

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2025
Інженерно-фізичний факультет

Збірник тез доповідей щорічної
науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів
14–18 квітня 2025 року

Електронне видання на DVD-ROM

УДК 004(06)

Т39

*Рекомендовано до видання Вченою радою
Національного університету «Запорізька політехніка»
(Протокол №10 від 27.05.2025 р.)*

Упорядник:

Редакційна колегія:

Вадим ШАЛОМЄЄВ, д-р техн. наук, професор, (відпов. ред.)
Олексій КУЗЬКІН, д-р техн. наук, професор;
Василь ГЛУШКО, канд. техн. наук, доцент;
Євген ПАРАХНСВИЧ, канд. техн. наук, доцент;
Микола АНТОНОВ, канд. техн. наук, доцент;
Віра САВЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент;
Наталія ФУРМАНОВА, канд. техн. наук, доцент;
Микола КАСЬЯН, канд. техн. наук, доцент;
Микола ДЄДКОВ, канд. іст. наук, доцент;
Олена ВАСИЛЬЄВА, д-р екон. наук, професор;
Світлана КОКАРЄВА, канд. наук з фіз. вих. і спорту, доцент;
Юрій ФІЛЕЙ, канд. юр. наук, професор;
Таїсія ГАЙВОРОНСЬКА, канд. філос. наук, доцент;
Наталія ВИСОЦЬКА, в.о. начальника НДЧ;
Наталія САВЧУК, начальник редакційно-видавничого відділу;
Сніжана ВИЧУЖАНІНА, керівник відділу наукової роботи студентів;
Юлія ЧУШКІНА, провідний фахівець відділу наукової роботи студентів
Гнатенко МИХАЙЛО PhD, ст.викл. відповідальний на ІФ факультеті

Т39

Тиждень науки-2025. Інженерно-фізичний факультет.

Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 14–18 квітня 2025 р. [Електронний ресурс] / Редкол. : Вадим ШАЛОМЄЄВ (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 69 с. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана.

ISBN 978-617-529-498-7

Зібрані тези доповідей, заслуханих на щорічній науково-практичній конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів. Збірка відображає широкий спектр тематики наукових досліджень, що проводяться на інженерно-фізичному факультеті Національного університету «Запорізька політехніка». Збірка розрахована на широкий загал дослідників та науковців

УДК 004

ISBN 978-617-529-498-7

© Національний університет
«Запорізька політехніка»
(НУ «Запорізька політехніка»), 2025

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ «ПРИКЛАДНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»

<i>Шаломєєв В.А., Вініченко В.С., Пархісенко Д.І., Череватий О.Д.</i>	
Перспективи застосування композитів з металевими компонентами	6
<i>Фасоль Є.О., Климов О.В., Почионова Н.В.</i> Вплив термомагнітної обробки на властивості магнітотвердих матеріалів	8
<i>Степаненко С.О., Чорний Д.В., Глотка О.А.</i> Карбідотворення в швидкорізальних сталях	10
<i>Кашуба О.В., Кононенко А.В., Кононенко Ю.І., Скребцов А.А.</i> Дослідження гранул сплаву ЄП648, отриманих різними технологіями.....	12
<i>Лисиця О.В., Гусєва О.Я.</i> Вплив швидкості охолодження на корозійну стійкість алюмінієвих сплавів.....	13

СЕКЦІЯ «МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИЛИВКІВ, МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ»

<i>Іванов В. Г., Зеленюк Ю. О.</i> Методи попередження утворення газових пор у виливках з високохромистих сталей	15
<i>Іванов В. Г., Сокульський В.О.</i> Розробка оптимальних режимів термічної обробки для литих деталей з високохромистих чавунів.....	16
<i>Матвейшин М.В., Петрік С.Ф.,</i> Технологічні особливості виготовлення високоміцних чавунів з високими показниками пластичності та зносостійкості.....	17
<i>Євсіков Р.І.</i> Перспективи модифікування сталевих сплавів з метою підвищення експлуатаційних властивостей.....	18
<i>Голтвяниця Ю.Г., Голтвяниця В.С., Сажєв В.М., Торба Ю.І., Бехтер Р.В.</i> Технологічні аспекти підвищення виходу придатних виливків за дефектом «сміття».....	20
<i>Омельченко О.В.</i> Вплив параметрів 3D-друку на властивості майстер моделей для відцентрового лиття	21
<i>Солоков С.С.</i> Вплив рідкоземельних металів на фізико-хімічні та механічні властивості магнієвих сплавів.....	23
<i>Пелєх В.М.</i> Цинкування сплавів типу цам.....	24
<i>Кудін В.В., Єфременко Б.В., Шалдін О.М., Кармазін М.О., Бойчук Р.В., Козлова О.І.</i> Виникнення корозії на поверхні чавунних виробів після гарячого лудіння оловом	25
<i>Кудін В.В., Бойчук Р.В., Кармазін М.О., Коняхін А.О.</i> Вдосконалення структури лопаток газотурбінних двигунів із жароміцних нікелевих сплавів.....	28

<i>Петруша Ю.П., Степченко С.О.</i> Технологічні особливості обладнання і процесу електрошлакового наплавлення біметалевих заготовок	30
<i>Клименко О.О., Сергієнко О.С.</i> Порівняння точності стоматологічних імплантатів, отриманих за допомогою 3D сканування та зліпків.....	32
<i>Козлова О.І., Сергієнко О.С.</i> Дослідження природи вкраплень, їх структурного та фазового складу за допомогою рентгеноструктурних та рентгеноспектральних методів	33
<i>Третинко С.О., Сергієнко О.С.</i> Методи зниження пригару при литті сталей у разові піщано-глинисті форми	35
<i>Гнатенко М.О., Логовиненко А.Г.</i> Застосування плазмового наплавлення для виготовлення деталей авіаційних двигунів ЗІ сплаву ЕР648: технологія, властивості та економічна ефективність	37
<i>Івахненко Є.І., Шепель С.В.</i> Вплив металургійних факторів та модифікування на властивості висококремністих чавунів.....	38
<i>Івахненко Є.І., Майборода Д.О.</i> Дослідження ферито-карбідних сплавів для деталей гірничо-збагачувального обладнання.....	40

СЕКЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ І ТЕХНОЛОГІЇ»

<i>Панфілов Т. В. Михайлов О. В., Нетребко В.В.,</i> Особливості руйнування деталей будівельної техніки та розробка конструкції та матеріалів робочих органів	42
<i>Єфременко В.Г., Климов О.В., Гіржон В.В., Єфременко О.В., Капустян О.Є., Бриков М.М.</i> Низьколегована сталь для отримання високої міцності типовими видами термічної обробки	43
<i>Бобров Д.С. Бриков М.М.</i> Визначення оптимального вмісту вуглецю в низьколегованих високоміцних сталях	45
<i>Тимченко Є.В., Бриков М.М.</i> Пошук альтернативного матеріалу лопатки ВНА	47
<i>Мищенко В.Г., Корнієнко В.В.</i> Порівняльний аналіз здатності до карбування корозійностійких сталей аустенітного та феритного класу.....	48
<i>Попов С.М., Гребешков М.О.</i> Аналіз матеріалознавчих параметрів боридів титану в умовах трибологічних спряжень при ковзаючій взаємодії	50
<i>Бажміна Е.А., Янчев А.В.</i> Застосування гідравлічних пресів в автомобільній та машинобудівній промисловості: оптимізація процесів монтажу та демонтажу	52
<i>Бажміна Е.А., Удовиченко Ф.В.</i> Інтелектуалізація зварювального виробництва засобами сенсорних технологій	54
<i>Бажміна Е.А., Удовиченко Ф.В.</i> Сучасні сенсорні технології у зварювальному виробництві.....	56

<i>Бажміна Е.А., Позняков А.М.</i> Синергія інженерної освіти та сценічної практики: аналіз застосування знань зі спеціальності «двигуни внутрішнього згоряння» в роботі з механізованим сценічним обладнанням	58
<i>Бажміна Е.А., Кіреєв М.М.</i> Застосування сучасних технологій у виробництві авіадвигунів на ат «мотор січ»	60
<i>Бажміна Е.А., Васілоє П.В.</i> Розподільчий вал: аналіз конструктивних особливостей, матеріалів і їх впливу на ефективність двигуна та екологічність.....	61
<i>Степаненко А.М., Скоробогата М.В.</i> Особливості викладання комп'ютерної графіки в умовах дистанційного навчання	63
<i>Лаптева Г.М., Комаров В.В., Черкасов К.Є., Снєсарь С.Б.</i> Розрахунок та аналіз міцності ярмових балок трансформаторів класу напруги 110 КВ з метою оптимізації конструкції.....	65
<i>Черкасов К.Є. Корнієнко О.Б.</i> Проектування зварних швів в системі ANSYS	67

СЕКЦІЯ «ПРИКЛАДНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»

УДК 669.27.:539.42

Шаломеєв В.А.¹, Вініченко В.С.², Пархісенко Д.І.³, Череватий О. Д.⁴

¹ д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² канд.техн.наук., доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ асп. НУ «Запорізька політехніка»

⁴ студ. гр. ІФ -211 НУ «Запорізька політехніка»

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТІВ З МЕТАЛЕВИМИ КОМПОНЕНТАМИ

Підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) теплових двигунів завжди було актуальним завданням. Дану характеристику, зокрема, двигунів реактивної тяги, на сьогоднішній день, підвищують застосуванням подовжувача сопла у вигляді тонкостінної фасонної оболонки [1].

Види таких деталей показані на рисунку 1а-д [2]. Застосування вказаних деталей дозволяє підвищити величину питомого імпульсу тяги, особливо у космосі, при зниженні загальної маси двигуна [2].

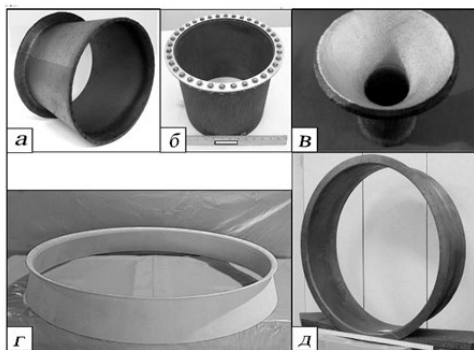


Рисунок 1. - Подовжувачі сопел ракетних двигунів [2].

а - 2D-гібрид C-ZrC/C-C на основі ПАН, виготовлений компаніями C-CAT та Ultramet, діаметр вихідної площини 11 дюймів; б - радіальний 2D евольвентний насадок виробництва Orbital ATK колишньої американської аерокосмічної та оборонної компанії, діаметр вихідної площини 11 дюймів; в - інтегральна 2D евольвентна камера згоряння/сопло з іридієвим покриттям, виготовлена компанією Orbital ATK, діаметр вихідної площини 3 дюйма; г - насадок 2D, виготовлений компанією C-CAT, з використанням покриття отриманого методами «високо-температурного розплаву» та пакетної цементації, діаметр фланця кріплення 44 дюйма; д - насадок 2D виробництва C-CAT, діаметр циліндра 42 дюйма.

Метою даної роботи було дослідження стану та перспектив розвитку у галузі створення матеріалів придатних для виготовлення подібних деталей.

В результаті проведених досліджень з'ясували, що в авіаційній та космічній техніці для високонавантажених деталей доцільно розширювати використання металевих та неметалевих композитів у зв'язку з їх високими значеннями питомих механічних характеристик.

При цьому встановили, що в цих матеріалах вдало поєднуються висока питома механічна міцність з їх високим модулем пружності, невисокою густиною та достатньою в'язкістю руйнування. Показано що на даний час композити розглядаються в основному для високошвидкісних деталей через їхню високу коштовність.

В роботі відмічається, що складним науково-технічним завданням є розробка нових технологій виготовлення композитів з більш низькими витратами, які підвищили б їх конкурентоспроможність по відношенню до традиційних металів і сплавів.

На сьогодні, не зважаючи на значні успіхи в освоєнні неметалевих композитів для масового виробництва деталей двигунів, що нагріваються в процесі експлуатації, є доцільним розробка нових композитів з металевими складовими.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Potapov, A., Shtefan, Y., & Lichman, E. Research of material for uncooled nozzle extensions of liquid rocket engines. *Acta Astronautica*, 2009. Vol. 64. no.1. P. 22-27.

2. GRADL, Paul R.; VALENTINE, Peter. Carbon-carbon nozzle extension development in support of in-space and upper-stage liquid rocket engines. In: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. 2017. p. 5064.

УДК 621.318.2:621.785.6

Фасоль Є.О.¹, Климов О.В.², Почионова Н.В.³

¹ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² канд.техн.наук доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ студ. гр. ІФ-212сп НУ «Запорізька політехніка»

ВПЛИВ ТЕРМОМАГНІТНОЇ ОБРОБКИ НА ВЛАСТИВОСТІ МАГНІТОТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Магнітотверді матеріали набули широкого застосування для виробництва постійних магнітів. Їхньою важливою характеристикою є максимальна питома магнітна потужність, яка відповідає половині добутку значення залишкової індукції B_r на коерцитивну силу H_c . В умовах експлуатації через неминуче коливання температури та вплив ударних і вібраційних навантажень можуть змінюватися властивості сплавів, тому їх стабільність оцінюється за можливими змінами структури.

Згідно з теорією феромагнетизму, матеріали складаються з доменів із паралельно орієнтованими спінами. Намагнічування відбувається через ріст сприятливо орієнтованих доменів та поворот їх магнітних моментів у напрямку зовнішнього поля.

Термомагнітна обробка (ТМО) - це метод обробки металевих матеріалів, який застосовується для зміни їх властивостей шляхом певного циклу нагріву в зовнішньому магнітному полі. Під час ТМО відбуваються структурні зміни, пов'язані з перебудовою атомів, згущенням матриці, зняттям залишкових напружень і переорієнтацією магнітних доменів у сприятливому напрямку.

За хімічним складом, станом і способом одержання магнітотверді матеріали поділяються на: леговані сталі, що гартуються на мартенсит, литі магнітно-тверді сплави, магніти з порошків, магнітно-тверді ферити та пластично деформовані сплави. Найвищі магнітні властивості мають сплави системи Fe-Ni-Al-Co з добавками титану та ніобію, які відомі як сплави ЮНДК.

При дослідженні впливу температури гартування (1060, 1080, 1100°C) на сплави ЮНДК35Т5БА, ЮНДК35Т5 та ЮН15ДК25БА виявлено, що високотемпературна β -фаза перетворюється на низькотемпературні фази β_1 та β_2 . Фаза β_1 є феромагнітною, а β_2 - слабо феромагнітною, тому важливо отримати однорідну β_1 -фазу пластинчастої форми.

Збільшення температури гартування з 1060°C до 1100°C приводить до підвищення магнітних властивостей: $(BH)_{\max}$ з 70 до 78 кДж/м³, H_c з 100 до 109 кА/м, B_r з 0,9 до 1,0 Тл для сплаву ЮНДК35Т5БАА. Це пояснюється повнішим завершенням перетворення β -фази на β_1 та β_2 -фази, а також зростанням кристалів утворених фаз.

Термічна обробка в магнітному полі напруженістю 160 кА/м має вирішальний вплив на формування пластинчастої форми кристалів β_1 -фази, що забезпечує високі значення коерцитивної сили та залишкової індукції. Магнітне

поле під час охолодження створює переважну орієнтацію магнітних доменів, що сприяє виникненню текстури та анізотропії магнітних властивостей.

Для оптимізації властивостей сплаву ЮН15ДК25БА досліджено вплив температури відпуску (550, 600, 650°C) та тривалості витримки (5, 10, 15 годин). Виявлено, що з підвищенням температури відпуску від 550 до 650°C, навіть при скороченні тривалості витримки з 15 до 5 годин, спостерігається зростання магнітних властивостей. Це відбувається завдяки повнішому дорозпаду високотемпературних фаз і вирівнюванню хімічного складу β_1 -фази.

Нагрівання зразків разом з піччю до температури гартування 1080°C забезпечує більшу тривалість перебування в інтервалі фазових перетворень, що сприяє їх повнішому завершенню та однорідності структури порівняно із завантаженням у попередньо нагріту піч.

Сплав ЮНДК35Т5БА містить ніобій, який, як і алюміній, кобальт і титан, покращує магнітні властивості. Крім того, структура цього сплаву монокристалічна, на відміну від рівновісної структури сплаву ЮНДК35Т5. Завдяки цим факторам ЮНДК35Т5БА має вищі магнітні властивості, що дозволяє знизити масу і габарити магнітних систем. Після термомагнітної обробки магнітні властивості характеризуються кривими розмагнічування. Аналіз кривих показує, що максимальне значення розмагнічування для сплаву ЮН15ДК25БА має місце при зменшенні напруженості поля H від 86 до 55 кА/м зі зростанням індукції B від нуля до 1,00 Тл.

Експериментально встановлено, що оптимальним режимом термічної обробки для сплаву ЮН15ДК25БА є нагрівання зразків разом з піччю до 1080°C, ступінчасте охолодження в магнітному полі напруженістю 200 кА/м (від 1080 до 850°C зі швидкістю 200°C/хв, від 850 до 500°C - 25°C/хв) та відпуск при 650°C протягом 5 годин. За цих умов отримано найвищі значення магнітних властивостей: $(BH)_{\max} = 73$ кДж/м³, $H_c = 86$ кА/м, $B_r = 1,41$ Тл.

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Степаненко С.О.¹, Чорний Д.В.², Глотка О.А.³

¹студ. гр. ІФ -212 НУ «Запорізька політехніка»

²студ. гр. ІФз-212сп НУ «Запорізька політехніка»

³ канд. техн. наук., доц. НУ «Запорізька політехніка»

КАРБІДОТВОРЕННЯ В ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ СТАЛЯХ

Швидкорізальні сталі є одними з основних інструментальних матеріалів. З них виготовляють до 60% різального інструменту. Принципова відмінність швидкорізальних сталей від вуглецевих і легованих інструментальних - тепло-стійкість. Швидкорізальні сталі зберігають високу твердість при нагріванні до температур понад 600°C. Одним із важливих факторів забезпечуються утворенням в структурі складних карбідів M_6C , $M_{23}C_6$, MC .

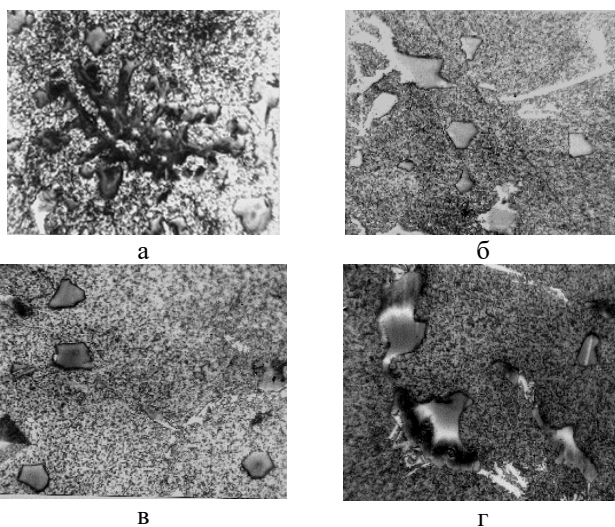
В даній роботі розглянуто сталь РЗАМЗФ2, яка додатково легована ніобієм в кількості 1,26-1,28% та титаном 0,2% за першим варіантом 1,55% за другим варіантом. Попередньо зразки піддавали відпалу при 850°C, 2 години, далі гартуванню 1210°C та триразовому відпуску при 560°C.

