

**Секція 6 Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі**

**Анотований звіт  
по закінченій науково-дослідній роботі № ДІ 134-07 за 2007 – 2009 роки**

**1. Тема НДР: “Основи проектування енергоощадних джерел і режимів нагрівання для наплавлення тонких елементів конструкцій”**

**2. Номер державної реєстрації теми: 0107U001378**

**3. Номер облікової картки заключного звіту: 0210U001378**

**4. Назва вищого навчального закладу, наукової установи, державного підприємства Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**

**5. Характер НДР:**

- фундаментальне дослідження.

**6. Назва бюджетної програми:**

- "Фундаментальні дослідження у вищих навчальних закладах та наукових установах" (КПКВ 2201020).

**7. Терміни виконання:** початок - 01.01.07, закінчення – 31.12.09.

**8. Фактичний обсяг коштів, виділених на виконання НДР за весь період:**

128.4 тис. грн.

**9. Керівник НДР: Шаблій Олег Миколайович д. фіз. мат наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, академік АН України, проректор із зв'язків з виробництвом.**

**10. Короткий зміст викладу запиту:** Об'єкт дослідження: процес індукційного наплавлення тонких сталевих дисків порошкоподібними твердими сплавами і якість наплавлення. Предмет дослідження: закономірності процесу одночасного індукційного наплавлення по всій робочій поверхні тонких елементів конструкцій (сталевих дисків).

Метою даної роботи є створення теоретичних засад та рекомендацій для проектування енергоощадних нагрівальних систем одночасного індукційного наплавлення по всій робочій поверхні тонких елементів конструкцій (сталевих дисків) і розробка на цій основі технологій при мінімальних термінах та матеріальних затратах для їх практичної реалізації.

Основні завдання досліджень:

- розробити математичні моделі для визначення конструктивних параметрів нагрівальних систем у випадках, коли нагрівання здійснюється системою індуктор, тепловий і електромагнітний екрани (ІТЕЕ) та системою індуктор-магнітопровід, дослідивши також процес вільного остигання диска після наплавлення;

- розробити алгоритми та програми числового моделювання конструктивних параметрів вищезгаданих нагрівальних систем;

- знаходження оптимальних температурних полів, які забезпечують необхідні технологічні процеси при мінімальних енергозатратах;

- провести дослідження впливу режимів і нагрівальних систем на технологічність, продуктивність, енергозатрати і якість наплавленого металу;

- на основі проведених досліджень розробити технологічний процес для наплавлення тонких дисків у дрібно- і багатосерійному виробництві з урахуванням конструкцій нагрівальних систем.

В результаті виконання роботи отримані результати:

- математичні моделі оптимізації конструктивних параметрів нагрівальних систем для наплавлення тонких сталевих дисків та вільного остигання дисків після наплавлення;

- алгоритми та програми числового моделювання оптимальних процесів наплавлення тонких елементів конструкцій з використанням струмів високої частоти;

- технологічні процеси для наплавлення тонких сталевих дисків в дрібно- і багатосерійному виробництві. Отримані результати відповідають світовому рівню.

**11. Опис процесу наукового дослідження:** В техніці широке застосування знайшли тонкі диски, як суцільні так і зубчастої форми, робочі поверхні яких зміцнюють різними методами наплавлення.

Існуючі методи наплавлення, в тому числі і індукційне мають ряд недоліків: порівняно низька продуктивність процесу, велика енергоємність і нерівномірність товщини шару наплавленого металу.

Для цього було розроблено математичну модель оптимізації температурного поля в зоні наплавлення тонких дисків зубчастої форми з урахуванням комбінованого екранування тепловими та електромагнітними полями (система ІТЕЕ). Визначені конструктивні її розміри. Вона забезпечує більш рівномірну температуру в зоні наплавлення, яка регулюється вище названими екранами, що підвищує стабільність товщини шару наплавленого металу, так як при індукційному наплавленні порошкоподібний твердий сплав розплавляється від поверхні основного металу. Крім цього розроблена нагрівальна система зменшує конвективний теплообмін від поверхні (зони наплавлення) в оточуюче середовище, що дозволяє додатково економити електроенергію і скоротити час на наплавлення. Розроблені алгоритми, програми та проведенні дослідження для різних наборів вхідних даних. Побудовані порівняльні графіки. Також розроблена математична модель остигання диска після наплавлення з, використанням системи ІТЕЕ яка дозволяє визначати тривалість технологічного процесу наплавлення. Розроблені алгоритми та програми, та побудовані порівняльні графіки. Розроблена математична модель енергоощадної нагрівальної системи індуктор магнітопровід для наплавлення суцільних дисків з метою економії електроенергії та можливості практичного її застосування. Розроблені методики для експериментального дослідження температурного поля в диску з метою перевірки результатів отриманих теоретичним шляхом, а також пристрої і методики для дослідження товщини шару наплавленого металу, зносостійкості, прогинів та структури наплавленого металу.

Досліджено і підібрано режими індукційного наплавлення тонких сталевих дисків зубчастої форми, проведений мікрорентгеноспектральний аналіз перехідної зони сплавлення основного і наплавленого металу з використанням екранування теплових та електромагнітних полів (системою ІТЕЕ). Виконано порівняльний аналіз наплавлення дисків за новою і існуючою технологією та відмічені їх переваги. Приведені також дослідження наплавлення суцільних дисків з використанням системи індуктор-феритний магнітопровід. Сформульовані висновки і рекомендації.

