426	1 шар	398
Велтек Н-460G	2 шар	388	2 шар	464	2 шар	464
	1 шар	426	1 шар	492	1 шар	555
Велтек Н-50	2 шар	555	2 шар	582	2 шар	611

Мікроструктура, що представлена на рис. 2, відповідає сплаву, наплавленому порошковим дротом Велтек Н-50 з додаванням карбіду титану або карбіду бору.

У першому (нижньому) шарі — після нанесення карбіду титану — сформувалася направлена у бік тепловідведення структура мартенситу. Поміж рядків мартенситу (темного відтінку) утворилися області безкарбідного бейніту або голчастого фериту. Структура набула такого досить складного вигляду після нанесення другого шару ідентичного складу.

Тепловий вплив рідкого металу призводить до підплавлення і перекристалізації нижнього шару. Карбід титану з верхнього шару частково увібрав у себе додатковий вуглець (титан має значно більшу спорідненість до вуглецю ніж залізо) з нижнього шару. Цей процес призвів, з одного боку, до зменшення «вторинного» (після перекристалізації) мартенситу і часткового його відпуску, та появи голчастого фериту (рис. 2, а), для утворення якого вуглець не потрібен. З іншого боку, збільшення кількості карбідів у верхньому шарі знизило стійкість аустеніту, який розпадається за дифузійним механізмом з утворенням ферито-карбідної суміші різної дисперсності (рис. 2, б).

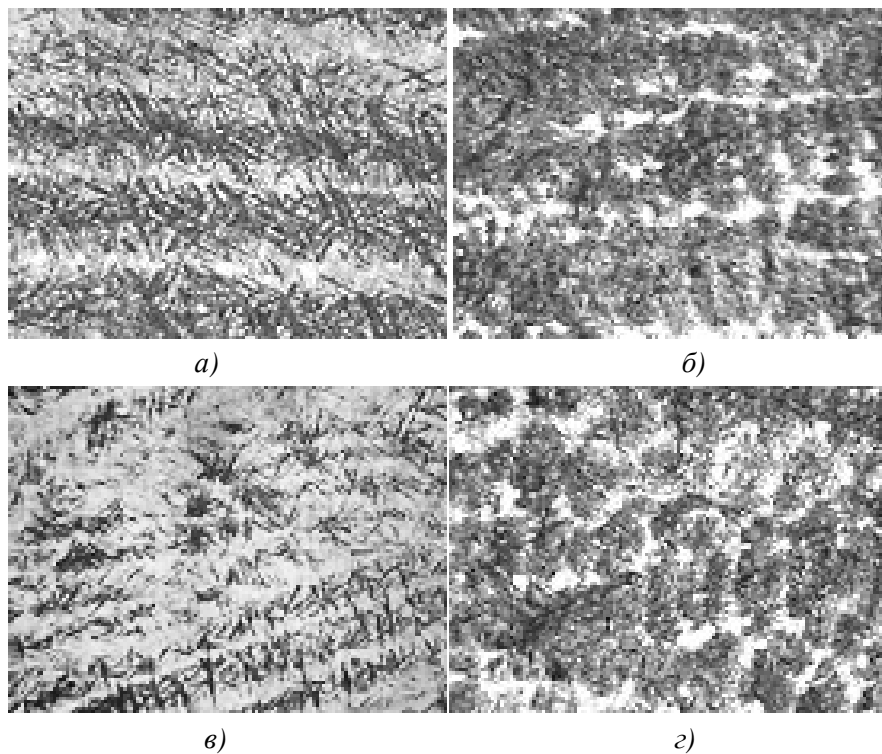


Рис. 2. Структура шарів, наплавлених дротом Велтек Н-50: а) у нижньому шарі при нанесенні TiC , б) у верхньому шарі при нанесенні TiC ; в) у нижньому шарі при нанесенні B_4C ; г) у верхньому шарі при нанесенні B_4C

Структурні складові нижнього шару (рис. 2, а) мають значення твердості нижчі, ніж складові верхнього шару. Так, голчастий ферит і відпущений мартенсит мають меншу інтегральну твердість у порівнянні з твердістю ферито-карбідної суміші (враховуючи, що твердість карбіду титану одна з найвищих серед карбідів металів, табл. 2).