В литій сталі типу РЗАМЗФ2 кристалізуються карбіди типу M_6C , MC і M_2C які можуть утворювати евтектичні колонії. Додаткове легування ніобієм (склад №1) не призводить до зміни типу карбідів в литому стані. Однак в структурі відсутні карбіди типу M_6C , які замінені карбідами на основі титану і ніобію. Також карбід типу VC став додатково легованих титаном і ніобієм.

Введення титану (склад №2) викликає збільшення його кількості в карбідах MC , а також долегування карбідів в яких спостерігалось його відсутність. Додаткове легування Ti призводить до зародження карбіду типу M_6C і зникнення M_2C і MC (NbC). Зафіксовані евтектичні карбіди M_6C , формуванню яких, як слід припустити, сприяє комплексне легування титаном і ніобієм, що також призводить до появи складнолегованого титано-ніобієвого карбіду MC ($(TiNb)C$). Таким чином, підвищення легування сталі призводить до збільшення елементів в карбідах, і як наслідок і до можливості підвищення властивостей сталі. Після термічної обробки природа карбідної фази змінюється. Так, в сталі складу №1, розпадаються карбіди M_2C і утворюються карбіди типу M_6C , однак при цьому первинні карбіди типу MC залишаються незмінними.

Морфологія карбідів при цьому є типова, карбід TiC (рис. 1, а) має форму «китайських ієрогліфів» з розвиненою поверхнею. Карбід NbC (рис. 1, б) має типову форму шестигранників, які розташовані рівномірно по площі шліфа. Також спостерігається пірясті відгалуження від шестигранників, які класифікуються як карбід M_2C , така будова пояснюється умовами кристалізації з рідинно-твердого стану. У складі №2 після ТО, має місце розпад карбіду M_2C . Поряд з TiC , морфологія якого схожа зі складом №1, утворюється «складний» карбід типу $(TiNb)C$ (рис. 1, в). Форма його істотно відрізняється від TiC , вона набуває обрисів трьох-, п'яти-, а іноді і шестигранників. Кількість ніобію в

ньому знаходиться на максимальному рівні з відносно великою кількістю титану, що може привести до істотного збільшення експлуатаційних властивостей матеріалу. Карбід NbC відсутній в складі №2, при цьому після ТО утворюється «складний» карбід типу (VNb)C. Його будова є не типовою для даного матеріалу, воно полягає в утворенні «комплексно легованого» карбіду на підкладці (TiNb) C (рис. 1, г). Як видно на (рис. 1, г) від багатогранника карбіду (TiNb) C відходять відгалуження (VNb)C, що може пояснюватися подібною кристалічної ґраткою цих карбідів.



а – карбід TiC; б – карбидNbC; в – карбид (TiNb)C;
г – карбид (VNb)C

Рисунок 1 - Типова морфологія карбідів в експериментальних сталях ($\times 1250$)

УДК 669.620

Кашуба О.В.¹, Кононенко А.В.², Кононенко Ю.І.³, Скребцов А.А.⁴

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² асп. НУ «Запорізька політехніка»

³ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

⁴ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНУЛ СПЛАВУ ЕП648, ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Порошки для адитивних технологій, незалежно від їх складу, повинні бути високої якості. Під якістю треба розуміти стабільність хімічного складу в межах всіх фракцій та технологічних властивостей порошку. На останнє впливають нарости та сателіти. Окремим критерієм якісного порошку є розподіл розмірів частинок в межах фракції.

Дослідження проводили на прикладі порошоків з нікелевого сплаву марки ХН50ВМТЮБ (ЕП648), виготовлених за різними технологіями (газова атомізація розплаву та плазмове розпилення заготовки, що обертається). Вивчали сипучість та насипну щільність обраних порошоків. Також проводили оцінку хімічного складу, зовнішнього вигляду порошоків і рівномірності розподілу розмірів частинок порошку в межах фракції.

З аналізу результатів проведених досліджень встановлено, що склад обох порошоків, отриманих за різними технологіями, відповідає технічним вимогам. Порошок, отриманий шляхом плазмового розпилення заготовки, що обертається (матеріал А), має більшу однорідність хімічного складу, ніж порошок, отриманий газовою атомізацією (матеріал Б). Матеріал Б має сателіти та нарости на поверхнях частинок порошку; в матеріалі А відсутні такі недоліки, але він має значну кількість частинок порошку менших розмірів і несферичної форми.

Сипучість матеріалу А в стані постачання була відсутня, а після сушіння при температурах до 300 °С впродовж 1 години час сипучості цього матеріалу був довшим, ніж для матеріалу Б. Це може бути наслідком дії розвинутих капілярних сил, які існують через підвищену вологість порошку та утримують його частинки.

Аналіз кривих розподілу Гауса дозволив встановити для матеріалу А нерівномірність розмірів частинок порошку в межах однієї фракції. Одночасно з цим, для матеріалу Б розподіл розмірів частинок був рівномірними.

Насипна щільність матеріалу А дещо більше ніж матеріалу Б, що пов'язане із наявністю в матеріалі Б сателітів або нерівномірності у розмірах частинок порошку у межах однієї фракції, що підтверджують криві Гауса.

Отже, обидва порошоків матеріали мають рівномірний хімічний склад, який відповідає вимогам, та достатній рівень технологічних властивостей. Для підвищення технологічних властивостей рекомендовано проводити

ретельнішу підготовку матеріалу перед використанням та застосовувати більш досконалі способи розсіву по фракціям, ніж ситовий розсів.

УДК 620.193

Лисиця О.В.¹, Гусєва О.Я.²

¹старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

²студ. гр. ІФ-212сп НУ «Запорізька політехніка»

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ НА КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

При гартуванні дисперсійно-твердіючих сплавів зменшення швидкості охолодження призводить не тільки до погіршення характеристики міцності, а і значно впливає на корозійну стійкість.

Ступінь розпаду пересиченого твердого розчину, рівень механічних та корозійних властивостей можна описати за допомогою С-кривих ізотермічної діаграми (рис.1). Для області стійкого твердого розчину (лівіше лінії 1) характерна наявність піттингової корозії з окремими поодинокими осередками міжкристалітної корозії (МКК) глибиною до 0,1 мм. Поява МКК зумовлена або підвищеною електрохімічною активністю окремих орієнтованих меж зерен, або збідненням примезових ділянок на мідь при охолодженні в інтервалі температур 500...300°C, або одночасним проходженням цих процесів. Праворуч від лінії 1 розташовується область з низькою стійкістю до МКК, в якій збільшення витримки приводить до збільшення глибини корозії. З рис.1 видно, що криві стійкості до МКК розташовані значно лівіше С-кривих міцності. Тому можна зробити висновок, що швидкість охолодження алюмінієвих сплавів суттєвіше впливає на корозійну стійкість ніж на характеристики міцності. Серед алюмінієвих сплавів дюралюміни найчутливіші до швидкості охолодження при гартуванні. Вони мають найбільшу критичну швидкість охолодження, яка може становити від 536 до 1100°C/с. Так листи зі сплаву Д16 охолоджені зі швидкістю 400...1100°C/с мають змішаний характер руйнування (МКК та піттинг). Дотримання режимів гартування та усунення причин зменшення швидкості охолодження (перетримка на повітрі вийнятих з гартівної печі виробів, підвищена температура гартівного середовища, неправильна укладка виробів та перевантаження садки) підвищує стійкість алюмінієвих сплавів до корозії. Так охолодження малогабаритних виробів у воді, що має температуру 40...50°C, забезпечує задовільний опір як МКК так і РК (розшаровуюча корозія). А ось при підвищені температури води вище 80°C обидві характеристики суттєво знижуються.

Опір дюралюмінів корозійному розтріскуванню (КР) має більш складний характер (рис.2) та менш залежний від швидкості охолодження при гартуванні. Область стійкості твердого розчину при 375°C та вище зсунута в область більших витримок. При 450°C область стійкості (відсутності корозійного

розтріскування, ВКР) досягає максимальної витримки (60 хв). Особливістю діаграми є наявність ще однієї області стійкості при $\sim 350^{\circ}\text{C}$ з витримкою не менше 7 хв.

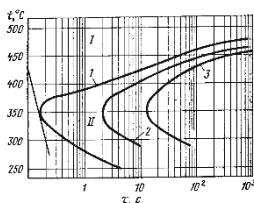


Рисунок 1 – С-криві стійкості до МКК (1) і міцності листів 98% (2) та 95% (3) від σ_B сплаву Д16 ($t_{\text{гарт}} = 420^{\circ}\text{C}$, $u_{\text{кр}} = 580^{\circ}\text{C/c}$)

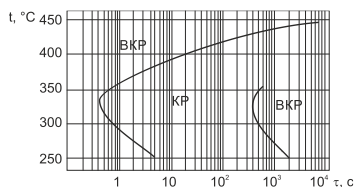


Рисунок 2 – С-криві стійкості до корозійного розтріскування (КР) листів зі сплаву Д16

Якщо в сплаві Д16 на межах зерен твердого розчину відсутні виділення, то глибина МКК менше 0,1 мм. При температурі 350°C і вище на межах зерен спостерігається виділення θ' -фази (CuAl_2), а нижче 350°C - S' -фази (Al_2CuMg). Фази θ' та S' мають різний електрохімічний потенціал і відносно твердого розчину є катодом і анодом відповідно, але на інтенсивність та глибину МКК вони не впливають. Причиною МКК є збіднення примезових ділянок твердого розчину на мідь. Внаслідок чого вони набувають позитивний потенціал. Твердий розчин дуже нестійкий і навіть в тонкостінних напівфабрикатах можлива поява МКК. Механізм стійкості до КР більш складний. Крім електрохімічного фактору важливим є характер внутрішньозеренної деформації в окремих мікрооб'єктах під дією напружень менших за σ_T . Це і є основною відмінністю в С-кривих для МКК та КР. Тривалі витримки в інтервалі температур $250 \dots 350^{\circ}\text{C}$ супроводжуються коагуляцією θ' - та S' -фази, що призводить до рівномірної деформації зерна та зменшенню напружень на межах зерен. Тому виділення фаз як на межах зерен так і всередині хоча і супроводжується значною електрохімічною гетерогенністю та глибиною МКК але знов підвищує стійкість сплаву до КР. Таким чином, умови охолодження при гартуванні дліномірних, складної форми та товстостінних напівфабрикатів зі сплавів системи Al-Cu-Mg (Д16, Д1 тощо) мають значний вплив на їх корозійну стійкість.

СЕКЦІЯ «МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИЛИВКІВ, МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ»

621.74.04:669.15'26

Іванов В. Г.¹, Зеленюк Ю. О.²

¹ д-р техн. наук НУ «Запорізька політехніка»

² асп. НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОДИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ УТВОРЕННЯ ГАЗОВИХ ПОР У ВИЛИВКАХ З ВИСОКОХРОМИСТИХ СТАЛЕЙ

Високохромисті сталі (наприклад, марок 10X12НДЛ, 20X12ВНМФЛ, 15X13Л тощо) схильні до утворення газових раковин. Це пов'язано з технологічними особливостями технології їх плавлення для забезпечення низької концентрації вуглецю, а також обумовлюється високим вмістом легуючих елементів та взаємодією їх з газами. Тобто причинами пороутворення є насичення рідкого металу різними газами: воднем (розчинність якого знижується при охолодженні), азотом (за наявності високого вмісту хрому) або киснем (при взаємодії з вуглецем CO і CO_2).

Плавку таких сталей найчастіше проводять методом переплаву або сплавлення, що пов'язано зі складністю окислення вуглецю при наявності високого вмісту хрому і необхідності забезпечення високої температури розплаву. Якість сталі, що виплавлена у індукційних печах відрізняється кращою якістю ніж у дугових, внаслідок зменшення концентрації водню та азоту. При цьому плавку, для забезпечення низького вмісту вуглецю, проводять форсовано на шихті, що переважно складається з високолегованих відходів з додаванням чистого заліза (типу Армко) та низьковуглецевих або безвуглецевих феросплавів та металів. Заливання таких сталей рекомендовано проводити також форсовано, не допускаючи повторного окислення.

Багаторічний досвід виготовлення виливків з високохромистих сталей показав, що для попередження утворення газових раковин перед розливанням таких сталей доцільним є обробка розплаву (переважно у ковші) різними сумішами, що містять елементи-дегазатори (Ti, Al, Zr, Ce, РЗМ) з метою зв'язування залишкових газів у стійкі неметалеві вкраплення, або нейтральними газами. Крім того, для така обробка сприяє подрібненню структури і підвищенню пластичності сталі. Створення захисної атмосфери, а також розливання з високою швидкістю в оптимальному інтервалі температур у середовищі нейтральних газів або у вакуумі є ефективним методом зниження газонасиченості металу. Відповідальні литі вироби з високохромистих сталей рекомендовано виготовлять з використанням вакуумно-індукційної плавки або переплаву на електрошлакових установках.

УДК 621.74.047:621.78:669.13'5

Іванов В. Г.¹, Сокульський В.О.²

¹ д-р техн. наук НУ «Запорізька політехніка»

² асп., НУ «Запорізька політехніка»

РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ЛИТИХ ДЕТАЛЕЙ З ВИСОКОХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ

Для литих деталей з високохромистих чавунів, які працюють і умовах абразивного зношування, режими термічної обробки обумовлюються можливостями їх механічної обробки та забезпечення максимальної твердості та зносостійкості. Тому часто для таких деталей проводиться декілька етапів: спочатку відпал – для покращення обробки різанням, а потім гартування або нормалізація готових виробів – для забезпечення високих експлуатаційних властивостей.

Досліджували хромомарганцеві чавуни наступного хімічного складу (мас. частка, %): 2,4...2,6 С; 19...21 Сr; 2,0...3,0 Мn; 0,4...0,6 Si; менш 0,03 S; менш 0,03 Р. Термічну обробку проводили у електричних камерних печах типу СНОЛ. Відпал зразків діаметром і висотою 30 мм проводили при температурах 800, 850, 900, 950 і 950 °С з витримкою 2 год. Швидкість нагрівання до 600 °С не перевищувала 60...80 °С/год. Далі робили температурну зупинку з витримкою 2 години. Подальше нагрівання до заданих температур проводили зі швидкістю 50...60 °С/год. Для усунення утворення аустеніту та отримання ферито-карбідних сумішей швидкість охолодження після витримки складала 30...50 °С/год. Після відпалу зразки чавунів піддавали вимірюванню твердості за Роквелом.

Проведені дослідження показали, що підвищення температури відпалу приводить до ефективного зниження твердості високохромистих чавунів з 46 одиниць HRC при температурі відпалу 850 °С до 32...34 одиниць HRC при температурі відпалу 950...1000 °С.

Металографічні дослідження показали, що відпал в інтервалі 800...1000 °С приводить до розпаду аустенітної матриці з утворенням дрібнодисперсних ферито-карбідних сумішей. Наявність марганцю обумовлює наявність також аустеніту, що не розклався при відпалі, який в подальшому може сприяти наклепу та структурним перетворенням під час обробки різанням і погіршити якість механічної обробки. Тому, виходячи з отриманих даних та літературних джерел, вміст марганцю у високохромистих безнікелевих чавунах слід обмежувати (не більше 2,0 % за масою) для забезпечення задовільної здатності до механічної обробки.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ З ВИСОКИМИ ПОКАЗНИКАМИ ПЛАСТИЧНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ

Поєднання високої міцності, пластичності та зносостійкості є необхідною вимогою до матеріалів для відповідальних литих деталей у багатьох промислових галузях: автомобілебудуванні, залізничному транспорті, гірничій справі, енергетиці тощо. Оптимально цим вимогам відповідає високоміцний чавун з кулястим графітом після спеціальної термічної обробки, яка включає декілька етапів.

аустенізацію – нагрівання до температури 880...920°C з витримкою 1...2 години, що залежить від товщини виливка; термічну обробку рекомендується проводити у контрольованому середовищі для усунення окислення та зневуглючування; при цьому відбувається перетворення металевої матриці на однорідний твердий розчин - аустеніт, з одночасним розчинення карбідів; температура нагрівання не повинна бути вище 950 °C для запобігання росту зерна та зниження міцності;

ізотермічну витримку (аустемперинг) – контрольоване охолодження виливків шляхом швидкого перенесення виливків у ванну з температурою 350...400°C та витримкою 60...120 хвилин з метою утворення низькотемпературного бейніту із залишковим аустенітом (20...40%), що забезпечує отримання високих показників пластичності (відносне подовження більше 10%, ударна в'язкість більше 100 Дж/см²) та міцності (тимчасовий опір руйнуванню більше 1000 МПа), а в подальшому – і зносостійкості;

охолодження – на повітрі до кімнатної температури.

З інших особливостей високоміцного чавуну з кулястим графітом слід відзначити підвищений вміст вуглецю (3,5...3,7 %) і кремнію (2,4...2,8 %) - для забезпечення початкової феритної структури. Низький вміст шкідливих домішок - фосфору (до 0,04 %) і, особливо, сірки (0,02 %) забезпечує меншу забрудненість фосфідами та сульфідами. Вміст марганцю треба обмежувати 0,4 %, що усуває утворення стабільного перліту. Додатково чавун легують нікелем, молібденом, міддю, що дозволяє стабілізувати аустеніт та підвищити твердість без втрати пластичності.

ПЕРСПЕКТИВИ МОДИФІКУВАННЯ СТАЛЕВИХ СПЛАВІВ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ.

Актуальність дослідження сталевих сплавів з підвищеними експлуатаційними властивостями обумовлена потребою в матеріалах, що відповідають сучасним вимогам промисловості. Враховуючи багатолітній досвід використання сталевих сплавів та численні дослідження експлуатаційних та механічних властивостей деталей із цих сплавів, рівень стійкості виробів з одного ж і того сплаву, в приблизно однакових експлуатаційних умовах, часто відрізняються в декілька разів. Тому модифікування сталевих сплавів з метою підвищення експлуатаційних властивостей є важливою і актуальною задачею в металургії.[1,2]

Метою дослідження є розглянути метод комплексного модифікування сталевих сплавів, що включає використання мікроелементів, таких як бор, титан та ніобій, для покращення механічних характеристик та експлуатаційних властивостей. Досліджувалось актуальність вводу декількох компонентів, з метою виявлення більшого засвоювання модифікаторів, для зменшення розміру зерна, рівномірної мартенситної структури та стабільної дрібнодисперсної мікроструктури сплаву.

В даній роботі вивчали вплив модифікування сталі 35ХМ титаном, бором та ніобієм на покращення механічних (міцності та пластичності) та експлуатаційних (жароміцність і стійкість до зношування) властивостей. Сталь 35ХМ є середньовуглецевою хромо-молібденовою конструкційною сталлю, яка застосовується для виготовлення деталей, що працюють під навантаженням, зокрема валів, шестерень і корпусних елементів.

Титан є активним карбідо- та нітридоутворюючим елементом, який впливає на формування дрібнозернистої структури сталі. При введенні 0,02–0,05% Ті в сталі утворюються карбонітриди TiC і TiN, які діють як центри кристалізації аустеніту. Це обмежує зростання зерен при нагріванні, зменшуючи їх середній розмір на 20–30%. Також ця концентрація титану оптимальна для забезпечення рівномірного розподілу карбонітридів без утворення надлишкових включень. Менший розмір зерна зменшує кількість міжзернових дефектів, що підвищує ударну в'язкість KCU на 15–20% (з 50 Дж/см² до 60 Дж/см² при -20°C). Карбонітриди TiC сприяють підвищенню твердості і стійкості до перегріву. Вони є термостабільними і перешкоджають зростанню зерен при термообробці, підвищуючи температуру перегріву на 50–80°C. В свою чергу зниження схильності до перегріву призводить до покращення механічних властивостей після термообробки.

При модифікуванні бором у кількості 0,002–0,004%, він утворює бориди Fe_2B , FeB , які зміцнюють поверхневий шар. Вони є надтвердими (HV 1800–2200) і запобігають інтенсивному зносу, зменшуючи коефіцієнт тертя на 15–25%. Також відбувається уповільнення зародження перліту під час охолодження, сприяючи утворенню мартенситної структури в більшій зоні перерізу. Рівномірна мартенситна структура призводить до вищої прокалістості сталі. Бор знижує критичну швидкість гартування, що дозволяє сталі загартовуватися на 30–40% глибше. В результаті досліджень модифікування бором і загартування видно підвищення твердості до HCR 58-62.

При додаванні 0,02–0,06% Nb утворюються карбонітриди NbC і Nb(C,N) (~50–200 нм), які стабілізують мікроструктуру при високих температурах. Це призводить до кращої жароміцності. При 550°C модифікована сталь витримує навантаження на 25% довше, ніж немодифікована. Також за рахунок меншого росту зерна при нагріванні вища ймовірність кращої довговічності. Сталь довше зберігає свої механічні характеристики при повторних нагріваннях і охолодженнях. З іншого боку ці карбонітриди блокують рух дислокацій, що уповільнює коагуляцію інших зміцнюючих фаз (наприклад, карбідів хрому). Це призводить до підвищення границі текучості $\sigma_{0,2}$ на 10–15% (до 750–800 МПа), за рахунок того, що дислокації важче рухаються через дрібнодисперсні частинки.

Таким чином модифікування сталі 35ХМ титаном, бором і ніобієм дозволяє отримати оптимальний баланс між прокалістю, твердістю, ударною в'язкістю та жаростійкістю, що робить її ефективною для застосування в умовах інтенсивних навантажень, тертя та високих температур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Відновлення і підвищення зносостійкості і терміну служби деталей машин: Підручник / Під редакцією В. С. Попова. Запоріжжя : ВАТ «Мотор Січ», 2000. 394 с. (російською мовою)
2. Шульте Ю.А. Виробництво оливок зі сталі./Ю.А. Шульте - Київ : Донецьк: Віща школа. Головне видавництво, 1983.-184 с.

УДК 621.791.37

Голтвяниця Ю.Г.¹, Голтвяниця В.С.², Сажнев В.М.², Торба Ю.І.³, Бехтер Р.В.⁴

¹асп., НУ «Запорізька політехніка»

²канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

³канд. техн. наук, ДП ЗМКБ «Прогрес» ім. академіка О.Г. Івченка,

⁴ДП ЗМКБ «Прогрес» ім. академіка О.Г. Івченка

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ВИХОДУ ПРИДАТНИХ ВИЛИВКІВ ЗА ДЕФЕКТОМ «СМІТТЯ»

Контроль властивостей керамічної форми у процесі лиття за витоплюваними моделями має потенціал для вирішення проблеми виходу придатних виливків за дефектом “сміття”. Вилучення з виробничого процесу форм, що з великою імовірністю призведуть до появи дефекту, не усуває причин його появи, хоча це може допомогти в пошуку цих причин. Так, вихід придатних імовірно підвищується, але витрати на виготовлення бракованих форм все також зберігаються.

Зазвичай, підприємства мають усталені технологічні інструкції, які жорстко регламентують послідовність технологічного процесу та склад сумішей, що використовуються для виготовлення керамічної оболонкової форми. Очевидно, що появу різного роду дефектів обумовлює і недотримання персоналом вказаних інструкцій. Але знову ж таки, і цей фактор не є вирішальним під час наближення до усунення проблеми появи дефекту «сміття».

Неможливо однозначно визначити природу появи вказаного дефекту на конкретній заготовці, але з досвіду технологів, наприклад, коли перестали використовувати модельну суміш КС-102 і перешли на Paracast FW-352, відсоток браку стрімко знизився. Вважається, що таким чином впливає відмінність властивостей сумішей – здатність повністю витоплюватися та не утворювати комків (зольних налипань) на внутрішній поверхні форми.

Вбачається, що такі наявні механізми потрапляння та генерації неметалевих краплень, що потім вимиваються з раковин на виливку: а) з металом, з шихти; б) генерація неметалевих краплень з самої форми після її деструкції; в) налипання залишків модельної маси. Ці механізми відкривають широкий простір для дослідження, з подальшою імплементацією результатів у хіміко-технологічному процесі.

Так, фільтрація розплаву – це доволі ефективний метод зменшення кількості неметалевих краплень у газотурбобудуванні. Але усталене виробництво стикається з новими викликами, що породжує використання фільтрів – це недолив у першу чергу. Доводиться піднімати температуру з метою підвищення рідинотекучості, що у свою чергу призводить до руйнування футеровки, тигля, форми, передчасного зношування печі, та впливає на процес кристалізації самого рівновісного сплаву.

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ 3D-ДРУКУ НА ВЛАСТИВОСТІ МАЙСТЕР МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВІДЦЕНТРОВОГО ЛИТТЯ

Сучасні технології 3D-друку отримали досить широке застосування у різних галузях промисловості. При цьому вони мають ряд переваг у порівнянні зі стандартними методами отримання виробів: розширення меж проектування, зменшення відходів матеріалів, прискорення створення моделей або прототипів, скорочення часу та етапів виробничого циклу, екологічну безпеку, а також постійний і швидкий розвиток.

Оптимізація параметрів 3D-друку та вибір відповідних матеріалів є ключовими факторами для забезпечення високої якості полімерних моделей, що використовуються при відцентровому литті (рис 1). В свою чергу відцентрова сила сприяє рівномірному розподілу розплавленого металу в формі. В результаті підвищується точність, зменшується кількість дефектів, покращуються механічні властивості кінцевих виливків.



а



б

а – полімерні моделі, створені методом 3D –друку, б – готова форма для відцентрового лиття

Рисунок 1 – Застосовування 3D-друку для отримання майстер моделей.

3D-друк є складним процесом, де механічні властивості надрукованих частин сильно залежать від параметрів самого процесу та складу матеріалу.

Одні з найважливіших технологічних параметрів, що впливають на якість моделі - це товщина шару та здатність роздільного друку. Зменшення товщини шару (наприклад, до 50 мкм) забезпечує високу точність і якість (гладкість) поверхні моделі, що критично важливо для відцентрового лиття, де навіть незначні дефекти можуть впливати на якість виливка.

Наступний фактор – щільність заповнення моделі. Оптимальна щільність сприяє збереженню структурної цілісності моделі під час виготовлення ливарної форми. Для відцентрового лиття рекомендується використовувати щільність заповнення в межах 100%, щоб забезпечити достатню міцність моделі та уникнути деформацій під час формування виливка.

У сучасному виробничому процесі використання тривимірного друку з майстер-моделями є не лише технічно вигідним, а й економічно обґрунтованим рішенням.

Один із ключових факторів економії — можливість багаторазового використання майстер-моделей. Створивши якісну модель лише один раз, ви можете використовувати її знову і знову без потреби у розробці нової кожного разу. Це зменшує витрати на проектування, скорочує час підготовки до виробництва, забезпечує стабільність і повторюваність результатів.

Таким чином, повторне використання майстер-моделей та відсутність необхідності у повторному друку значно підвищують економічну ефективність виробництва, оптимізують ресурси та дозволяють компаніям зосередитися на масштабуванні замість постійного перезапуску процесу.

Вдосконалення матеріалів і обладнання друку дозволяє отримувати вироби з новими рівнями якості.

Бачимо, що міцність, стійкість керамічних матеріалів оснащення грає вирішальну роль. Наразі для зміцнення поверхневих і внутрішніх шарів форми на виробництві застосовують дисперсні порошки алюмінату кобальту, алюмінію, кремнію, бору. Модифікування порошком алюмінію АСД-4 третього та наступного шарів забезпечує зв'язування залишкового кремнезему у кристалічну високотемпературну фазу, підвищуючи характеристики міцності (температуру деформації під навантаженням, межу міцності під час вигину та стиснення). Але ці технології вже застосовані, і як бачимо, проблема не вирішена остаточно. Для утворення термодинамічно стійких оксидів можна спробувати використовувати метали з вищою спорідненістю до кисню, ніж у алюмінію чи кремнію. Наприклад, є сенс дослідити вплив натрію, калію, кальцію, магнію, барію.

Можливості серійного виробництва в плані експериментів є обмеженими, тому технологи запропонували використати наявні матеріали і технології, комбінуючи їх у відмінності від усталених.

Так, запропоновано ввести додатковий перехід після операції прожарювання вже готової форми. А саме «закріплення» у свіжо підготовленому розчині гідролізу, шляхом промивання внутрішньої порожнини форми розчином гідролізованого етил силката, із просушуванням у звичайному режимі, як під час промивання дистильованою водою (50 хв. в установці УВС-3 або 3-6 годин на повітрі). Висунуте припущення, що таким чином структура кераміки форми додатково може зміцнитися.

ВПЛИВ РІДКОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ НА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ

Магній є найлегшим з усіх металів, які використовуються в якості основи для конструкційних сплавів. Саме ця властивість спонукає конструкторів замінювати більш щільні матеріали, не тільки сталі, чавуни та сплави на основі міді, але навіть алюмінієві сплави сплавами на основі магнію.

Чистий магній м'який і не міцний, тому конструктори використовують магній у вигляді його сплавів з іншими металами. Особливо широко застосовуються сплави магнію з алюмінієм, цинком і марганцем. Кожний з компонентів вносить свій внесок в загальні властивості: алюміній і цинк збільшують міцність сплаву, марганець підвищує його антикорозійну стійкість. Магній же додає сплаву легкість.

Однак з ростом попиту, а також з розширенням сфер використання виробів з магнієвих сплавів постала необхідність у покращенні та оптимізації властивостей цих сплавів. Це досягається шляхом легування такими елементами як літій, берилій, кальцій, церій, кадмій, титан та інші. Особливу увагу слід віднести до вивчення впливу рідкоземельних металів (РЗМ) на фізико-хімічні та механічні властивості сплавів на основі магнію. Вже існує багато сплавів де у ролі основного легуючого елементу виступають метали з ряду РЗМ, однак вплив в якості мікролегуючих добавок цих елементів до складу вже існуючих сплавів вивчено не повністю. Тому в наш час доцільним є визначення експериментальним шляхом методів та технологій покращення вже існуючих сплавів.

Вивчаючи літературні джерела та наукові праці багатьох науковців можна виділити ряд елементів з групи РЗМ, які мають вплив на хіміко-фізичні та механічні властивості сплавів на основі магнію.

Неодим (Nd) вже широко використовується в якості легувального елемента, так як значно підвищує механічні властивості при кімнатній температурі, а також підвищує жароміцність.

Додавання церію (Ce) до магнієвих сплавів може змінити мікроструктуру та покращити формування або опір повзучості магнієвих сплавів.

Гадоліній (Gd) також знайшов широке застосування особливо в закордонних сплавах, так як покращує стійкість до повзучості магнієвих сплавів.

Такий елемент як лантан (La) покращує формування захисних оксидних шарів, він може підвищити стійкість сплавів до різних типів корозії, включаючи точкову та загальну корозію.

Ітрій (Y) завдяки модифікації мікроструктури значно збільшує пластичність, що дозволяє отримувати магнієві сплави, що легко деформуються.

Оптимальна кількість празеодиму (Pr) та його поєднання з іншими елементами покращують механічні властивості та зносоустійкість сплавів на основі магнію.

Додавання диспозію (Dy) до магнієвих сплавів призводить до збільшення міцності та жароміцності, за рахунок подрібнення зерна та утворення інтерметалідних сполук.

Таким чином можна зробити висновок, що рідкоземельні метали відіграють важливу роль у покращенні фізико-хімічних та механічних властивостей магнієвих сплавів. Їх додавання дозволяє розширити застосування цих легких матеріалів у різних галузях промисловості. Однак, важливо ретельно контролювати склад та мікроструктуру сплавів для досягнення оптимальних властивостей.

УДК 669.1

Пелех В.М.¹

¹асп. НУ «Запорізька політехніка»

ЦИНКУВАННЯ СПЛАВІВ ТИПУ ЦАМ

Актуальність дослідження та розробка методики підвищення корозійної стійкості виливків ЦАМ є важливою і актуальною задачею в металургії. Нанесення металевих покриттів на ЦАМ, пов'язано зі значними труднощами, тому що супроводжується розчиненням металу основи і витиснення більш благородного металу з електроліту, що призводить до відшарування опадів. Також в порах виливків ЦАМ можуть затримуватись електроліти знежирення і травлення що веде до наступного відшаровування опадів. Предметом дослідження є електроліт, який працює при кімнатній температурі і перемішуванні в районі рН=5,5-6,3 та щільності струму 0,7-2 А/дм². В цих умовах осаджуються гладкі дрібнокристалічні покриття світло-сірого кольору, мікротвердість яких по Віккерсу є 300кг/мм², внутрішня напруга близька до нуля. Якщо товщина покриття 5мкм то воно майже безпористе. Розсіювальна здібність електроліту складає 58%. Також покриття відзначається хорошою адгезією. Міцність зчеплення з основою визначається методом відриву, методом нагрівання та нанесення сітки подряпин. Корозійна стійкість покриття оцінюється після витримки в 3%-ому розчині солі на протязі 20 діб по величині частотного показника. Таким чином, запропонована технологія нанесення корозійно стійкого покриття на основі цинку на сплави ЦАМ

УДК 621.74.002.6:669.131.6

Кудін В.В.¹, Єфременко Б.В.², Шалдін О.М.³,

Кармазін М.О.⁴, Бойчук Р.В.⁵, Козлова О.І.⁶

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. Приазовський державний технічний університет

^{3,4,5} асп. НУ «Запорізька політехніка»

⁶ студ. гр. ІФ-512 НУ «Запорізька політехніка»

ВИНИКНЕННЯ КОРОЗІЇ НА ПОВЕРХНІ ЧАВУННИХ ВИРОБІВ ПІСЛЯ ГАРЯЧОГО ЛУДІННЯ ОЛОВОМ

В Національний університет «Запорізька політехніка» від ливарного підприємства надійшли корпусні деталі із сірого чавуну після гарячого лудіння оловом, для дослідження на наявність ливарного пригару або корозії на поверхні виробів. Дослідження проводилися на кафедрі «Машин і технології ливарного виробництва» на оптичному мікроскопі МІМ-8.

Корозія на поверхнях виробів із чавуну з'являється внаслідок взаємодії з вологою та киснем. Це оксид і гідроксид заліза, що проникає вглиб поверхні. Жовто-бура корозія складається головним чином із гідроксиду заліза, що утворюється по формулі $4\text{Fe} + 6\text{H}_2\text{O} + 3\text{O}_2 = 4\text{Fe}(\text{OH})_3$. Окремі ділянки корозії з'являлися на частині чавунного виробу, поглинаючи вологу з повітря, що провокувало подальше поширення корозії.

Структурні складові чавуну (ферит, цементит і графіт) мають різну корозійну стійкість. Цементит і графіт в електролітах мають більш позитивні потенціали ніж ферит і по відношенню до нього є катодами. Найбільш низький електродний потенціал у фериту (-0,44), найбільш високий у графіту (0,37). При зіткненні з електролітом залізовуглецеві сплави утворюють мікроелементи, в яких цементит і графіт є катодами, а ферит анодом. Різницями потенціалів елементів пояснюється сильна електрохімічна корозія чавунних виробів (рис. 1).



Рисунок 1 – Схема атмосферної корозії.

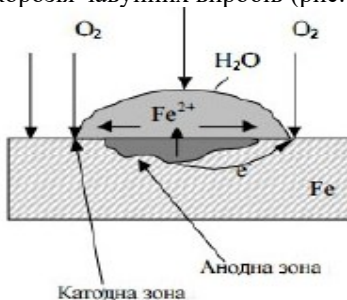


Рисунок 2 – Схема аерації при корозії.

В атмосфері чавунні вироби піддаються інтенсивній корозії завдяки руйнуванню феритної складової, хімічної та фізичної неоднорідності та

диференціальної аерації – неоднаковий доступ повітря до різних ділянок поверхні. На поверхні чавунних виробів виникає гальванічний елемент де гірше постачається кисень та відіграє роль анода. Метал в цих ділянках окислюється і на межі створюється катодна зона, де відбувається процес відновлення кисню з повітря (рис. 2). Корозія чавунів, що супроводжується розчиненням фериту, відноситься до структурно-виборчого типу. Механізм корозії чавунів полягає в тому, що ферит поступово переходить в розчин та виріб, що піддається корозії і складається з вуглецевого скелета (графіт і цементит) та простір заповнений пухкими продуктами корозії замість зерен фериту.

Дослідження поверхні при макрозбільшенні показало наявність ділянок корозії і та окремих ділянок олов'яного покриття (рис. 3). Слід зазначити, що ділянки олов'яного покриття були розподілені нерівномірно. Дослідження поперечного макрозлому показало, що на поверхні виливків є окремі краплі олова (рис. 4). Краплі олова мають опуклу форму і не утворюють суцільного олов'яного покриття, що свідчить про незадовільне змочування оловом поверхні чавуну. При дослідженні макроструктури не виявлено слідів ливарного пригару на поверхнях чавунних виробів.

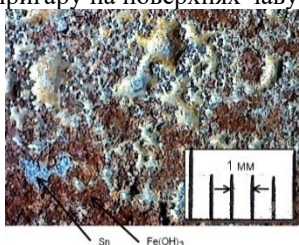


Рисунок 3 – Поверхня чавунного виробу.

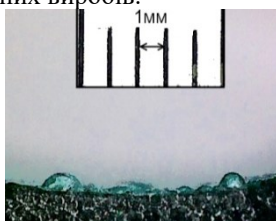


Рисунок 4 – Краплі олова на поверхні.

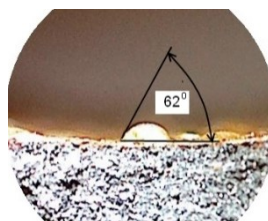


Рисунок 5 – Крайовий кут змочування Θ .

Змочування оловом поверхні чавуну оцінюється крайовим кутом змочування Θ . При повному змочуванні кут Θ наближається до 0° . Повна відсутність змочування відповідає $\Theta = 180^\circ$. Вимірювання крайового кута змочування показало, що його значення дорівнює приблизно $\Theta = 62^\circ$. Така величина крайового кута змочування Θ свідчить про незадовільний стан поверхні чавунних виробів для гарячого лудіння (рис. 5).

Для визначення причини незадовільного змочування поверхні чавунних виробів оловом приготували поперечний металографічний шліф. Мікроструктура чавуну містила дрібні включення графіту і з точки зору придатності для гарячого лудіння була цілком задовільною. На зовнішній стороні виливків під олов'яним покриттям були виявлені включення продуктів корозії чавуну (рис. 6). На внутрішній стороні виробів виявлені проникли в чавун продукти корозії,

що свідчать про тривалий вплив вологої атмосфери на поверхню чавунних виробів (рис. 7).

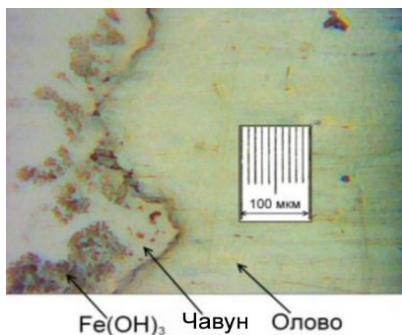


Рисунок 6 – Корозія чавуну під оловом.

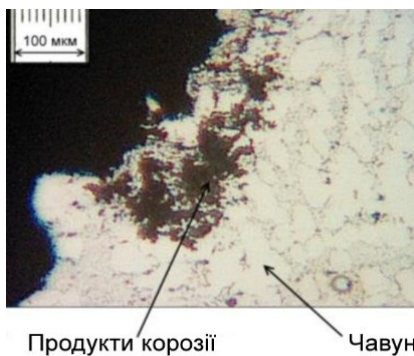


Рисунок 7 – Корозія в поверхневій зоні.