Структура сплаву, напавленого із додаванням карбіду бору (рис. 2, в), дещо відрізняється. Карбід бору має температуру плавлення 2723 K , яка є нижчою, ніж у карбіду титану — 3413 K [8], тому структура першого шару складається із залізо-вуглецевого мартенситу, частково з дрібних (бо швидкість охолодження висока) карбідів бору та твердого розчину бору в фериті. Після накладання другого шару відбулася перекристалізація металу: мартенсит зазнав процесів відпуску і утворилися дрібні карбіди бору. Аустеніт верхнього валика за дифузійним механізмом розпався на дисперсну ферито-карбідну суміш, а у ферит проникли окремі атоми бору й утворився твердий розчин бору у залізі.

Як результат, мартенсит відпуску (без голчастого фериту) і дрібні карбіди бору спричинили зростання твердості у нижньому напавленому шарі, а дисперсна ферито-карбідна суміш і твердий розчин бору у фериті збільшили твердість у верхньому шарі до 611 HB (табл. 2).

На рис. 3 наведено мікроструктуру металу, напавленого стрічкою План Т-201.

У разі додавання карбіду титану в нижньому шарі під дією термічного циклу другого проходу дугою формується ферито-карбідна суміш (після перекристалізації ледебуриту та часткової сфероїдізації перлітного цементиту). Серед карбідів спостерігаються карбіди титану, які мають більший розмір у порівнянні з цементитом за рахунок «відбору» вуглецю під час перекристалізації.

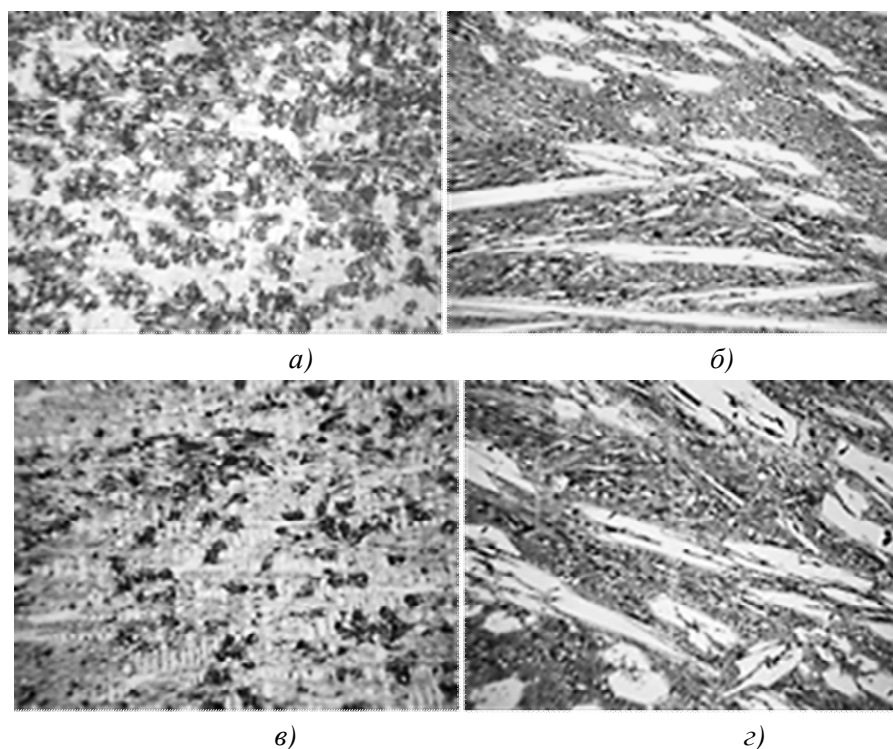


Рис. 3. Структура шарів, наплавлених стрічкою План Т 201: *а)* у нижньому шарі при нанесенні TiC , *б)* у верхньому шарі при нанесенні TiC ; *в)* у нижньому шарі при нанесенні B_4C ; *г)* у верхньому шарі при нанесенні B_4C

Верхній шар металу має структуру, близьку до структури білого заевтектичного чавуну. Відповідно до напрямку тепловідводу зорієнтовані первинні карбіди хрому, а між ними міститься ледебурит, в якому замість цементиту знаходяться карбіди титану.

На рис. 3, *в* мікроструктура подібна до наведеної на рис. 3, *а*. Проте у даному випадку ферито-карбідна суміш формувалася з додаванням карбіду бору до карбідів хрому з перекристалізованої евтектики ледебуриту, а перлітна складова більш сфероїдізована, за рахунок меншої стійкості карбіду бору до теплового впливу від наплавлення верхнього шару.

Верхній наплавлений шар (рис. 3, *г*) має структуру, подібну до наведеної на рис.3, *б*, але серед первинних карбідів хрому замість карбідів титану знаходяться карбіди бору, які підняли твердість цієї структури до значення 621 НВ. За рахунок карбідів бору твердість структури сплаву, представленого на рис. 3, *в*, також вища у порівнянні із значеннями для структури на рис. 3, *а*.