Спостерігали окремі ділянки локального електрохімічного руйнування металевої матриці в безпосередній близькості від включень графіту (вказано стрілкою) (рис. 8). Зафіксували початкову стадію проникнення корозії в поверхню внутрішньої частини чавунних виробів (рис. 9).

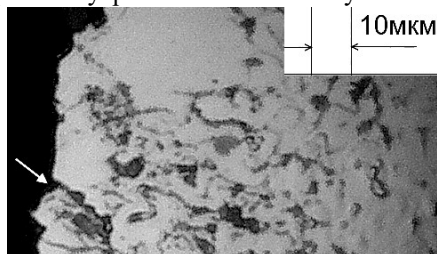


Рисунок 8 – Електрохімічне руйнування матриці (вказано стрілкою).

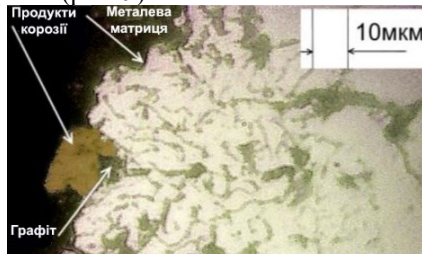


Рисунок 9 – Початкова стадія проникнення корозії в поверхню.

Аналіз результатів проведеного дослідження дозволяє зробити наступні висновки: олов'яне покриття носить фрагментарний характер, особливо на внутрішній поверхні виливків, у вигляді окремих крапель. Рівномірному розтіканню олова в процесі гарячого лудіння перешкождали продукти атмосферної корозії, які не були повністю видалені при підготовці виробів під лудіння. Для отримання якісного олов'яного покриття необхідно ретельно видалити продукти корозії та включення графіту, що виходять на поверхню виробу.

УДК 669.24.002.8:621.74.045

Кудін В.В.¹, Бойчук Р.В.², Кармазін М.О.³, Коняхін А.О.⁴

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

^{2,3} асп. НУ «Запорізька політехніка»

⁴ студ. гр. ІФ-514м НУ «Запорізька політехніка»

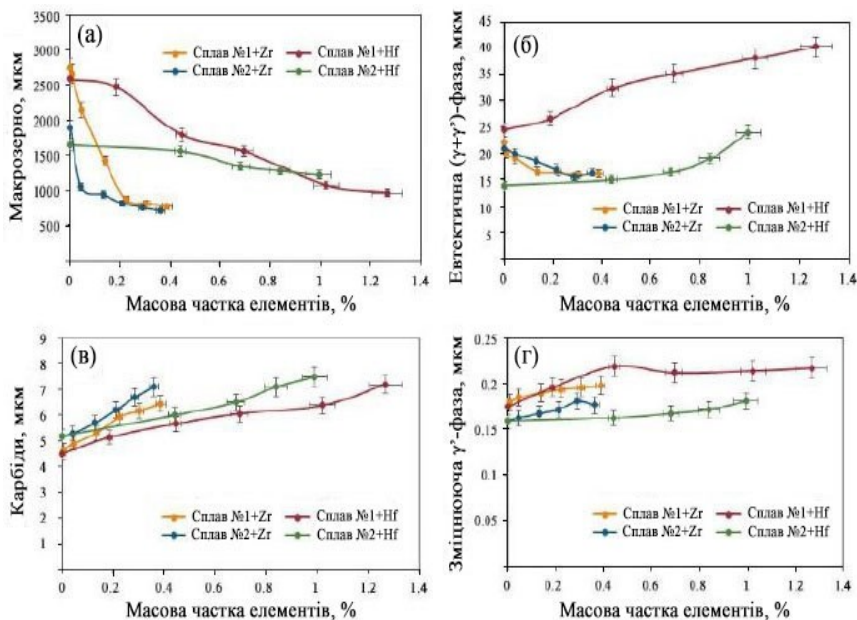
ВДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ІЗ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

Розвиток авіаційного газотурбобудування направлений на зростання робочих параметрів газотурбінних двигунів (ГТД), яке супроводжується збільшенням рівня температур, питомої потужності, економічності та навантаженості деталей турбіни з одночасним підвищенням вимог до надійності та ресурсу роботи ГТД. Надійність і тривалість роботи ГТД залежать від експлуатаційної довговічності деталей гарячого тракту турбіни: лопатки та соплові апарати. Основними сплавами для виготовлення цих деталей є високолеговані жароміцні сплави на нікелевій основі [1]. Експлуатаційна довговічність лопаток залежить від стабільності структури та властивостей жароміцних нікелевих сплавів. Поліпшення цих показників можливо шляхом вдосконалення технології виробництва лопаток додаванням раціональної кількості модифікаторів гафнію та цирконію.

Металографічний аналіз макроструктури лопаток показав, що введення гафнію та цирконію в нікелеві сплави сприяло зменшенню середнього розміру макрозерна (рис. 1 а), кількості та розмірів крихкої складової у вигляді фасеток внутрішньо зеренного сколу. Модифікування лопаток гафнієм та цирконієм зменшувало розміри дендритних осередків та відстані між осями дендритів, дробленню гілок карбідів типу «китайських ієрогліфів» та їх глобуляризації (рис. 1 в).

В мікроструктурі сплавів виділялася евтектична ($\gamma+\gamma'$)-фаза у міжвісних просторах та на межах зерен у вигляді цілісних конгломератів «пелюсток» ($\gamma+\gamma'$)-фази і прожилок γ -фази. Модифікування сплавів гафнієм та цирконієм призводило до зміни її морфології, кількості та розмірів. Кількісна оцінка евтектичної ($\gamma+\gamma'$)-фази показала, що середній розмір фази збільшувався з підвищенням вмісту гафнію. В сплавах модифікованими гафнієм кількість збільшилася в 2 рази, середній розмір 1,6 рази. Модифікування сплавів цирконієм збільшувало вміст, але зменшувало середній розмір ($\gamma+\gamma'$)-фази з 20 до 16 мкм (рис. 1 б).

Термічна обробка призводила до збільшення розмірів зміцнюючої γ' -фази в осях і міжосних просторах дендритів та вирівнюванню за хімічним складом в об'ємі металу. Кількісний аналіз показав, що модифікування гафнієм та цирконієм збільшувало її середній розмір (рис. 1 г).



а - макрозерно; б - ($\gamma+\gamma'$)-фаза; в - карбіди; г - зміцнююча γ' -фаза.
Рисунок 1 – Розміри складових сплавів з гафнієм та цирконієм.

Розроблені технології виробництва лопаток ГТД з жароміцних нікелевих сплавів модифікованих гафнієм та цирконієм підвищили межу міцності лопаток на 7%, відносне подовження на 50%, ударну в'язкість на 30% і тривалу міцність при 850°C на 20%, при 975°C на 30%. Розроблені технології модифікування жароміцних нікелевих сплавів гафнієм та цирконієм покращують структуру лопаток, що дозволяє забезпечити більш високий рівень фізико-механічних властивостей, збільшити термін служби деталей гарячого тракту, що в цілому підвищить експлуатаційну довговічність роботи газотурбінних двигунів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Патон Б., Халатов А., Костенко Д., Білека Б., Письменний О., Боцула А., Парафійник В., Коняхін В. Концепція (проект) державної науково-технічної програми «Створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики». Вісник НАН України. 2008. № 4. С. 3-9. ISSN 2518-1203. <https://doi.org/10.15407/vsn>.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБЛАДНАННЯ І ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК

Одним із ефективних сучасних способів отримання високоякісних біметалевих заготовок є застосування електрошлакових технологій [1, 2, 3]. Вони дають змогу отримувати біметал різного хімічного складу з товщиною наплавленого шару від кількох міліметрів до десятків сантиметрів та масою до сотень кілограмів. Високоякісні електрошлакові біметалеві заготовки значно підвищують ресурс роботи обладнання в різних галузях промисловості.

Протягом ряду років для ремонту деталей застосовується електрошлакова технологія відновлення [4]. Висока універсальність цієї технології дає змогу не лише відновлювати деталі різного призначення й інструменти, а й виготовляти високоякісні біметалеві заготовки. Під час отримання таких заготовок мають місце певні технологічні особливості процесу й обладнання. Основна складність полягає в необхідності надійного з'єднання твердого основного металу (кованого або литого) з рідким електрошлаковим металом, що наплавляється.

Процес отримання біметалевих заготовок електрошлаковим способом розпочинається з налаштування обладнання та підготовки основи до наплавлення. Поверхню основного металу, на який буде наноситися рідкий електрошлаковий метал, очищають від мастил, фарби, іржі. Вона повинна бути рівною й без дефектів. Витратний електрод обирається відповідно до необхідного хімічного складу, який забезпечує потрібні властивості біметалевої заготовки.

Існує два конструктивні варіанти виготовлення біметалевих заготовок за цією технологією.

Перший варіант передбачає, що основа за розмірами значно перевищує елемент, який наплавляється. Це технологічно простіший процес, що потребує лише спеціальної конструкції кристалізатора [5]. Такий кристалізатор забезпечує бездефектне з'єднання основи й металу, що наплавляється, та гарантує високу якість біметалевої заготовки.

Другий варіант, коли основа за розмірами менша за елемент, який наплавляється, є складнішим як у технологічному, так і в конструктивному аспекті. Частина заготовки формується у кристалізаторі, внутрішні розміри якого можуть значно перевищувати габарити основного металу. Необхідно конструктивно забезпечити проведення стартової операції електрошлакового процесу, розплавлення флюсу та формування рідкої шлакової ванни. Це реалізується за допомогою різних конструктивних елементів оснащення.

Для досягнення високоякісного з'єднання основного металу з розплавом, що наплавляється, технологічно необхідно ввести основний метал у нижню частину стандартного кристалізатора на глибину не менше ніж 10–12 мм (залежно від його розмірів). Це дає змогу на початковому етапі процесу сформувати не лише рідку шлакову, а й рідку металеву ванну, яка стане основою для подальшого формування електрошлакової частини біметалу.

Проведені дослідні наплавлення підтвердили доцільність і ефективність запропонованих конструктивних та технологічних рішень у процесі виготовлення високоякісних біметалевих заготовок із застосуванням електрошлакової технології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електрошлакова наплавка поверхонь виробів композиційним зносостійким сплавом / І.М. Рибалко, О.В. Сайчук, А.В. Захаров, О.М. Потоскаєв // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». Суми: Видавничий дім «Гельветика», 2022. Випуск 2 (48). С. 61–65.
2. Сайчук О.В. Електрошлакове наплавлення на постійному струмі в струмopідводному кристалізаторі електродом великого перерізу. / О.В. Сайчук, І.М. Рибалко, А.В. Захаров // Scientific Collection «InterConf», (127): with the Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Modern Directions and Movements in Science» (October 6–8, 2022; Luxembourg, Grand Duchy of Luxembourg) by the SPC «InterConf». Progress Publishers, 2022. С. 229–237.
3. Технології отримання футерувальних елементів методом електрошлакового наплавлення в струмopідводному кристалізаторі / А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, В.О. Жданов // Автоматичне зварювання. 2022. № 1. С. 46–48.
4. Спосіб електрошлакового переплаву: пат. 49674 Україна. № u 200910908; заявл. 29.10.2009; опубл. 11.05.2010, Бюл. №9. 6 с.
5. Пристрій для відновлення деталей методом електрошлакового наплавлення: пат. 79985 Україна. № u201212847; заявл. 12.11.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. №9. 3 с.

ПОРІВНЯННЯ ТОЧНОСТІ СТОМАТОЛОГІЧНИХ ІМПЛАНТАТІВ, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D СКАНУВАННЯ ТА ЗЛІПКІВ

Порівняння точності стоматологічних імплантатів, отриманих за допомогою 3D сканування та традиційних зліпків, є важливою темою, оскільки сучасні технології можуть впливати на результативність і надійність стоматологічних процедур. Це питання актуальне для стоматологів, які прагнуть підвищити точність і ефективність лікування, а також для пацієнтів, яким важливо приймати обґрунтований вибір враховуючи якість, довговічність та вартість послуг. Незважаючи на переваги 3D технологій, існують труднощі, пов'язані з високою вартістю обладнання та потребою у спеціалізованому навчанні медичного персоналу. Дослідження в цій сфері може сприяти оптимізації стоматологічних послуг і забезпечити більш інформований вибір для пацієнтів.

Сучасна стоматологія активно розвивається, і одним із важливих напрямків є підвищення точності стоматологічних імплантатів. У цьому процесі вибір методу отримання моделі – 3D-сканування чи традиційний зліпок – відіграє ключову роль. Обидва методи мають свої переваги та недоліки, що зумовлює необхідність їх детального аналізу.

Традиційний підхід передбачає створення відбитків за допомогою матеріалів, таких як альгілати або силікони. Ці матеріали забезпечують високу точність, але мають певні обмеження. Наприклад, фізичні властивості матеріалів, такі як усадка, можуть спричиняти спотворення розмірів моделі. Крім того, механічний вплив під час видалення зліпка з ротової порожнини іноді деформує його структуру.

Зліпки особливо чутливі до умов транспортування та зберігання. Наприклад, гіпсова модель, відлита із зліпка, може втрачати точність через механічні пошкодження або вплив вологості. У цьому контексті традиційні методи хоча й забезпечують доступність і низьку вартість, залишаються менш надійними для виготовлення складних конструкцій.

Цифрові технології пропонують альтернативу, яка усуває багато обмежень традиційних методів. Внутрішньоротові сканери використовують оптичні технології для створення тривимірної цифрової моделі зубів і ясен. Цей підхід виключає етапи механічної обробки, зменшуючи ризики спотворень.

3D-сканування також дозволяє лікарям одразу перевірити якість отриманої моделі, що робить процес більш контрольованим. У дослідженнях продемонстровано, що точність цифрових моделей значно вища порівняно з традиційними. Середня похибка цифрових моделей становить усього 15-20 мкм, тоді як для гіпсових моделей цей показник перевищує 40 мкм.

Крім того, 3D-сканери пропонують додаткові переваги:

1. Збереження часу. Процес створення цифрової моделі триває значно менше, ніж виготовлення традиційного зліпка.
2. Зручність роботи з даними. Цифрові моделі легко передаються між клініками та лабораторіями за допомогою інтернету, що спрощує співпрацю.
3. Зменшення кількості помилок. Автоматизація процесу знижує залежність результату від кваліфікації лікаря.

Порівняльний аналіз обох підходів демонструє, що кожен із них має свою сферу застосування. Наприклад, для пацієнтів із великими дефектами зубних рядів, де важлива механічна стабільність під час виготовлення. Проте для сучасних імплантаційних протоколів, які потребують максимальної точності, цифрові методи є незамінними.

Додатково, 3D-сканування дозволяє створювати складні моделі, зокрема імплантати з багатокомпонентними структурами. Така гнучкість у створенні конструкцій робить цифрові методи перспективними для розвитку персоналізованої стоматології.

Хоча 3D-сканування має численні переваги, його впровадження пов'язане з певними викликами. Основними з них є:

1. Висока вартість обладнання. Сканери та програмне забезпечення для обробки даних є дорогими, що обмежує їх доступність для менших клінік.
2. Необхідність навчання. Лікарі повинні освоїти нові технології, що вимагає часу та додаткових ресурсів.

Попри ці виклики, тенденція до поширення цифрових методів очевидна. Поступове здешевлення технологій робить 3D-сканування більш доступним, а його переваги переважають початкові витрати.

УДК 669.77

Козлова О.І.¹, Сергієнко О.С.²

¹ студ. гр. ІФ-512 НУ «Запорізька політехніка»

² доц. НУ «Запорізька політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДИ ВКРАПЛЕНЬ, ЇХ СТРУКТУРНОГО ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНИХ ТА РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНИХ МЕТОДІВ

Неметалеві вкrapлення — це чужорідні включення або домішки, що формуються в процесі кристалізації, термічної обробки чи під час використання матеріалів. Вони можуть мати різне походження, хімічний склад, структуру і фізичні властивості. Наявність вкrapлень спричиняє утворення дефектів та зниження міцності. Ефективними способами у вивченні наявності вкrapлень є рентгеноструктурний та рентгеноспектральний аналізи.

За походженням неметалеві вкrapлення в сталі розділяють на дві групи: ендегенні, що утворюються в процесі реакцій металургійного переділу,

та екзогенні, що механічно попадають в сталь. За хімічним складом неметалеві вкраплення розділяють на сульфіди, оксиди, нітриди та фосфіди – хімічні з'єднання деяких металевих компонентів, що входять до складу сталі, відповідно із сіркою, киснем, азотом та фосфором. За зовнішньою формою неметалеві вкраплення розділяють на глобулярні, гострокутові та неправильної форми.

Оксидні вкраплення утворюються на всіх етапах плавки та розливки сталі. Але найбільша кількість цих включень утворюється в процесі розкислення сталі. При цьому утворюються переважно оксиди тих елементів – розкислювачів, що в даних умовах мають найвищу здібність до розкислення.

Утворення сульфідних вкраплень відбувається переважно у двофазній зоні, тому ці вкраплення мають схиліть виділятися на межах литих зерен. В литій сталі утворюються головним чином сульфіди марганцю та сульфіди заліза. Температура плавлення сульфіду марганцю 1610°C , сульфіду заліза – 1190°C . Сульфід заліза із залізом утворює евтектику з температурою плавлення 985°C , що має схильність до розташування по межах литих зерен. При нагріванні виливків або зливків до такої температури спостерігають червоноламкість сталі. Форма сульфідних вкраплень залежить від особливостей кінцевого розкислення сталі. На склад сульфідних вкраплень вирішальний вплив має співвідношення вмістів марганцю та сірки. При співвідношенні $\text{Mn} / \text{S} = 1,5$ сталь містить 80% сульфіду марганцю, при співвідношенні $\text{Mn} / \text{S} \geq 10$, що є характерним для більшості стандартних вуглецевих та легованих сталей для виливків, в складі сульфідів міститься 95% сульфіду марганцю та 5% сульфіду заліза.

Вкраплення нітрідів з'являються в литій сталі, що містить такі елементи, як титан, цирконій, церій, лантан, алюміній, ванадій. Найбільш стійкі нітриди утворюють титан і цирконій. Нітриди титану мають кубічну форму золотистого або рожевого кольору.

Екзогенні вкраплення – це сторонні частки, що потрапляють у сталь. Ці вкраплення уявляють собою піщані зерна, що відірвалися від поверхні ливарної форми, зерна вогнетривких матеріалів, частки пічного шлаку. Переважають вкраплення, що були утворені внаслідок ерозії ливарної форми. При цьому більшу схиліть до забруднення екзогенними вкрапленнями мають виливки, що було одержано у сирих формах. Ливарний пригар можна розглядати як сукупність екзогенних вкраплень, що розташовано на поверхні сталевих виливків.

Для встановлення впливу вкраплень на фізико-механічні властивості сталі треба визначити склад неметалевих вкраплень та їх кількість. Склад неметалевих вкраплень визначається за допомогою методів якісного аналізу, кількість – за допомогою методів кількісного аналізу. Вкраплення можна проаналізувати фізичними методами, до яких відносяться рентгенографічний, рентгеноспектральний методи.

Для одержання рентгенограм з осаду вилучених неметалевих вкраплень виготовляють циліндричний зразок діаметром 0,2–0,6 мм. Цей зразок фотографується в рентгенівській стандартній камері Дебая. Анод рентгенівської трубки слід обирати з таким розрахунком, щоб відповідне випромінювання не збуджувало вторинного характеристичного випромінювання в самому зразку. Результати рентгенограми порівнюються з даними спеціальних довідників, після чого вирішується питання про фазовий склад вкраплення.