Мікроструктуру, представлену на рис. 4, отримали наплавленням дроту Н-460 G у два проходи з додаванням карбіду титану або карбіду бору.

У нижньому шарі, після нанесення карбіду титану (рис. 4, *а*) загальна кількість карбідів у структурі ферито-карбідної суміші найменша з усіх зразків. Адже кількість вуглецю в наплавленому матеріалі всього 0,25 % (див. табл. 2). Хрому в наплавленому матеріалі більше за зразок №1, але відсутність вуглецю не дозволила підняти твердість ферито-карбідної суміші (рис.4, *а*) вище значення 426 НВ.

Верхній наплавлений шар з карбідом титану (рис.4, *б*) має більшу твердість– 582 НВ лише за рахунок «відбору» вуглецю з часткового підплавленого нижнього шару для утворення карбідів хрому (більші за розміром) та, частково, карбідів титану (менші за розміром).

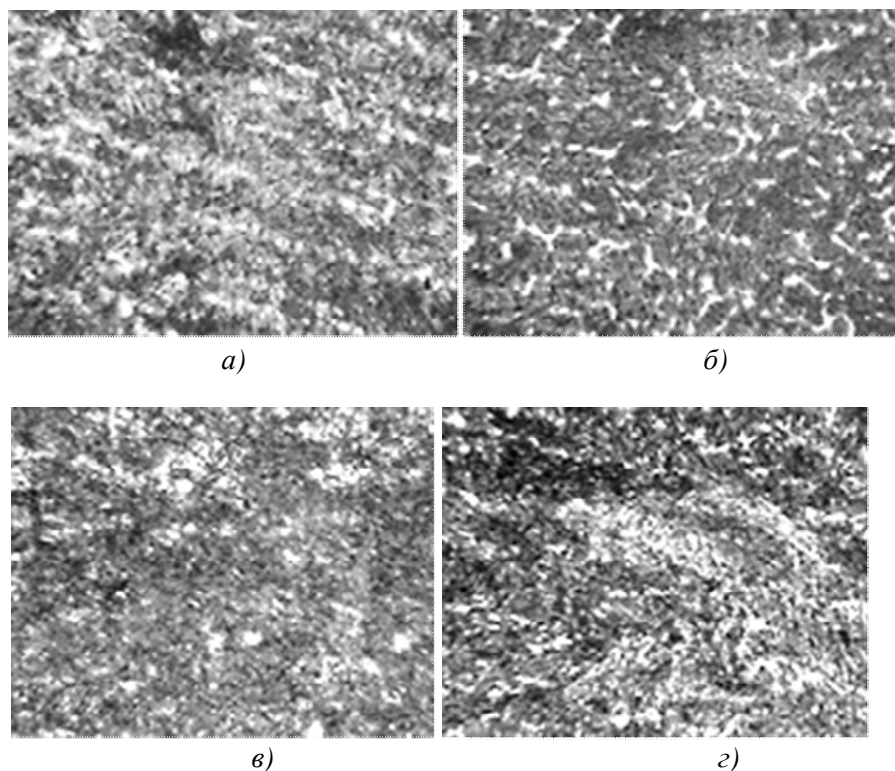


Рис. 4. Структура шарів, наплавлених дротом Н-460: а) у нижньому шарі при нанесенні TiC, б) у верхньому шарі при нанесенні TiC; в) у нижньому шарі при нанесенні V₄C; з) у верхньому шарі при нанесенні V₄C

На рис. 4, в спостерігається мікроструктура, подібна до наведеної на рис. 4, а. Відмінність полягає в тому, що карбід бору у складі першого валика підлягає частковому розкладанню, вуглець під термічним впливом повторного розплавлення відбирається, а бор переходить до твердого розчину фериту. Це призводить до меншої кількості карбідів та зниження твердості до 398 НВ.

Структура верхнього шару (рис. 4, з) за рахунок відбору вуглецю з нижнього шару має більшу кількість карбідів у ферито-карбідній суміші, але через розкладання карбиду бору на бор і вуглець твердість такої структури не перевищує 464 НВ.