Рентгеноспектральний мікроаналіз вкраплень здійснюється за допомогою спеціальних приладів – рентгеноспектральних мікроаналізаторів. Рентгеноспектральний мікроаналіз вкраплень здійснюється двома методами: лінійним, та одержанням зображення вкраплення в характеристичному рентгенівському випромінюванні різних хімічних елементів.

УДК 669.77

Третинко С.О.¹, Сергієнко О.С.²

¹ студ. гр. ІФ-512 НУ «Запорізька політехніка»

² доц. НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ПРИГАРУ ПРИ ЛИТТІ СТАЛЕЙ У РАЗОВІ ПІЩАНО-ГЛИНИСТІ ФОРМ

При виробництві крупних виливків зі сталей матеріал форми нагрівається до високих температур. В результаті цього окремі компоненти можуть розплавлятися або взаємодіяти з оксидами заліза на поверхні виливка. Як результат утворюється міцна поверхнева плівка — пригар на поверхні виливка.

Пригар негативно впливає на структуру поверхонь виливків тим самим викликає необхідність механічної обробки поверхонь. Механічна обробка — це додаткові витрати часу і коштів підприємства.

Зниження пригару при литті сталей у разові піщано-глинисті форми, з застосуванням спеціальних антипригарних покриттів, дозволяє підприємству скоротити виробничий цикл, тобто усунення литникових дефектів таких як пигар та зекономити значні кошти.

З метою надання формовим і стержневим сумішам необхідних технологічних властивостей, окрім основних формових матеріалів, для виготовлення форм і стержнів, використовують допоміжні матеріали: в'язучі (закріплюючі), протипригарні, високовогнетривкі фарби і спеціальні.

Протипригарні матеріали використовують для запобігання утворення пригару на поверхні виливків. Такими протипригарними матеріалами є вогнетриви (хромиста руда - Cr_2O_3 , магнезит – MgCO_3 , циркон - ZrSiO_4 , азбест, графіт, кам'яне і деревне вугілля, кокс, кварцевий пил (маршаліт), протипригарні емульсії, фарби та ін. Існує три основних способи використання протипригарних матеріалів:

1 Введення їх в склад формової і стержневої сумішів;

2 Покриття поверхні форми або стержня порошком – припилом;

3 Нанесення на поверхню форми або стержня талькової фарби, або спеціальних швидко-висихаючих фарб та емульсій.

Вогнетривкі протипригарні матеріали використовують при виготовленні напівпостійних форм, а також форм, призначених для крупних сталевих і чавунних виливків. Хромисту руду використовують у розмолотому стані для виготовлення облицювальних сумішей для крупних сталевих виливків. Температура плавлення хромистого вогнетриву понад 2180°C. Магnezит вводиться (3-6 %) у формову та стержневу суміші, які використовуються для отримання виливків із високолегованих сталей. Його температура плавлення більше 2000°C. Циркон має температуру плавлення близько 2000°C і вводиться (5- 10 %) у формову і стержневу суміші для сталевого і крупного чавунного литва. Графіт чорний (аморфний) використовується, як наповнювач формувальних фарб, якими покриваються ливарні форми для чавунного литва. Його також використовують для приготування пасти (85 % графіту і 15 % глини), якою натирають стержні з метою отримання особливо чистої внутрішньої поверхні виливків. Графіт сріблястий (кристалічний) використовується, як наповнювач у ливарних фарбах і для припилювання поверхні сирих форм для чавунного литва.

Для запобігання ливарного браку та підвищення чистоти поверхонь виливків використовують, в процесі виготовлення ливарних форм, протипригарні матеріали (графіт, кам'яне та деревне вугілля, кокс, кварц і маршаліт). Вони вводяться у склад формових і стержневих сумішей у вигляді порошоків - припилів на поверхню сирих форм і стержнів, а також у вигляді рідких фарб. Для покриття поверхні форм і стержнів для чавунного литва використовують графітові фарби марок ГБ-1, ГБ-2, ГБ-3, які містять, окрім графіту (58,5-60,0 %), бентоніт (3,5 %), декстрин (3,5 %) і воду (28-33 %). Для сталевого литва використовують кварцеві фарби, марок СТ-1, СТ-2, СТ-3, які містять окрім кварцевого порошку (70 %), бентоніт (3,0-4,5 %), декстрин (1,5 %) і воду (17-25 %) [1].

Також в практиці для попередження цього дефекту замість кварцових пісків застосовують інші матеріали, що мають більш високу температуру плавлення, ніж кварц [2].

Таким чином, завдяки антипригарним покриттям можна уникнути пригару та зайвих фінансових витрат на його усунення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологічні процеси отримання заготовок для сільгосподарського машинобудування [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/tehnologichni_procesi_otrimannya_

УДК 621.74

Гнатенко М.О.¹, Логовиненко А.Г.²

¹ старш. викл НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. ІФ-511, НУ «Запорізька політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ЗІ СПЛАВУ ЕР648: ТЕХНОЛОГІЯ, ВЛАСТИВОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Метод плазмового наплавлення (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) досліджено як інноваційний підхід до виготовлення деталей авіаційних двигунів зі сплаву ЕР648. Метою роботи було експериментально перевірити та валідувати цей метод для створення заготовок із механічними властивостями, близькими до кованих матеріалів, а також оцінити його економічну ефективність порівняно з традиційними методами лиття та кування. У процесі плазмового наплавлення дріт ЕР648 діаметром 1,0-1,5 мм плавився плазмовою дугою з струмом 85-100 А, формуючи зразки розміром 200×150×20 мм та корпус турбіни для турбовентиляторного двигуна. Хімічний склад зразків (Ni: 32-36%, Cr: 4,2-5,3%, W: 0,5-1,1%, Ti: 2,2-3,3%) відповідав специфікаціям, що підтверджує стабільність процесу. Мікроструктура зразків виявилася однорідною, з γ -твердим розчином, нітридами та карбонітридами, причому зерна були дрібнішими, ніж у литих аналогах, завдяки швидкому охолодженню, що сприяло утворенню наноструктур (TiN, карбіди титану) і підвищенню жаростійкості. Механічні випробування показали, що міцність на розрив (σ_B) і межа текучості ($\sigma_{0,2}$) перевищують показники як литого, так і кованого ЕР648 при кімнатній температурі, тоді як подовження (δ) перевищує ливарні норми, але становить 70% від кованих у поздовжньому напрямку та 35% у поперечному. Випробування на розрив при 450°C і 73 МПа підтвердили стійкість зразків протягом 200 годин, що відповідає вимогам до кованих деталей. Виготовлення корпусу турбіни продемонструвало можливість створення близьких до кінцевої форми заготовок, які пройшли обробку та неруйнівний контроль без виявлення дефектів. Економічно метод виявився вигідним: коефіцієнт використання матеріалу зріс із 0,100 (кування) до 0,625, що дало економію близько 1400 доларів США на деталь лише за рахунок матеріалу. Висновки свідчать, що плазмове наплавлення є ефективним і економічно обґрунтованим методом для заміни лиття та кування при виробництві деталей авіадвигунів із ЕР648,

забезпечуючи високу міцність, термостабільність і відповідність якості, що робить його придатним для статорних і структурних компонентів.

УДК 669.775:669.182.71

Івахненко Є.І.¹, Шепель С.В.²

¹канд.техн.наук, доц. НУ«Запорізька політехніка», Запоріжжя

²студ. гр. ІФ-512сп НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя

ВПЛИВ МЕТАЛУРГІЙНИХ ФАКТОРІВ ТА МОДИФІКУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОКРЕМНИСТИХ ЧАВУНІВ

Висококремністі сплави заліза – феросиліди (ЧС15Д4ФЧЕЛ) застосовуються для роботи в умовах впливу кислих агресивних середовищ. Вони показують універсальні корозійні властивості при дії різноманітних кислот, не містять дефіцитних елементів, відносно дешеві і здатні замінити дороговартісні матеріали (нержавіючу сталь, гартблей, титан). Хімічний склад вивчаємих сплавів досліджували в межах: 0,7 – 0,9% С, 14,0 -16,0%Si, 0,4 -0,9 %Mn, 3,0 – 5,0 Cu , 0,2 – 0,4 V, 0,1 – 0,2 Y, 0,1-0,2 Se, Fe – інші.

Не дивлячись на високу корозійну стійкість, застосування феросилідів обмежене через низькі технологічні і механічні властивості та експлуатаційної надійності. Вирішення проблеми підвищення довговічності і надійності литих деталей визначається, перед усім, якісним виконанням технологічних заходів по всіх етапах переробки.

На практиці при виробництві виливків із висококремністих сплавів найбільш розповсюджені дефекти лиття – газові раковини, підкоркова та міждендритна пористість, гарячі тріщини та інші. Утворення цих дефектів пов'язане з негативним впливом газів, розчинених в феросиліді (табл.1). Гази поглинаються металом із атмосфери печі (особливо під час плавки шихти, феросплавів) по ходу плавки в результаті складних дифузійних процесів, а також при транспортуванні та заливці металу в форми.

Таблиця 1- Вміст газів в процесі плавки феросиліду

№ п/п	Проба металу	Вміст газів		
		Водень, См ³ /100 г	Азот, %	Кисень, %
1	За розплавом	12,2	0,0102	0,0128
2	Пічна перед випуском металу	4,2	0,0096	0,0067
3	Ківшева	3,96	0,0090	0,0059

При виплавці феросиліду рекомендовано застосовувати марки феросиліцію ФС 75 та ФС 45 ДСТУ 4127:2002, в яких вміст алюмінію не повинен перевищувати 2%. Застосування феросиліцію інших марок, які мають відхилення у

вмісті цього елементу, призводить до утворення газових та усадкових раковин та тріщин, зниження механічних властивостей, що може призвести до збільшення браку лиття до 70%.

Із таблиці 1 видно, що основна складова частина газів, які входять в феросилід - водень, який має більшу швидкість дифузії, ніж кисень, азот та інші.

Відомо, що кремній знижує розчинність водню в рідкому залізі. При зростаючій присадці кремнію (до 15%) дифузійна рухливість водню знижується. Ймовірно це відбувається за рахунок того, що атоми кремнію утворюють міцні зв'язки з атомами заліза, сили взаємодії яких значно вище, ніж сили зв'язків атомів заліза з воднем. В процесі кристалізації, кристали що ростуть, містять менше газу, ніж рідкий метал, який безперервно насичується газом. При пересиченні водень видаляється із металу в місцях, які мають контакт з атмосферою.

Специфіка виплавки високоремнистих сплавів заліза заключається в обов'язковому нагріванні (на 150-250 °C вище $T_{кр}$) після введення всіх складових компонентів, що сприяє значному покращенню якості металу.

Для достатньо надійного визначення ступеню дегазації сплаву і раціональних засобів його розливу застосовують експрес-контроль рідкого металу за газовістом з використанням портативного газоаналізатора типу LGT.

Вміст вуглецю в заевтектичних сплавах призводить до утворення крупних виділень графіту пластинчастої форми.

Вуглець в сплаві повинен відповідати евтектичному складу.

Введення міді та селену сприяє утворенню оболонок високо мідистих фаз, які дозволили ізолювати від матриці дисперсний графіт і неметалеві включення, що ускладнює накопичення і дифузію газів у сплаві і суттєво впливає на такі параметри, як рідинотекучість, теплопровідність, корозійна стійкість та інші.

Марганець відноситься до елементів, які не схильні до пасивації, тому швидкість корозії високоремнистих сплавів в основному визначається вмістом кремнію. Кислотостійкість сплаву системи «твердий розчин – комплексний карбід» вище, ніж системи «твердий розчин – графіт». Так як марганець є аустенітоутворюючим елементом, він значно збільшує розчинність вуглецю в γ – твердому розчині. Отримана в міждендритних проміжках структура перешкоджає утворенню крихкості сплаву.

Модифікування сплаву ванадієм приводить до утворенню в розплаві більшої кількості дрібних тугоплавких часток, що сприяє процесам об'ємної кристалізації. Вміст вільного азоту знижується за рахунок утворення карбонітридів ванадію.

Найбільший ефект дегазації досягається при комплексному модифікуванні сплаву спільно з ітрієм, який забезпечує переведення кисню та сірки із активного стану в пасивний.

Таким чином, проведення дослідів по комплексному легуванню і модифікуванню при термочасовій обробці металу з застосуванням методів контролю показали, що використання раціонального управління металургійними факторами забезпечує високу ефективність при виробництві складно легового корозійностійкого лиття.

УДК 539

Івахненко Є.І.¹, Майборода Д.О..²

¹канд. техн. наук., доц. НУ «Запорізька політехніка»

²студ. гр. ІФ-512сп НУ «Запорізька політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕРИТО-КАРБІДНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

Для деталей гірничо-збагачувального обладнання, працюючих в умовах абразивного впливу при високотемпературному зношуванні (до 1100°C) необхідно використання високолегованих сплавів, де основним фактором підвищення їх надійності та довговічності є рівень легованості, а також морфологія структурних складових металла.

Досліджували високолеговані феррито-карбідні сплави марок 100X27C2Л и 100X27H3C2Л, вивчали вплив вуглеця, хрому, кремнію и никеля на твердість (НВ) металу, відносну зносостійкість (E) та корозійостійкість ($h_{\text{ум}}$). Постановку задачі вирішували в межах: $0,3\% \leq C \leq 1,2\%$, $18,0\% \leq Cr \leq 28,0\%$, $0,5\% \leq Si \leq 2,5\%$, $0,4\% \leq Ni \leq 12,0\%$.

Для якісного фазового аналізу застосовували рентгеноструктурний аналіз. Зразки досліджували на дифрактометрі ДРОН-3М у фільтрованому кобальтовому випромінюванні при режимах сканування $U=26\text{kV}$, $I=15\text{mA}$. Сканування проводили зі швидкістю 1 град./хвил. В межах випромінювання $4 \cdot 10^4$ імп/с з постійною часу 2,5 с. За результатами сканування проводили якісний фазовий аналіз, згідно якого ідентифікувались фази аустеніта, феррита, карбідних неметалевих включень та інтерметалідних з'єднань.

З використанням рентгено-графічного устаткування Jeol 5 досліджували морфологію карбідів та прикордонні зони структурних складових карбид-феррит, інтерметалід-феррит. Металографічні дослідження проводили використанням оптичних мікроскопів МІМ-8М и МБІ-6 на зразках металу до і після високотемпературних (1100°C) випробувань.

Результати досліджень дозволили вивчити процеси коалесценції и сфероїдизації карбідів. Коалесценція карбідних часток починається разом з їх сфероїдизацією, но продовжується і після її завершення. Однак з більшою швидкістю вона йде тільки при високих температурах, коли дифузійна

рухомість вуглецю стає більшою. Дифузія вуглецю від мілких до великих часток карбідів утворює умови пересичення елементом аустенита в навіколокарбідних зонах. В результаті спостерігається поступове розчинення мілких часток карбідів й ріст великих.

Навіколомежові зони карбід-ферит та інтерметалід-ферит являють собою низколегований по хрому метал інтенсивно окислюючись під дією температури. Додавані елементи - кремній і нікель діють не однозначно. Легую метал навіколокарбідної зони, кремній знижує швидкість протікання корозійних процесів. Нікель, як елемент не схильний до пасивації, у вивчених межах на корозійні процеси практично не впливає.

Проведена робота дозволить економити дефіцитні легуючі елементи у вивчених високолегованих сплавах шляхом зниження їх концентрації в складі металу й досягнути бажаного рівня надійності та довговічності деталей гірничо-збагачувального обладнання.

СЕКЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ПРОЦЕСИ І ТЕХНОЛОГІЇ»

УДК 621; 669

Панфілов Т. В.¹ Михайлов О. В.¹, Нетребко В.В.²

1 асп. НУ «Запорізька політехніка»

2 проф. НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА МАТЕРІАЛІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

Будівельна техніка (бульдозери, екскаватори, скрепери, грейдери, автогрейдери і грейдер-елеватори, гідромонітори і землесоси, розпушувачі та інші) використовується при підготовці території будівельних майданчиків для будівництва промислових і цивільних об'єктів, доріг, мостів, прокладання цивільних мереж та інших об'єктів, а також у видобувній галузі. Робочі органи будівельних машин працюють в умовах інтенсивного абразивного та гідроабразивного зношування. За подібних умов експлуатації, за приготування та транспортування бетонних сумішей і розчинів, працюють деталі бетонозмішувачів, пневмонагнітачів, бетононасосів та бетонопроводів та інших механізмів які контактують із абразивними матеріалами та сумішами. За наявності рідини, на поверхні цих деталей виникають корозійні процеси різної природи та ефект Ребіндера, що пришвидшують руйнування.

В процесі будівництва використовують ручний інструмент: перфоратори та відбійні молотки. Деталі (робочі органи) цих механізмів працюють під впливом ударних навантажень та абразивних частинок.

При розробці або вдосконаленню конструкції машин, механізмів та окремих деталей інструмента потрібно враховувати особливості умов експлуатації. Відповідно до цього потрібно визначити зони найбільшого враження абразивними частинками. Наприклад кромки зуба та футеровки ковша, край ножа розпушувача, закінчення біли, поверхня та торець лопаті, куток трубопроводу та інші. Для цих зон деталей потрібні створювати замінні елементи. Наприклад для ножа розпушувача потрібен наконечник. Конструкція повинна передбачати легку заміну зношеної деталі на нову, або відновлену. Ножі ковша бульдозера чи скрепера потрібно поділити на частини які фіксуються втопленими болтами та гайками із внутрішньої сторони. Гострий чи плаский край біли відбійного пневматичного молотка краще виконувати змінним замість цільної конструкції.

Вибір матеріалу полягає в тому, що для різних умов експлуатації потрібно враховувати не тільки хімічний склад сплаву та його твердість, а й структуру (форма та розподіл карбідів) відсутність зон із різним вмістом хрому, що запобігатиме виникненню міжкристалічної корозії. Дрібнозерниста структура має високі показники ударної в'язкості, що забезпечує стійкість в умовах ударних навантажень.

УДК 669.14

Єфременко В.Г.1,2, Климов О.В.3, Гіржон В.В.4, Єфременко О.В.5,
Капустян О.Є.3, Бриков М.М.4

¹ проф. ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

² Prof. Institute of Materials Research of SAS, Slovakia

³ доц. НУ «Запорізька політехніка»

⁴ проф. НУ «Запорізька політехніка»

⁵ с.н.с. ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

НИЗЬКОЛЕГОВАНА СТАЛЬ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВИСОКОЇ МІЦНОСТІ ТИПОВИМИ ВИДАМИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Безпека людини в особливих умовах залежить від багатьох факторів, у тому числі здатності елементів конструкцій опиратися руйнуванню під дією навантажень, які перевищують розрахункові. Тому одним з актуальних наукових напрямів матеріалознавства є пошук високоміцних матеріалів і методів їх обробки для забезпечення високих показників конструкційної міцності.

Високоміцні сталі є надзвичайно важливим конструкційним матеріалом. Застосування сталей підвищеної і високої міцності сприяє зменшенню ризику катастроф і, що є також важливим, зменшенню витрат на матеріал. Високі показники міцності сталей забезпечуються різними методами термічної (термомеханічної) обробки. Застосовність тих чи інших методів до певної сталі залежить від її хімічного складу. Було б корисним мати таку сталь, до якої можна застосовувати всі основні види термічної обробки, або їх комбінацію. До таких видів можна віднести: гартування на мартенсит із відпусканням (*quenching and tempering*), ізотермічну обробку на бейніт (*austempering*) [1], часткове гартування з подальшою ізотермічною обробкою (*quenching and partitioning, Q&P*) [2].

Конструкційні високоміцні сталі, які піддають гартуванню із відпусканням, містять до 0,45-0,50 мас.% вуглецю. Збільшення вмісту вуглецю не призводить до значного підвищення міцності, але погіршує пластичність. Важливою вимогою до сталей, які піддають обробкам *austempering* або *Q&P*, є необхідність забезпечити температуру початку мартенситного перетворення (M_p) не вище певного рівня, оптимально 240-250 °С. Саме ізотермічна обробка сталей за температур утворення нижнього бейніту дозволяє отримувати за прийнятний час витримки високі показники міцності поєднані із підвищеною пластичністю. Міцність після обробки за більш високої температури є нижчою, а обробка за нижчої температури потребує неприйнятно багато часу. Також необхідно забезпечити вміст кремнію не менше 1,5% для запобігання утворенню карбідів під час ізотермічної обробки [1]. Таким чином, високоміцна низьколегована сталь для отримання високої міцності типовими видами термічної обробки має містити вуглецю більше 0,40% та мінімально 1,5 %Si. Решта легувальних елементів є необхідними, в першу чергу, для забезпечення M_p не вище

250 °C, а також для покращення прогартуваності і додаткового підвищення механічних властивостей.

Температура Мп аустеніту, який містить, наприклад 0,40 %C і 1,5 %Si, складає приблизно 350 °C. Для зниження Мп до 250 °C можна використати Мп та Ні як елементи-аустенізатори. Ці елементи найбільшою мірою покращують прогартуваність, оскільки знижують температуру евтектоїдного перетворення; крім того, вони, найбільш ефективно у порівнянні з іншими елементами впливають на Мп. Інші легувальні елементи (Mo, Cr, V, Nb, тощо) використовують в низьколегованих сталях у невеликій кількості, зазвичай значно нижче 1%. Для зниження температури Мп до необхідного значення треба вводити в два рази менше марганцю аніж нікелю, крім того, нікель є приблизно вдвічі дорожчим за марганець. Отже, при виборі хімічного складу низьколегованої високоміцної сталі мінімальної вартості треба орієнтуватися саме на систему легування Mn-Si, вводячи додаткові елементи лише задля досягнення певних цілей, таких як подрібнення зерна, усунення відпускнуї крихкості, тощо.

Подальші дослідження можуть бути спрямованими на визначення структури і властивостей низьколегованих високоміцних сталей із підвищеним вмістом вуглецю за різних видів термічної обробки. За умов задовільних механічних і технологічних властивостей такі сталі можуть доповнити ДСТУ 3760:2019 «Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій». На теперішній час зазначений ДСТУ регламентує вимоги до арматури зі сталей із вмістом до 0,32 %C, 2,40 %Si і 2,30 %Mn. Підвищення вмісту вуглецю із відповідним уточненням вмісту легувальних елементів дозволить значно розширити спектр властивостей виробів завдяки застосуванню різних видів термічної обробки, зокрема *austempering* та *Q&P*.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (проект 2021.01/0189).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bhadeshia, H.K.D.H., Christian, J.W. Bainite in steels. *Metall Trans A*. 1990. Vol. 21, P. 767–797.
2. Zurnadzhly V.I., Efremenko V.G., Wu K.M., Petryshynets I., Shimizu K., Zusin A.M., Brykov M.N., Andilakhai V.A. Tailoring strength/ductility combination in 2.5 wt% Si-alloyed middle carbon steel produced by the two-step Q-P treatment with a prolonged partitioning stage. *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 791, 139721.

УДК 669.14

Бобров Д.С.¹ Бриков М.М.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² проф. НУ «Запорізька політехніка»

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВМІСТУ ВУГЛЕЦЮ В НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЯХ

Сучасні високоміцні сталі широко використовуються в авіації, оборонній промисловості, транспорті та машинобудуванні, де від матеріалу вимагається поєднання високої міцності, пластичності та стійкості до крихкого руйнування. Оцінка таких сталей лише за окремими механічними характеристиками (границя міцності, ударна в'язкість тощо) не дозволяє прогнозувати їх надійність і довговічність під час експлуатації.

Серед запропонованих на теперішній час узагальнених критеріїв конструкційної міцності сталей можна зазначити вираз:

$$K = \sigma_B * \sigma_T * \delta, \quad (1)$$

де σ_B - границя міцності (GPa), σ_T - границя плинності (GPa), δ - відносне подовження (%).

Метою цієї роботи є аналіз взаємозв'язку між вмістом вуглецю та комплексним критерієм K у сталях, а також визначення оптимального вмісту вуглецю, який забезпечить максимальний показник K .

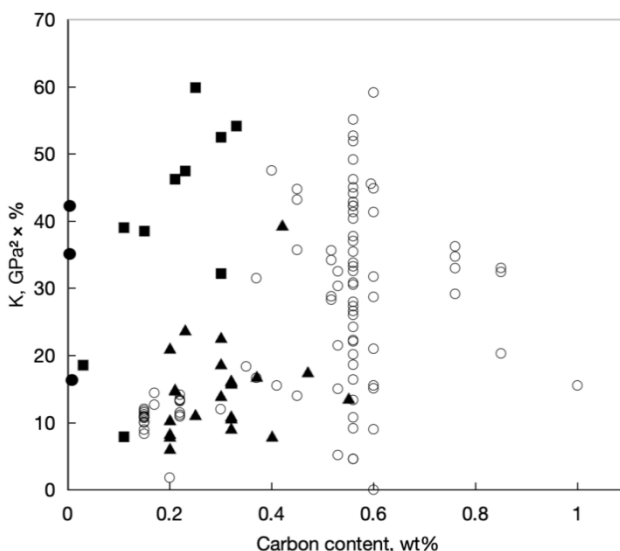
З відкритих джерел було зібрано дані щодо хімічного складу і механічних властивостей понад 100 варіантів сталей, як експериментальних, так і комерційно застосовуваних. Для всіх сталей розраховано показник K та нанесено точки на діаграму (рис. 1) залежності K від вмісту вуглецю.

На діаграмі спостерігається чіткий максимум значення K в діапазоні 0.50–0.60% вуглецю для експериментальних та промислових низьколегованих сталей. Високолеговані промислові сталі забезпечують максимум K за меншого вмісту вуглецю. Мартенситно-старіючі сталі майже не містять вуглецю взагалі.

Зсув максимальних значень K в бік меншого вмісту вуглецю для високолегованих сталей пов'язаний із великим вмістом легувальних елементів та/або застосуванням термомеханічної обробки.

Термомеханічну обробку також може бути застосовано і для низьколегованих сталей. Зазвичай сталі після термомеханічної обробки володіють підвищеним комплексом механічних властивостей. Тому оптимальний вміст

вуглецю в низьколегованих високоміцних сталях може бути зменшено до 0,45-0,50%.



● – мартенситно-старіючі сталі; ■ – високолеговані промислові сталі;
▲ – низьколеговані промислові сталі; ○ – експериментальні сталі, або промислові сталі, які піддано термічним обробкам за експериментальними режимами.

Рисунок 1 – Мапа значень показника К для різного вмісту вуглецю в сталях.

Низьколеговані сталі із вмістом вуглецю 0,45-0,50% здатні забезпечити комплексний показник міцності на рівні 45-50, а застосування до таких сталей термомеханічної обробки додатково підвищить міцність із збереженням достатньої пластичності.

Згідно з отриманими результатами, можна з великою ймовірністю припустити, що оптимальний вміст вуглецю у низьколегованих високоміцних сталях складає 0,45 – 0,50 мас%.

Такий вміст вуглецю без необхідності надмірного легування забезпечує високі значення К при різних варіантах відносно простої термічної обробки, зокрема після гартування на мартенсит з відпусканням, а також ізотермічної обробки за різними режимами.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (проект 2021.01/0189).

УДК 669.14

Тимченко Є.В.¹, Бриков М.М.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² проф. НУ «Запорізька політехніка»

ПОШУК АЛЬТЕРНАТИВНОГО МАТЕРІАЛУ ЛОПАТКИ ВНА

Лопатки компресора газотурбінного двигуна (ГТД) є основними елементами авіаційних двигунів, котрі визначають ресурс та надійність їх експлуатації в умовах дії агресивного газового середовища, температури, вологості, частинок, пилу, піску и т.і у повітряному потоці. Для сучасних двигунів лопатки компресора виготовляють зі спеціальних титанових і сталевих сплавів з складною просторовою формою пера, при цьому вони мають тонкі вхідні та вихідні кромки. Лопатки - одні з самих трудомісних та коштовних виробів ГТД. Це обумовлено тим, що для їх виготовлення застосовуються складні технології, дороге обладнання та коштовні матеріали, а також в одному двигуні використовується велика їх кількість.

Лопатка ВНА двигуна ТВ3-117 є найбільш складною за своєю конструкцією та технологією виробництва лопаткою компресора. Має складну просторову геометрію, кривизну профілю пера, внутрішній паз, а також повздовжній та поперечні пази у кількості 10 шт., виготовляється з корозійностійкої сталі 12X18H9T аустенітного класу, яка трудно піддається обробці в процесі виготовлення деталі. Під час виконання операції полірування на поверхнях деяких деталей (5-10% виробів) з'являються прижоги, що є неприпустимим. Виникнення прижогів супроводжується зміною механічних властивостей оброблюваної поверхні, утворенням поверхневих напружень розтягнення, котрі можуть привести до появи тріщин. Температура в зоні мікрорізання коливається в широких межах, в середньому, від 150 до 500 °C.

Коефіцієнт теплопровідності сталі 12X18H9T в температурному діапазоні до 200 °C становить 16-18 Вт/(м×K). Припущено, що менш легovanі сталі з більшим коефіцієнтом теплопровідності виявляться менш схильними до утворення прижогів. Коефіцієнт теплопровідності низьколегованих сталей, наприклад 30X, 40X, 30XH, 40XH, в температурному діапазоні до 200 °C становить 42-46 Вт/(м×K). Для більш легovanіх сталей, наприклад 20X13 та 30X13, коефіцієнт теплопровідності є меншим, а саме 26-27 Вт/(м×K).

Таким чином, зменшення рівня легування матеріалу лопатки ВНА, ймовірно, є перспективним шляхом зменшення гостроти проблеми прижогів під час полірування. Необхідно встановити оптимальний рівень легування матеріалу індивідуально для цього виробу. Мінімізація вмісту легувальних елементів без впливу на експлуатаційні властивості має вирішити проблему прижогів, або значно знизити кількість дефектів в процесі виробництва.

УДК 669.018.8:621.771

Мищенко В.Г.¹, Корнієнко В.В.²

¹ д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² асп. НУ «Запорізька політехніка»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗДАТНОСТІ ДО КАРБУВАННЯ КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ АУСТЕНІТНОГО ТА ФЕРИТНОГО КЛАСУ

Проблема підвищення експлуатаційної стійкості інструменту, що працює в умовах інтенсивного навантаження при холодній пластичній деформації, набуває значної актуальності. Одним із ключових шляхів вирішення зазначеної проблеми є розробка та впровадження нових економічно обґрунтованих марок сталей і прогресивних методів їхнього термічного оброблення, що забезпечують суттєве підвищення працездатності інструменту.

Експлуатаційна стійкість штампового інструменту для холодної деформації визначається комплексом факторів, серед яких домінуючими є величина ударних тисків, характер прикладеного навантаження та температура нагрівання робочих елементів. Штампи для холодної деформації функціонують в умовах високих питомих тисків (2200...2500 МПа та вище) і температур розігріву гравюр до 200 °С. Проте, при деформуванні високоміцних матеріалів, що характеризуються інтенсивним зміцненням, та високої продуктивності процесів штампування на вирубних і, особливо, карбувальних штампах, температура робочих поверхонь може досягати 400...500°C внаслідок генерації тепла в процесі пластичної деформації. Враховуючи значний вплив сил тертя на зношування гравюри штампу, що діють на його робочій поверхні, ключовою складовою у відомій залежності $F_T = f \cdot P$ є сила тиску (P), оскільки коефіцієнт тертя (f) залишається відносно сталими при використанні однотипних штамсів та корозійностійких сталей, навіть різних структурних класів. Таким чином, для оцінки впливу впровадження нових хромистих сталей на стійкість карбувальних штамсів замість традиційних хромонікелевих і хромомарганцовистих марок виникла необхідність визначення граничного зусилля карбування, що забезпечує формування якісного візерунка.

Експериментальні дослідження проводили на гідравлічному пресі моделі ПО443 з максимальним зусиллям пресування 20 МН. Об'єктами дослідження слугували сталі марок 10X14AG15 (аустенітний клас) та 03X18TB4 (феритний клас), що характеризуються коефіцієнтами деформаційного зміцнення, які відрізняються приблизно в 2 рази (рис. 1). Метою даного дослідження було визначення мінімального зусилля пресування (питомого тиску), необхідного для отримання заданої глибини та якості рельєфу (рисунка) на столовій ложці. Оцінка якості рельєфу здійснювали візуально та за допомогою скануючої електронної мікроскопії.

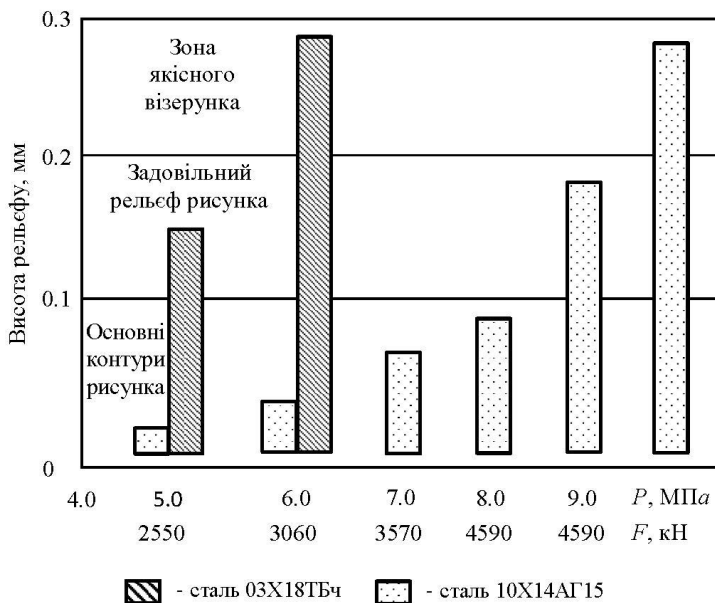


Рисунок 1 – Вплив зусилля F та питомого тиску пресування P на глибину та якість візерунка при карбуванні

Згідно з отриманими даними (рис. 1), для формування якісного візерунка на виробі зі сталі 03X18TB4 було необхідне застосування питомого тиску пресування 6,0 МПа, тоді як для сталі 10X14AG15 цей показник склав 10,0 МПа, що в 1,7 рази вище. Дана відмінність пояснюється більш вираженою схильністю аустенітної сталі до деформаційного зміцнення (наклепу) порівняно з феритною сталлю.

Експериментально доведено, що механічні властивості розглянутих сталей суттєво впливають на зносостійкість карбувальних штампів.

УДК 621.891.23

Попов С.М.¹, Гребешков М.О.²

¹ проф., НУ «Запорізька політехніка»

² асп., НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ МАТЕРІАЛОЗНАВЧИХ ПАРАМЕТРІВ БОРИДІВ ТИТАНУ В УМОВАХ ТРИБОЛОГІЧНИХ СПРЯЖЕНЬ ПРИ КОВЗАЮЧИЙ ВЗАЄМОДІЇ

Зношування деталей у важких умовах експлуатації є однією з головних причин виходу з ладу машинобудівного обладнання. Особливо це стосується робочих деталей техніки яка експлуатується в умовах високо-абразивного зношування, де вузли ходової частини працюють під дією великих навантажень і абразивного середовища з мікротвердістю 8-16 ГПа: пісок (кварцовий пісок), SiO_2 – 10-11 ГПа, глинозем (оксид алюмінію), Al_2O_3 – 15-16 ГПа, діабаз – 8-10 ГПа, граніт – 8-10 ГПа. Відомо, що в повільно-рухомих сильно навантажених машинах інтенсивно проявляється адгезійний знос через тертя ковзання – при високих контактних тисках та розігріві поверхні може відбуватися мікрозварювання нерівностей і зрив їх при подальшому рухові. Окрім адгезійного зносу, значну частку становить абразивний знос: тверді частинки абразивного середовища чи пилу, що потрапляють між тертьовими поверхнями, діють як контр тіла. Прискорене руйнування робочих поверхонь механізмів призводить до значного здороження обслуговування, простоїв та небезпеки аварій, тому підвищення зносостійкості матеріалів є нагальною науковою проблемою.

За оцінками науковців, до 75-85% усіх випадків зносу в машинних агрегатах обумовлено трибодією з твердими частинками (трюхтільний абразивний знос). Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування твердих наплавлювальних сплавів, у структурі яких присутні тверді надлишкові вкраплення. Диборид титану TiB_2 вирізняється надзвичайно високою твердістю (близько 30-33 ГПа), високою температурою плавлення $\sim 3225^\circ\text{C}$, низьким коефіцієнтом теплового розширення та високим модулем пружності (~ 530 ГПа). Завдяки такому поєднанню властивостей TiB_2 вже знаходить застосування як компонент броні, різального інструменту та зносостійких покриттів. Таким чином, матеріали з використанням дрібнодисперсних часток TiB_2 та боридів титану становлять значну зацікавленість для вузлів, що працюють у умовах інтенсивного тертя та абразивного зношування. Як показали дослідження TiB_2 є крихким і важко піддається спіканню через міцні ковалентні зв'язки та оксидні плівки (B_2O_3 , TiO_2) на його частинках. Тому сучасні дослідження спрямовані на створення композитів і покриттів, де TiB і TiB_2 поєднуються з іншими фазами, щоб підвищити загальну тріщиностійкість і полегшити отримання щільного матеріалу. Наприклад, у твердо-сплавних композиціях з використанням бориду титану показано, що додавання TiB_2 як зміцнювальної фази суттєво підвищує зносостійкість алюмінієвих сплавів порівняно з чистим

металом. Так само в керамічних композитах типу $\text{V}_4\text{C}-\text{TiB}_2$ збільшення вмісту фази TiB_2 веде до зростання твердості і ударної в'язкості матеріалу, що прямо корелює з підвищенням його зносостійкості. Отже, актуальність даного дослідження зумовлена потребою глибше вивчити механізми зношування матеріалів з застосуванням TiB_2 та розробити методики швидкого оцінювання їх зносостійкості для впровадження у важке машинобудування.

Покриття формували методом ручної дугової наплавки (ММА) з використанням неплавкого вольфрамового електрода в середовищі аргону. Як присадний матеріал застосовано експериментальний плоский електрод, виготовлений з тонкої металевої фольги (сталь) з заповненням всередині порошковою сумішшю. Склад порошоків (масова частка): хром 6–14 %, титановий порошок 10–18 %, карбід бору V_4C – решта (приблизно 70–84 %). Фольгу згортали у стрічку (в перерізі 3–3.5 мм * 10–12 мм), рівномірно розміщуючи всередині суміш порошоків, після чого краї стрічки обтискали для утримання заповнювача. Під час наплавлення стрічковий електрод вручну подавався. Електричний режим наплавлення підбирається таким чином, щоб забезпечити повне розплавлення присадного матеріалу для отримання незначної зони сплавлення з основним металом, але уникнути надмірного вигорання бору і вуглецю. Наплавлення виконували на пластини зі сталі (вуглецева конструкційна сталь 45 або аналог) розміром, наприклад, 50×100×10 мм. Для покращення змочування і мінімізації тріщиноутворення наплавлений шар охолоджувався разом із зразком (повільне охолодження на повітрі).