Більш суттєво насичувати карбідною фазою рекомендується ділянки лопатки, що підлягають найбільш інтенсивному стиранню, в місцях, де глибина канавки, яка утворилася під впливом тертя, є найбільшою. Наплавлені шари з орієнтуванням зон підвищеної твердості (ЗПТ) рекомендовано наносити поперечно до напрямку руху абразивних часток. Така рекомендація зумовлена тим, що поперечно розташовані ЗПТ слугуватимуть перешкодами на шляху стирання, зменшуючи його інтенсивність. Зони меншої твердості, в свою чергу, за рахунок більшої пластичності стримуватимуть розвиток початкової тріщини в робочому шарі [9].

Слід додати, що даний спосіб може бути використаний для підвищення стійкості інших деталей, працюючих при помірних температурах в умовах абразивного зносу (поверхні просіювання, транспортувальні трубопроводи, системи аспірацій, інше обладнання металургійного та гірничодобувного комплексу).

Висновки

Вивчено взаємодію карбідів із матрицями, наплавленими дротами Велтек Н-460G, Велтек Н-50 та стрічкою План Т-201. Металографічними дослідженнями з'ясовано, що спільною рисою для усіх наплавлених конструкцій є ферито-карбідна суміш у нижньому шарі та більш тверді структурні складові у верхньому шарі (заевтектичний чавун, мартенсит). Характе-

рною рисою для наплавлених шарів є також скупчення часток карбідів титану та бору — в залежності від матеріалу, який додавався.

З точки зору властивостей наплавлених шарів, найдоцільнішим для застосування виглядає поєднання стрічки План Т-201 із додатковим внесенням V_4C . Обґрунтуванням даної рекомендації є той факт, що метал, наплавлений План Т-201, початково є найтвердішим з розглянутих, а V_4C дозволяє підвищити твердість наплавленого металу у 1,07 рази (що в 1,02 рази більше, ніж при нанесенні TiC).

Рекомендовано за рахунок попереднього нанесення карбідів при електродуговому наплавленні формувати на поверхні лопаток зони підвищеної твердості. Очікується, що розташування зазначених зон поперечно до руху абразиву знижуватиме інтенсивність стирання та сповільнюватиме утворення початкового дефекту під дією твердих часток газопилового потоку.

Список використаної літератури

1. Мантула В.Д., Лавошник А.С., Шапаренко А.В., Лыжник Г.В., Дамрин В.Я., Турбаба Е.А., Ишов А. М. Повышение наработки роторов эксгаустеров в агломерационном производстве. *Сталь*. 2013. № 11. С. 71–78.
2. Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: Учебное пособие для вузов. М.: МЭИ, 2002. 540 с.
3. Костин А.М., Бутенко А.Ю., Квасницкий В. В. Материалы для упрочнения лопаток газовых турбин. *Автоматичне зварювання*. 2014. № 6–7. С. 136–138.
4. Євдокимов А.В., Перемітько В.В. Підвищення ресурсу лопаток нагнітачів та вентиляторів зварювальними методами. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2020. Випуск 1(36). С. 49–53.
5. Peremitko V.V., Kolomojets I.V. Influence of orientation of zones of increased hardness of composite layers on their resistance to wear. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2021. Volume 110. Issue 2. Pp. 59–71.
6. Брыков М.Н., Ефременко В.Г., Ефременко А.В. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: монография. Херсон: Гринь Д. С., 2014. 364 с.
7. В.В. Перемітько, І.В. Коломоець, В.І. Сухомлин. Особливості структури та властивості шарів металу, наплавлених із попереднім нанесенням карбідів титана та бора. *Автоматичне зварювання*. 2022. № 4. С. 8–13.
8. Рябцев И.А., Панфилов А.И., Бабинец А.А., Рябцев И.И., Гордань Г.Н., Бабийчук И.Л. Структура и износостойкость при абразивном изнашивании наплавленного металла, упрочненного карбидами различных типов. *Автоматическая сварка*. 2015. № 5–6. С. 84–88.
9. Рябцев І.О. Відновлення та зміцнення методами наплавлення деталей, що експлуатуються в умовах зношування й різних видів циклічних навантажень: автореф. дис. ... д-ра наук: 05.03.06. К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2010. 27 с.