В процесі наплавлення відбувається реакційна взаємодія компонентів присадки з утворенням твердих боридів та карбідів. Зокрема, титановий порошок активно реагує з карбідом бору: можливі реакції типу $\text{Ti} + \text{V}_4\text{C} \rightarrow \text{TiB}_2 + \text{TiC}$ (за достатнього вмісту Ti) або $3\text{Ti} + \text{V}_4\text{C} \rightarrow 2\text{TiB}_2 + \text{TiC}$ та інші варіації. В результаті у розплавленому наплавленому металі кристалізуються частинки TiB_2 і TiC . За рахунок розчинення частини бору і вуглецю в розплаві можливе утворення боридів і карбідів на основі заліза та хрому. Очікується, що основними фазами наплавленого шару будуть: тверда фаза TiB_2 (дуже висока твердість ~30 ГПа, структура AlB_2), можливо TiC (твердість ~19–21 ГПа), а матриця – із залишкового металевого розплаву (залізо-хромова основа, легована Ti і B).

¹ PhD, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Т-414 НУ «Запорізька політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ПРЕСІВ В АВТОМОБІЛЬНІЙ ТА МАШИНОБУДІВНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ: ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ МОНТАЖУ ТА ДЕМОНТАЖУ

Гідравлічний прес є важливим інструментом у сучасній автомобільній та машинобудівній промисловості, використовується для монтажу та демонтажу підшипників, втулок і сайленблоків. Це спеціалізоване обладнання дозволяє значно спростити та прискорити процеси, які без нього вимагали б повної заміни робочих вузлів. Застосування преса зменшує ймовірність механічних пошкоджень компонентів і дозволяє виконати роботи з високою точністю, що є важливим для збереження належної функціональності механізмів.

Гідравлічний прес працює на основі закону Паскаля, застосовуючи гідравлічну рідину для передачі тиску. Принцип його роботи полягає в тому, що через використання гідравлічного чи механічного механізму на деталі, такі як підшипники, втулки та сайленблоки, впливає велика сила. При цьому застосовуються спеціальні оправки або матриці, що точно направляють сили пресування, забезпечуючи точне і безпечне встановлення без ризику пошкоджень деталей. Завдяки таким можливостям, процес монтажу та демонтажу відбувається швидко і з високою ефективністю, зменшуючи необхідність у витратах часу на повну заміну деталей та мінімізуючи ймовірність механічних дефектів.

Використання пресів дозволяє здійснювати кілька важливих функцій, зокрема монтаж підшипників і втулок з високою точністю. Преси забезпечують правильне встановлення підшипників у отвори або втулки на осі, що значно знижує ймовірність перекосів і дефектів. Це важливо для підтримання стабільної і довговічної роботи механізмів. Також, завдяки застосуванню пресів, можливо безпечно та ефективно видаляти зношені або пошкоджені підшипники та втулки, що унеможливує додаткові механічні пошкодження навколишніх частин механізмів. Ще однією важливою функцією пресів є установка сайленблоків, що зазвичай потребують значної сили та точності. Прес дозволяє виконати цю операцію з мінімальним ризиком пошкодження компонентів, що забезпечує правильну функціональність вузлів.

Основними перевагами використання гідравлічних пресів є висока точність, економія часу та універсальність. Преси дозволяють працювати з високою точністю, що знижує ризик пошкодження компонентів, а також значно прискорюють процес порівняно з ручними методами – це є важливим фактором для виробничої ефективності. Універсальність пресів полягає в можливості налаштування багатьох моделей для роботи з різними типами деталей і матеріалів, що забезпечує їхнє ефективне застосування в широкому спектрі галузей промисловості.

В процесі експериментальних досліджень ремонтних робіт машин було використано гідравлічний прес стандартної конструкції, виготовлений власними силами (рис. 1).



Рисунок 1 – Фотографія гідравлічного пресу власного виготовлення

Застосування гідравлічних пресів поширюється не лише в автомобільній промисловості, де вони використовуються для встановлення підшипників, втулок і сайленблоків у ходовій частині, трансмісії, двигуні та інших системах автомобіля, але й у машинобудуванні для монтажу та демонтажу компонентів у різних механізмах. Преси також активно використовуються в виробництві обладнання для складання та ремонту промислових агрегатів. Це дозволяє значно підвищити точність виконання робіт, зменшити ризик пошкодження компонентів і зекономити час на виробничих процесах.

Отже, використання гідравлічних пресів є необхідним етапом в оптимізації та модернізації процесів монтажу та демонтажу компонентів у сучасному виробництві. Преси забезпечують високу точність, економію часу та підвищення ефективності робіт, що є важливим для підтримання належної якості та надійності механізмів. Їхнє застосування значно знижує ймовірність механічних пошкоджень, підвищує ефективність та безпеку на всіх етапах виробництва, роблячи цей процес більш економічним і продуктивним.

УДК 621.791:621.396:004.89

Бажміна Е.А.¹, Удовиченко Ф.В.²

¹ PhD, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА ЗАСОБАМИ СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Сучасне зварювальне виробництво переживає активну трансформацію під впливом цифрових технологій та автоматизації, і ключову роль у цьому процесі відіграє впровадження сенсорних систем. В умовах підвищених вимог до якості, точності та продуктивності зварювальних операцій, датчики стають невід'ємним компонентом передових технологічних рішень. Їхнє застосування забезпечує не лише постійний моніторинг параметрів процесу, а й оперативну адаптацію обладнання до змінних умов, що значно знижує ймовірність виникнення дефектів.

Інтеграція сенсорних технологій в роботизовані зварювальні комплекси дозволяє досягати високої точності та повторюваності операцій навіть у складних виробничих умовах. Системи автоматичного відстеження шва, що базуються на візуальних, лазерних та тактильних датчиках, забезпечують динамічну корекцію траєкторії руху зварювального інструмента. Водночас, системи контролю якості в реальному часі дозволяють своєчасно виявляти відхилення від технологічних параметрів, зменшуючи кількість браку та втрат матеріалів.

Датчики все частіше використовуються в складі роботизованих зварювальних комплексів, систем автоматичного відстеження шва та систем контролю якості в реальному часі.

Роботизовані зварювальні системи. Інтеграція різноманітних датчиків дозволяє роботам-зварювальникам адаптуватися до змін у геометрії заготовок та параметрах процесу, забезпечуючи високу точність та повторюваність зварювальних операцій.

Системи автоматичного відстеження шва. Використання візуальних, лазерних або тактильних датчиків дозволяє автоматично коригувати траєкторію руху зварювального пальника, що особливо важливо при зварюванні складних криволінійних швів або деталей зі змінними розмірами.

Системи контролю якості в реальному часі. Датчики, що контролюють параметри зварювальної дуги, температуру зварювальної ванни та інші технологічні параметри, дозволяють оперативно виявляти відхилення від заданих значень та запобігати утворенню дефектів.

Сенсорний синтез. Комбінування даних з різних датчиків (наприклад, візуальних та лазерних) дозволяє отримати більш повну та надійну інформацію про зварювальний процес, підвищуючи точність контролю та прийняття рішень.

Сучасні дослідження та розробки в галузі сенсорних технологій для зварювання спрямовані на покращення характеристик існуючих датчиків, а також на створення нових, більш досконалих сенсорних систем. Основними тенденціями є:

підвищення точності та швидкості реакції датчиків (розробка більш чутливих та швидких сенсорів дає здійснювати більш ефективний контроль зварювальних процесів у реальному часі);

розширення функціональних можливостей (створення багатофункціональних датчиків, здатних одночасно вимірювати кілька параметрів, дає спростити сенсорні системи та зменшити їхню вартість);

інтеграція з системами штучного інтелекту та машинного навчання (застосування алгоритмів штучного інтелекту для обробки даних з датчиків дає здійснювати більш глибокий аналіз зварювальних процесів, прогнозувати виникнення дефектів та оптимізувати параметри зварювання в автоматичному режимі);

створення більш стійких та надійних датчиків (розробка сенсорів, здатних працювати в складних умовах зварювального виробництва (високі температури, електромагнітні поля, бризки металу), є важливим напрямком досліджень);

мініатюризація та інтеграція датчиків (розробка компактних та легко інтегрованих сенсорних систем спрощує їхнє впровадження у різноманітне зварювальне обладнання).

Сенсорні технології є фундаментальною складовою сучасного зварювального виробництва, сприяючи його переходу до вищих рівнів автоматизації та цифрової трансформації. Завдяки широкому спектру типів датчиків, їх інтеграції у роботизовані системи, а також застосуванню алгоритмів штучного інтелекту, з'являється можливість забезпечити не лише стабільність, а й інтелектуальну гнучкість зварювального процесу.

Основні тенденції розвитку сенсорних систем зосереджені на підвищенні точності, швидкості реакції та багатофункціональності датчиків. Окрему увагу приділено створенню надійних сенсорів для роботи в екстремальних умовах, а також мініатюризації компонентів, що полегшує їх інтеграцію в різні типи обладнання. Особливо перспективним є поєднання сенсорних систем із технологіями штучного інтелекту, що дозволяє не лише аналізувати дані, а й передбачати дефекти, оптимізуючи параметри зварювання в автоматичному режимі.

УДК 621.791:621.396

Бажміна Е.А.¹, Удовиченко Ф.В.²

¹ PhD, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. ІФ-312 НУ «Запорізька політехніка»

СУЧАСНІ СЕНСОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Зварювання є одним з ключових технологічних процесів у багатьох галузях промисловості, включаючи машинобудування, будівництво, аерокосмічну та автомобільну індустрію. Забезпечення високої якості зварних з'єднань є критично важливим для надійності та довговічності кінцевої продукції. В умовах зростаючих вимог до продуктивності та точності, все більшого значення набуває використання передових сенсорних технологій у зварювальному виробництві. Датчики відіграють ключову роль у моніторингу, контролі та оптимізації зварювальних процесів, сприяючи підвищенню рівня автоматизації, зниженню кількості дефектів та покращенню загальної ефективності виробництва.

Сучасні датчики, що застосовуються у зварюванні, відрізняються різноманітністю принципів дії та функціональних можливостей. Їх можна класифікувати за різними критеріями, зокрема за принципом перетворення вимірюваної величини в електричний сигнал та за їхнім призначенням у зварювальному процесі.

Датчики за принципом дії: *візуальні датчики* (ґрунтуються на обробці зображень, отриманих за допомогою камер. Застосовуються для відстеження геометрії шва, визначення положення заготовки та виявлення поверхневих дефектів. Розвиток алгоритмів машинного зору значно розширює можливості цих датчиків); *лазерні датчики* (використовують властивості лазерного випромінювання для точного вимірювання відстані та профілю поверхні. Застосовуються для високоточного відстеження шва та контролю геометричних параметрів зварного з'єднання); *тактильні датчики* (включають контактні механічні датчики та технологію відстеження шва через дугу), яка використовує зміни зварювального струму для визначення положення шва); *ультразвукові датчики* (застосовують ультразвукові хвилі для неруйнівного контролю якості зварних з'єднань та моніторингу параметрів зварювальної ванни, особливо при зварюванні полімерних матеріалів); *інфрачервоні датчики* (здійснюють безконтактний контроль температури зварювальної ванни шляхом вимірювання інфрачервоного випромінювання, що є важливим для забезпечення оптимальних умов кристалізації металу); *датчики сили/моменту* (вимірюють механічні зусилля, що діють на зварювальний інструмент, дозволяючи контролювати контактний тиск та інші технологічні параметри); *індуктивні датчики* (використовуються для безконтактного виявлення металевих об'єктів, забезпечуючи позиціонування та контроль присутності заготовок); *фотоелектричні датчики* (застосовуються для різних завдань, включаючи виявлення об'єктів та

контроль оптичних характеристик зварювального процесу); *датчики струму та напруги* (здійснюють моніторинг електричних параметрів зварювальної дуги, що є ключовим для стабільності процесу та якості зварювання); *датчики витрати газу* (забезпечують точне дозування захисного газу, необхідного для запобігання окисленню та забезпечення якісного формування зварного шва).

Датчики за призначенням: *датчики розпізнавання шва* (визначають початкове та кінцеве положення зварювального шва, полегшуючи програмування роботизованих систем); *датчики відстеження шва* (забезпечують автоматичне корегування траєкторії руху зварювального пальника в реальному часі, компенсуючи неточності підготовки кромок та деформації в процесі зварювання); *датчики контролю зварювальної ванни* (надають інформацію про розміри, форму та температурний стан розплавленого металу, що дозволяє оптимізувати параметри зварювання); *датчики контролю якості зварювання* (виявляють дефекти, такі як пори, тріщини та неспровари, на різних стадіях зварювального процесу); *датчики безпеки* (забезпечують безпечну роботу обладнання, запобігаючи зіткненням та іншим небезпечним ситуаціям).

Отже, впровадження сенсорних технологій у зварювальне виробництво відіграє ключову роль у підвищенні ефективності, якості та безпеки зварювальних процесів. Сучасні датчики забезпечують комплексний моніторинг та контроль на всіх етапах зварювання — від виявлення положення зварювального шва до аналізу параметрів зварювальної ванни й оцінки якості з'єднання. Завдяки широкому спектру принципів дії та функціонального призначення, датчики дозволяють гнучко адаптуватися до змін технологічного середовища та підвищити ступінь автоматизації виробництва.

Особливої ефективності можна досягти при інтеграції кількох типів сенсорів у єдину систему керування, що забезпечує адаптивне регулювання технологічних параметрів у режимі реального часу. Такий підхід сприяє зниженню кількості дефектів, оптимізації витрат ресурсів і підвищенню загальної стабільності процесу зварювання.

Таким чином, сенсорні системи є невід'ємною складовою сучасного зварювального виробництва, що відповідає вимогам цифрової трансформації промисловості та відкриває нові перспективи для розвитку інтелектуальних зварювальних технологій.

УДК [378.147:62]:[621.43+792.02]

Бажміна Е.А.¹, Позняков А.М.²

¹ PhD, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Т-414 НУ «Запорізька політехніка»

СИНЕРГІЯ ІНЖЕНЕРНОЇ ОСВІТИ ТА СЦЕНІЧНОЇ ПРАКТИКИ: АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ЗНАНЬ ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ» В РОБОТІ З МЕХАНІЗОВАНИМ СЦЕНІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ

Сучасна сценічна індустрія активно використовує складне механізоване обладнання для забезпечення динамічності та видовищності театральних постановок та інших заходів. Професія машиніста сцени є ключовою у забезпеченні технічної реалізації вистав, концертів тощо. Вона передбачає відповідальність за безпечну та ефективну експлуатацію складного механізованого обладнання, включаючи підйомні механізми, поворотні кола, лебідки та інші системи, значна частина яких може мати в своїй основі основні або суміжні принципи дії з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), зокрема в частині гідравлічних та електричних приводів. Фундаментальні інженерні знання, отримані під час навчання за спеціальністю «Двигуни внутрішнього згоряння», можуть стати цінним інструментом для підвищення кваліфікації та оптимізації роботи машиніста сцени.

Робота машиніста сцени охоплює широкий спектр завдань, пов'язаних з підготовкою та проведенням сценічних заходів. Ключовими технічними аспектами є:

Експлуатація механізованого сценічного обладнання – це управління підйомними штанкетними системами, поворотними колами, висувними платформами та іншими механізмами, що забезпечують зміну декорацій.

Обслуговування та технічний огляд обладнання передбачає регулярні перевірки технічного стану механізмів, виявлення потенційних несправностей та проведення профілактичних робіт.

Забезпечення безпеки під час роботи. Машиніст сцени несе відповідальність за безпечне функціонування механізованого обладнання для артистів, технічного персоналу.

Діагностика несправностей. У випадку виникнення технічних проблем необхідно швидко та ефективно ідентифікувати причину поломки та вжити заходів для її усунення.

Значна частина сучасного сценічного обладнання використовує гідравлічні, електричні приводи для забезпечення руху та позиціонування важких елементів декорацій і обладнання. Розуміння принципів роботи цих систем, їхніх компонентів та потенційних проблем є критично важливим для ефективної роботи машиніста сцени. Незважаючи на те, що безпосередньо ДВЗ можуть не використовуватися як основні силові установки в сучасній сценічній механізації, фундаментальні знання, отримані при їх вивченні, мають значний потенціал для застосування в суміжних галузях, зокрема:

Знання про електричні системи та електроприводи. Сучасні двигуни оснащені складними електричними системами запалювання, живлення та

керування. Розуміння принципів роботи електричних двигунів, генераторів, реле, запобіжників та електропроводки, отримане під час навчання, може бути корисним при роботі з електричними лебідками, підйомниками та іншими електрифікованими елементами сценічної механізації.

Основи механіки та кінематики. Вивчення будови та принципів дії кривошипно-шатунного механізму, газорозподільного механізму та інших механічних компонентів двигунів закладає фундаментальне розуміння передачі руху, перетворення енергії та кінематичних зв'язків, що є важливим для аналізу роботи будь-яких механізованих систем, включаючи сценічне обладнання.

Принципи діагностики та обслуговування складних технічних систем. Навчання ДВЗ включає методи діагностики несправностей, використання контрольно-вимірювального обладнання та планування регламентних робіт. Ці навички можуть бути безпосередньо застосовані для виявлення та усунення проблем у роботі сценічної механізації, а також для проведення її регулярного технічного обслуговування.

Знання про матеріали та їхні властивості. Вивчення матеріалів, що використовуються в конструкції двигунів, їхньої міцності, зносостійкості та корозійної стійкості, може допомогти в оцінці стану елементів сценічного обладнання та прогнозуванні їхнього терміну служби.

Основи охорони праці та техніки безпеки. Робота з двигунами вимагає суворого дотримання правил техніки безпеки. Усвідомлення потенційних небезпек, пов'язаних з роботою механічних, гідравлічних та електричних систем, отримане під час навчання, сприятиме більш відповідальному та безпечному виконанню обов'язків машиніста сцени.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку спеціалізованих навчальних модулів та програм підвищення кваліфікації для машиністів сцени, які б інтегрували знання з суміжних інженерних дисциплін, включаючи основи ДВЗ, для більш глибокого розуміння принципів роботи сценічного обладнання та оптимізації його експлуатації. Впровадження таких підходів сприятиме підвищенню рівня професіоналізму машиністів сцени та загальній якості технічного забезпечення сценічних заходів.

УДК 658.589:629.73.03(477.64)

Бажміна Е.А.¹, Кіреєв М.М.²

¹ PhD, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. ІФ-312 НУ «Запорізька політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВІ АВІАДВИГУНІВ НА АТ «МОТОР СІЧ»

АТ «Мотор Січ» є одним із провідних підприємств авіаційної промисловості, яке спеціалізується на виробництві, ремонті та модернізації авіаційних двигунів та газотурбінної техніки. Застосування сучасних технологій у виробничому процесі є критично важливим для підвищення продуктивності, якості та конкурентоспроможності продукції. Впровадження передових методів автоматизації, цифрового контролю та інноваційних матеріалів дозволяє забезпечити високий рівень надійності та ефективності авіадвигунів.

Сучасне виробництво авіаційних двигунів вимагає застосування високоточних технологій та автоматизованих процесів, які забезпечують високу якість кінцевої продукції. Основні напрями впровадження новітніх технологій включають: використання роботизованих систем для фрезерування, свердління та токарної обробки деталей, застосування адитивних технологій для виготовлення складних геометричних деталей та оптимізації ваги конструкцій, використання точного лиття із застосуванням сучасних матеріалів для підвищення міцності деталей.

Автоматизація відіграє ключову роль у покращенні ефективності виробництва та зниженні впливу людського фактору. Основними технологіями автоматизації, що застосовують на підприємстві, є: **СИСТЕМИ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ** для виготовлення деталей з високою точністю, автоматизовані системи контролю **У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ** для відстеження характеристик деталей та двигунів під час виробництва, **ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИМУЛЯЦІЯ** процесів для прогнозування поведінки авіадвигунів в умовах експлуатації.

Визначальним фактором довговічності та ефективності авіаційних двигунів є застосовувані матеріали. У цьому контексті важливими інноваціями є використання новітніх композиційних матеріалів, зокрема жароміцних сплавів, для значного підвищення термостійкості деталей. Крім того, застосування теплозахисних керамічних покриттів дозволяє ефективно зменшити теплове навантаження на критично важливі вузли двигунів. Не менш значущим є впровадження наноматеріалів, спрямоване на покращення ключових механічних властивостей вузлів.

Подальший розвиток виробництва авіадвигунів на АТ «Мотор Січ» передбачає активне впровадження інноваційних технологій.

Перспективними напрямками розвитку, на які робиться особливий акцент, визначено використання штучного інтелекту та машинного навчання для

прогнозування технічного стану двигунів та оптимізації виробничих процесів, розробка нових технологій у сфері енергозбереження та екологічності з метою зменшення шкідливих викидів і підвищення паливної ефективності двигунів, а також розвиток гібридних силових установок, що передбачає інтеграцію електричних та традиційних двигунів для зменшення споживання пального та покращення екологічних характеристик.

Впровадження сучасних технологій у виробництві авіадвигунів на АТ «Мотор Січ» є стратегічно важливим для підвищення конкурентоспроможності підприємства на світовому ринку. Автоматизація процесів, застосування новітніх матеріалів та цифрових технологій дозволяє не лише покращити якість продукції, а й зробити виробництво більш гнучким та ефективним у сфері авіаційного двигунобудування.

УДК 62-233.133.003

Бажміна Е.А.¹, Васілоє П.В.²

¹ PhD, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Т-414 НУ «Запорізька політехніка»

РОЗПОДІЛЬЧИЙ ВАЛ: АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ, МАТЕРІАЛІВ І ЇХ ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДВИГУНА ТА ЕКОЛОГІЧНІСТЬ

Розподільчий вал є одним з найважливіших компонентів газорозподільного механізму (ГРМ) двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Його основна функція полягає у забезпеченні своєчасного відкриття та закриття впускних і випускних клапанів відповідно до робочого циклу двигуна. Ефективність роботи розподільчого вала безпосередньо впливає на потужність, крутний момент, паливну економічність та екологічні показники ДВЗ. Протягом історії розвитку автомобілебудування конструкція розподільчих валів зазнала значних змін, спрямованих на оптимізацію характеристик двигунів.

Залежно від розташування відносно блоку циліндрів розрізняють нижньо- та верхньорозташовані розподільчі вали. Нижньорозташовані вали, що контактують з клапанами через штовхачі та коромисла, відрізняються простою конструкції, але мають більшу кількість рухомих елементів, що може призводити до втрат на тертя та обмежень у швидкості обертання. Верхньорозташовані розподільчі вали, розташовані безпосередньо над головкою блоку циліндрів, забезпечують більш прямий привід клапанів, зменшуючи інерційні маси та підвищуючи точність керування фазами газорозподілу, що особливо важливо для високооберткових двигунів.

До розподільчих валів висуваються високі вимоги щодо міцності, зносостійкості та точності виготовлення. Традиційно для їхнього виробництва

використовують леговані сталі та високоміцні чавуни, що піддаються термічній обробці для підвищення твердості робочих поверхонь кулачків та шийок. Сучасні технології включають точне лиття, кування з подальшою механічною обробкою на верстатах з числовим програмним керуванням, що забезпечує високу точність профілю кулачків. У перспективі розглядається можливість застосування композиційних матеріалів, що дозволить зменшити масу розподільного вала та інерційні навантаження.

Профіль кулачків розподільного вала є визначальним фактором для фаз газорозподілу – моментів відкриття та закриття впускних і випускних клапанів, а також величини їхнього підйому. Оптимізація геометричних параметрів кулачків (висота, ширина, кут профілю) дозволяє налаштовувати характеристики двигуна відповідно до конкретних вимог. Кулачки з більшим підйомом та тривалістю відкриття клапанів сприяють збільшенню потужності на високих обертах, тоді як профілі з меншими параметрами забезпечують кращий крутний момент на низьких та середніх обертах, а також зниження витрати палива.

Передача обертання від колінчастого вала до розподільного вала здійснюється за допомогою різних типів приводів: ланцюгового, ремінного та шестерного. Ланцюгові приводи відрізняються високою надійністю та довговічністю, але можуть бути більш шумними та вимагати змащення. Ремінні приводи забезпечують тиху роботу та меншу вагу, але потребують періодичної заміни. Шестерні приводи характеризуються високою точністю передачі обертання та довговічністю, але є більш складними та дорогими у виробництві. Вибір типу привода залежить від конструктивних особливостей двигуна та вимог до його експлуатаційних характеристик.

Під час роботи двигуна розподільчий вал зазнає значних динамічних навантажень, зумовлених інерційними силами рухомих елементів ГРМ та опором пружин клапанів. Ці навантаження можуть призводити до вібрацій та зносу компонентів. Для їхнього зменшення застосовуються різні конструктивні рішення, такі як оптимізація маси розподільного вала, використання демпферів крутильних коливань та ретельне балансування.

Однією з ключових тенденцій у розвитку конструкції розподільчих валів є впровадження систем регулювання фаз газорозподілу. Ці системи дозволяють змінювати кутове положення розподільного вала відносно колінчастого вала в залежності від режиму роботи двигуна, оптимізуючи таким чином наповнення циліндрів та ефективність згоряння паливної суміші. Іншим важливим напрямком є розробка систем керування підйомом клапанів, які дозволяють змінювати величину підйому клапанів, що забезпечує більш точне дозування повітря та палива, особливо на часткових навантаженнях. Також активно розвиваються модульні та складені конструкції розподільчих валів, що дозволяють оптимізувати масу та вартість виробництва.

Ефективна робота розподільчого вала є критично важливою для надійності та довговічності ДВЗ. Діагностика технічного стану розподільчого вала включає візуальний огляд на предмет зносу кулачків та шийок, перевірку люфтів у підшипниках, а також контроль стану приводних елементів. Несправності розподільчого вала можуть проявлятися у зниженні потужності двигуна, нерівномірній роботі, підвищеному шумі та збільшенні витрати палива.

Оптимізація фаз газорозподілу та величини підйому клапанів за допомогою розподільчого вала відіграє важливу роль у зниженні рівня шкідливих викидів ДВЗ. Точне керування процесами впуску та випуску дозволяє покращити якість згоряння паливної суміші, зменшити утворення оксидів азоту, чадного газу та незгорілих вуглеводнів.

Подальший розвиток розподільчих валів спрямований на підвищення їхньої ефективності, зменшення маси та вартості виробництва. Перспективними напрямками є застосування нових високоміцних та зносостійких матеріалів, таких як порошкові метали та композити, а також впровадження передових технологій виробництва, включаючи адитивні технології (3D друк), що відкривають нові можливості для створення складних та оптимізованих конструкцій.

УДК 742

Степаненко А.М.¹, Скоробогата М.В.²

¹ студ. гр.БАД-114сп НУ «Запорізька політехніка»

² старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

Дистанційне навчання з комп'ютерної графіки та AutoCAD стикається з певними викликами, які потребують трансформації традиційних підходів до викладання. Організація освітнього процесу в онлайн-режимі вимагає створення специфічного віртуального середовища, яке забезпечить ефективну взаємодію викладача зі студентами та формування необхідних практичних навичок. Інтеграція AutoCAD у систему дистанційного навчання передбачає модифікацію методичних прийомів, адаптацію навчальних матеріалів та розробку інтерактивних завдань для забезпечення якісного засвоєння знань студентами.

Віртуальне моделювання об'єктів, процесів та явищ дозволяє студентам краще зрозуміти основні властивості досліджуваних предметів, їхні компоненти та взаємозв'язки між ними, сприяє розвитку аналітичних здібностей та критичного мислення [3, с. 177]. Впровадження проектної діяльності у викладання комп'ютерної графіки дистанційно сприяє формуванню навичок самостійного дослідження, пошукової діяльності кожного студента та підвищує

рівень предметних компетентностей. STEM-освіта, яка принципово відрізняється від традиційного навчання, створює умови для розвитку аналітичних та творчих здібностей студентів, надає їм можливість спробувати себе в командній роботі та розвиває самостійність у здобутті нових знань. Викладання комп'ютерної графіки через призму STEM-підходу передбачає не лише передачу теоретичних знань, але й формування практичних навичок застосування сучасних технологій та моделювання для вирішення реальних задач.

Навчальний процес організовується таким чином, щоб студенти використовували знання з різних предметів, інтегруючи математичні, інженерні та технологічні аспекти при створенні тривимірних моделей в AutoCAD. Сучасне дистанційне навчання комп'ютерної графіки трансформується під впливом цифрових технологій, що підвищує вимоги до рівня цифрових компетентностей викладача та студентів. Використання електронних форм навчання, застосування цифрових засобів (комп'ютерів, планшетів та інших пристроїв) для формування елементарних цифрових навичок та вмінь реалізації проєктної діяльності стає актуальним питанням.

Практична складова викладання AutoCAD дистанційно може бути реалізована через віртуальні лабораторії, симулятори, інтерактивні музеї, які роблять проведення проєктної діяльності доступним, а навчальний процес – творчим. Використання якісних освітніх інтернет-ресурсів, з одного боку, створює позитивну мотивацію студентів до опанування комп'ютерної графіки, а з іншого – сприяє колективній навчальній діяльності всіх учасників освітнього процесу. Організація практичних занять з комп'ютерної графіки потребує застосування спеціалізованих платформ та інструментів, які забезпечують можливість демонстрації екрана, віддаленого доступу до робочого столу студента, спільної роботи над проєктами.

Система управління навчанням Moodle дозволяє структурувати матеріали курсу, організувати контроль знань та забезпечити зворотний зв'язок. Відеоконференції стають основним інструментом для проведення лекцій та практичних занять, консультацій та захисту проєктів.

Викладання комп'ютерної графіки дистанційно потребує розробки детальних інструкцій та відеоуроків, які допоможуть студентам самостійно опанувати інструменти AutoCAD, розібратися з основними функціями програми та виконати практичні завдання. Оцінювання результатів навчання з комп'ютерної графіки в умовах дистанційного формату має свої особливості та виклики.

Важливо розробити чіткі критерії оцінювання, які дозволять об'єктивно оцінити роботу студента без безпосереднього спостереження за процесом виконання завдання. Забезпечення академічної доброчесності при виконанні завдань з комп'ютерної графіки дистанційно потребує використання спеціальних

програмних засобів, які дозволяють перевірити оригінальність робіт та запобігти плагіату [2, с. 205].

Отже, дистанційне викладання комп'ютерної графіки та AutoCAD потребує комплексного підходу до організації навчального процесу, поєднання теоретичних знань з практичними навичками, застосування сучасних цифрових технологій та адаптації методичних прийомів для забезпечення ефективної взаємодії зі студентами та формування необхідних компетентностей.

УДК 621.7

Лаптева Г.М.¹, Комаров В.В.², Черкасов К.Є.³, Снесарь С.Б.⁴

¹ доц., НУ «Запорізька політехніка»

² Інжинірингова компанія Трефотек (TRAFOTECH LLC)

³ студ гр. ІФ-311, НУ «Запорізька політехніка»

⁴ асп., НУ «Запорізька політехніка»

РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ МІЦНОСТІ ЯРМОВИХ БАЛОК ТРАНСФОРМАТОРІВ КЛАСУ НАПРУГИ 110 КВ З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ

Ярмова балка – це зварна конструкція, яка використовується при виготовленні остовів трансформаторів класу напруги 110 кВ, що являється складовою частиною металоконструкції трансформатора.

Конструкцією ярмової балки передбачаються таврові з'єднання, стикові та з'єднання внапусток.

Виріб являється товстостінною, відповідальною конструкцією, до якої пред'являються підвищені вимоги якості.

Виріб розрахований на тривалий термін експлуатації, оскільки працює в важких умовах.

Ярмові балки повинні без ушкоджень витримувати зусилля, що виникають при короткому замиканні трансформатора. При підйомі не повинно бути залишкових деформацій. Жорсткість ярмових балок повинна забезпечувати пресування ярма магнітопроводу та осьове пресування обмоток.

Існують різні типи ярмових балок (коробчастого перерізу, з прямолінійною стінкою та приварними полицями, зі збірними стінками та фігурними ребрами, зі ступінчастою стінкою), які застосовуються в магнітних системах силових трансформаторів. Однак складність їх конструкції призводить до збільшення матеріало-, енерго- та трудомісткості, збільшення часу на виготовлення, складнощів, пов'язаних з особливістю їх виробництва (кривизна та непрямолінійність балок після зварювання та необхідність їх виправлення) вимагає оптимізації конструкції з метою усунення вищезгаданих недоліків, не втрачаючи, при цьому, механічної міцності балки.

Задля цього були проведені розрахунки на міцність розробленої оптимізованої конструкції балки трансформатора (рис.1).

Навантаження при розрахунках відповідали навантаженням на ярмову балку при короткому замиканні.

Коротке замикання на центральній фазі:

- максимальна сила, що діє на верхню притискну конструкцію при короткому замиканні на центральній фазі, дорівнює 170 кН, прикладена сила приймається рівною 85 кН, оскільки розрахункова модель представляє половину повної конструкції через симетрію останньої;

- сила, що діє на верхню притискну конструкцію на бічні фази в той же момент часу, приймається рівною зусиллю затиску обмоток, тобто 159 кН; прикладена сила приймається рівною 79,5 кН, оскільки розрахункова модель представляє половину повної конструкції через симетрію останньої.

Коротке замикання на бічній фазі:

- максимальне зусилля, що діє на верхню притискну конструкцію при короткому замиканні на бічній фазі, дорівнює 170 кН, прикладену силу прийнято рівною 85 кН, оскільки розрахункова модель представляє половину повної конструкції через симетричність останньої;

- сила, що діє на верхню притискну конструкцію на головних опорах у той самий момент часу, приймається рівною силі затиску обмоток, тобто 159 кН, прикладена сила приймається рівною 79,5 кН, оскільки розрахункова модель представляє половину повної структури за рахунок симетрії останнього.

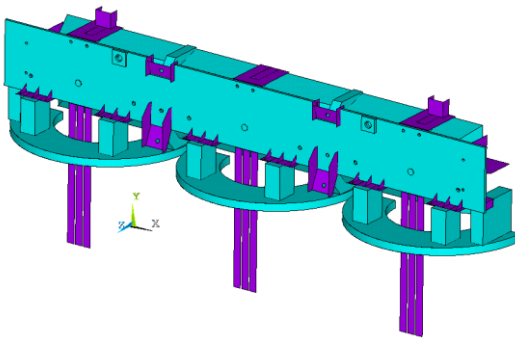


Рисунок 1 – Аналітична модель верхньої ярмової балки

Результати розрахунків показують, що ярмова балка відповідає вимогам по переміщенням і напруженням (отримані значення не перевищують допустимі).

Аналогічні розрахунки були проведені для трансформаторів потужністю 10, 25 і 63 МВА, результати яких також показали відповідність отриманих результатів вимогам міцності та надійності.

Це дає можливість зробити висновок про доцільність використання даної конструкції верхньої ярмової балки та уніфікувати її та техпроцес виготовлення для серії трансформаторів класу напруги 110 кВ.

УДК 621.791.052.001.2:004Ю4ANSYS

Черкасов К.Є.¹, Корнієнко О.Б.²

¹ студ. гр. ІФ - 311 НУ «Запорізька політехніка»

² старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

ПРОЕКТУВАННЯ ЗВАРНИХ ШВІВ В СИСТЕМІ ANSYS

У сучасному машинобудуванні та будівництві важливу роль відіграє надійність зварних з'єднань. Для їхнього ефективного проектування та аналізу широко використовується системи комп'ютерного моделювання. Однією з яких є ANSYS, яка дозволяє проводити розрахунки з урахуванням геометрії,

навантажень, термічного впливу та матеріальних властивостей.

Система ANSYS (особливо модулі Mechanical, DesignModeler, Workbench, SpaceClaim) надає інженеру потужні інструменти для моделювання, аналізу та оптимізації зварних швів. Основні переваги:

- автоматизація створення зварних швів (через Weld Creation Tool у ANSYS Mechanical 2022 R1+);
- висока точність аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням геометрії та теплових впливів;
- підтримка мультифізичних задач - можна аналізувати теплові, механічні та втомні явища в одній моделі;
- можливість використання бібліотек матеріалів, включно з властивостями металів після зварювання;
- постпроцесинг - наочна візуалізація результатів (розподіли напружень, зони концентрації тощо).

Розрахунок зварного з'єднання в ANSYS починається з підготовки геометрії. У середовищах DesignModeler або SpaceClaim створюють моделі деталей, які з'єднуються зварюванням. Зварний шов при цьому можна змодельовати вручну як окремий об'єм (наприклад, у формі трикутного чи трапецієподібного валика), або скористатися напівавтоматичним інструментом Weld Creation Tool, що дозволяє згенерувати шов за вказаними контактними поверхнями. Це суттєво прискорює роботу, особливо при великій кількості з'єднань.

Після побудови геометрії виконується сіткування моделі. У зоні шва важливо забезпечити високу точність розрахунків, тому в цих ділянках сітка згущується. ANSYS дозволяє гнучко контролювати параметри сітки: розмір елементів, тип (об'ємні Solid, поверхневі Surface або лінійні Beam), а також

використовувати адаптивне згущення (adaptive meshing), що підвищує ефективність розрахунку.

Наступним етапом є задання граничних умов. До моделі прикладаються всі навантаження, які виникають у реальних умовах експлуатації: механічні сили, тиск, вага конструкції. Якщо аналіз стосується процесу зварювання, враховуються також теплові поля - джерела тепла, теплопередача, охолодження. Додатково задаються обмеження: жорстке закріплення, площини симетрії або напрямки можливого ковзання.

Далі запускається розрахунок. ANSYS дозволяє проводити як лінійний, так і нелінійний аналіз, у тому числі з урахуванням пластичності матеріалів. При потребі проводиться тепловий аналіз самого процесу зварювання, що враховує вплив температури на матеріал, або втомний аналіз (за допомогою модуля Fatigue Tool), який оцінює довговічність зварного з'єднання при циклічних навантаженнях.

На завершальному етапі виконується аналіз результатів. Програма формує докладні карти розподілу напружень (von Mises, головні), деформацій, а також дозволяє визначити фактор безпеки для конкретної ділянки конструкції. Інженер може побачити потенційні зони перенапружень або навіть спрогнозувати місця можливого руйнування шва. Всі результати виводяться у зручному графічному вигляді, що полегшує інтерпретацію.

Система ANSYS надає широкі можливості для проектування, аналізу та оптимізації зварних швів. Завдяки потужному інструментарію інженери можуть моделювати як спрощені, так і реалістичні шви, що враховують геометрію, теплові процеси та вплив навантажень. Це дає змогу ще на етапі проектування підвищити надійність та довговічність зварних конструкцій.

Наукове електронне видання
Можна використовувати в локальному та
мережному режимах

ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2025

Інженерно-фізичний факультет

Збірник тез доповідей щорічної
науково-технічної конференції серед студентів,
викладачів, науковців, молодих вчених та аспірантів
14–18 квітня 2025 року

Один електронний оптичний диск (DVD-ROM);
супровідна документація.
Тираж 100 прим. Зам. № 499.

Видавець і виготовлювач
Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.