RESTORATION OF A STEAM TURBINE BLADE BY ARC WELDING WITH ORIENTATION OF ZONES OF INCREASED HARDNESS

Abstract

Turbine blades are characterized by abrasive wear and erosion by solid particles. Features of wear of these elements are its rapid development and unevenness. The consequences of this are a decrease in spalling, a decrease in its cost-effectiveness, and a shortening of the inter-repair period. As a way to avoid uneven wear of the blade surface, it looks like the deposition of metal layers with the orientation of zones of increased hardness. From the literature data and the experience of previous studies, it is known about the positive effect of carbides on the wear resistance of the deposited metal. Taking into account the fact that the turbine blades are made of steels 30XГСА, 20X2, 10XCHД, it was decided to investigate the effect of local preliminary application of carbides on surfacing with

materials corresponding to these steels in composition. Surfacing was performed with Veltek-450 HG and Veltek H-50 wires with a diameter of 2 mm, as well as with Plan T-201 tape with a width of 10 mm and a thickness of 3.2 mm, using a UD-249 device in an argon environment. Titanium and boron carbide powders mixed with GF-021 primer were used as strengtheners. Through metallographic research, it was established that the most striking signs of dissolution of carbides are observed when surfacing with Veltek H-460G wire. From the point of view of the properties of the deposited layers, the combination of Veltek H-460G wire with B4C can be considered the most effective of those considered. This is due to the fact that the lower layer deposited with B4C application is more ductile (398 HB), and the upper one is harder (464 HB), which has a favorable effect on the occurrence of tensile stresses. Layers with the orientation of zones of increased hardness should be placed transversely to the movement of abrasive particles and the direction of crack development. It is expected that the arrangement of zones of greater hardness in this way will contribute to a decrease in the intensity of cracking. And zones of lower hardness, in turn, will restrain the development of cracks due to their greater plasticity.

References

- [1] Mantula V.D., Lavoshnik A.S., Shaparenko A.V., Lyzhnik G.V., Damrin V.Y., Tyrbaba E.A., Ishov A.M. (2013). Povysheniye narabotki rotorov eksгаusterov v aglomeratsyonnom proizvodstve [Increasing the operating time of exhauster rotors in sinter production]. *Stal'*. № 11. 71–78. [in Russian].
- [2] Trukhniy A.D., Lomakin B.V. (2002). *Teplofikatsionnyye parovyie turbiny i turboustanovki* [Cogeneration steam turbines and turbine plants]: Uchebnoye posobiye dlya vuzov. M.: MEI, 540. [in Russian].
- [3] Kostin A.M., Butenko A.U., Kvasnitsky V.V. (2014) Materialy dlya uprochneniya lopatok gazovykh turbin [Materials for hardening gas turbine blades]. *Avtomatychne zvaryuvannya*. № 6-7. 136–138. [in Russian].
- [4] Yevdokymov A.V., Peremitko V.V. (2020) Pidvyschennya resursu lopatok nagnitachiv ta ventylyatoriv zvaryvalnyimi metodami [Improving the resource of the blades of the pumping machines by welding methods]. *Zbirnyk naukovykh prats' Dniprovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu (tekhnichni nauky)*. Vypusk 1(36). 49–53. [in Ukrainian].
- [5] Peremitko V.V., Kolomoyets I.V. (2021) Influence of orientation of zones of increased hardness of composite layers on their resistance to wear. *Archives of Materials Science and Engineering*. Volume 110. Issue 2. Pp. 59–71 [in English].
- [6] Brykov M.N., Yefremenko V.G., Yefremenko A.V. (2014) Iznosostoykost staley i chugunov pri abrazivnom iznashivani [Wear resistance of steels and cast irons under abrasive wear]: monografiya. Kherson: Gryn D. P. 364. [in Russian].
- [7] Ryabtsev I.A., Panfilov A.I., Babynets A.A., Ryabtsev I.I., Gordan G.N., Babychuk I.L. (2015) Struktura i iznosostoykost pri abrazivnom iznashivani naplavlennogo metalla, uprochnennogo karbidami razlichnykh tipov [Structure and wear resistance during abrasive wear of deposited metal hardened with various types of carbides]. *Avtomaticheskaya svarka*. № 5–6. P. 84–88. [in Russian].
- [8] Peremitko V.V., Kolomoyets I.V., Sukhomlyn V.I. (2022) Osoblyvosti struktury ta vlastyvoli shariv metalu, naplavlenykh iz poperednim nanesennyam karbidiv tytana ta bora [Peculiarities of the structure and properties of metal layers deposited with prior application of titanium and boron carbides]. *Avtomaticheskaya svarka*. № 4. P. 8–13. [in English].
- [9] Ryabtsev I.O. (2010) Vidnovlennya ta zmitsnennya metodami naplavlennya detaley, scho ekspluatuyutsya v umovakh znoshuvannya y riznykh vydiv tsyklichnykh navantazhen [Restoration and strengthening by surfacing methods of parts operated under conditions of wear and various types of cyclic loads]: avtoref. dys. ... d-ra nauk: 05.03.06. K.: IEZ im. E. O. Patona, 27. [in Ukrainian].