## **12. Отримані наукові і (або) науково-технічні результати,**

- вперше для умов індукційного наплавлення тонких сталевих дисків зубчастої та суцільної форми розроблені математичні моделі для проектування енергоощадних нагрівальних джерел (систем-індуктор, тепловий та електромагнітний екрани (ІТЕЕ) та індуктор-магнітопровід) з урахуванням їх тепло-, електрофізичних, енергетичних, механічних та геометричних параметрів з використанням енергоощадного режиму наплавлення. На їх основі створені інженерні методики розрахунку нагрівальних систем для реалізації нового напрямку технології індукційного наплавлення тонких сталевих дисків. Отримані теоретичні та експериментальні результати підтвердили обґрунтованість застосування вибраних моделей з достатньою для інженерних розрахунків і практичних цілей точністю;

- вперше встановлено, що використання комбінованого екранування теплових та електромагнітних полів з метою керування розподілом температури в процесі наплавлення плоских деталей, в тому числі замкнутих (типу дисків) зубчастої форми, дозволило створити однакову температуру у всій зоні наплавлення, яка забезпечує рівномірне розплавлення наплавленого металу, усунення перегрівання основного металу на торці диска, покращення якості наплавленого металу по всій робочій поверхні при коефіцієнтах екранування теплової конвекції  $K_T$  і електромагнітного екранування  $K_e$ , що змінюються в межах  $(0 \leq K_T \leq 1)$ ,  $(0 \leq K_e \leq 1)$ .

### **13. Отримана науково-методична і (або) науково-технічна продукція**

Розроблено математичні моделі для визначення та оптимізації конструктивних параметрів нагрівальних джерел (систем) для наплавлення зубчастих і суцільних дисків довільних діаметрів і розмірів зони наплавлення у випадках, коли: існує нагрівальна система індуктор, тепловий та електромагнітний екрани (ІТЕЕ); дослідження вільного остигання диска; існує нагрівальна система індуктор-магнітопровід.

Розроблені на основі математичної моделі алгоритми та програми числового моделювання конструктивних параметрів нагрівальної системи для розробки технологічних процесів наплавлення суцільних дисків виходячи з потреб технології.

На основі поставленої задачі проведено розрахунки нагрівальної системи індуктор-магнітопровід: активних опорів, власного індуктивного опору контурів; опору короткого замикання контурів. Це дає змогу констатувати, що отримані дані режими роботи системи індуктор-навантаження лежать за межами запропонованих з позицій отримання допустимого К.К.Д. нагрівання виробу і нагрівання магнітопроводу, тому нехтування насиченням обґрунтовано для практичних розрахунків і дозволяє отримати спрощену методику вірогідних інженерних розрахунків з достатньою для практичних цілей точністю.

Розроблені основи індукційного наплавлення тонких сталевих дисків суцільної форми дозволяють проектувати нагрівальні системи індуктор-магнітопровід з врахуванням їх електрофізичних, енергетичних та геометричних параметрів. Отримані теоретичні і експериментальні результати дослідження нагрівальної системи індуктор-магнітопровід підтвердили обґрунтованість застосування вибраної методики з достатньою для інженерних розрахунків і практичних цілей точністю в межах 3-4%.

Запропонована методика розрахунку математичних моделей, при відповідному захисті авторських прав разом з демонстраційною версією пакету прикладних програм, розроблені нагрівальні системи і технологія можуть бути представлені як конкурентноспроможний продукт на ринку товарів та послуг.

### **14. Відмінні риси і перевага отриманих результатів (продукції) над вітчизняними або зарубіжними аналогами чи прототипами.**

На основі поставлених задач записано функціонал мети та побудовано розширений функціонал задачі і на основі необхідної умови його мінімуму, тобто рівності нулю, його першої варіації, отримано розв'язуючу систему рівнянь прямої та спряженої задачі, а також граничні та початкові умови для множників Лагранжа. Одержана математична модель знаходження температури в диску через параметри джерела його індукційного наплавлення з використанням електромагнітного і теплового екранування торця і нижньої поверхні диска з протилежної сторони зони наплавлення. Це дає змогу визначити та оптимізувати температуру в зоні наплавлення диска в залежності від параметрів індуктора, диска, електромагнітного і теплового екранів та електричного струму. Поставлено задачу, знайти такий закон розподілу потужності теплових джерел, який дозволяє за даний час в області наплавлення досягти температури, яка якнайменше відрізняється від заданої і при цьому результат досягається при мінімальних енергозатратах.

Встановлено, що теплова енергія, яка створюється нагрівальною системою ІТЕЕ скерована на одночасне індукційне наплавлення дозованого шару металу на робочу поверхню диска довільних розмірів, формується та спрямовується в екранованому тепловому і електромагнітному полі встановлених параметрів. Таке поле забезпечує рівномірне кероване виділення тепла в зоні наплавлення, що підвищує рівномірність товщини шару наплавленого металу в широкому спектрі їх конструктивних та експлуатаційних параметрів дисків. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблена технологія для одночасного наплавлення по всій робочій поверхні тонких сталевих дисків зубчатої форми з використанням системи ІТЕЕ та енергоощадного режиму наплавлення, в порівнянні з вітчизняними і зарубіжними аналогами дозволяє покращити рівномірність товщини шару наплавленого металу на 12,4 %, скоротити час наплавлення з 32 до 22 с, економити електроенергію до 32 %, усунути дефект перегрівання торця диска і наплавленого металу, а

також покращити екологічні питання пов'язаних із захистом людини від випромінювання тепловими та електромагнітними полями.

По результатам досліджень отримано два патенти №42596; №45731, а також два позитивні рішення на видачу патентів України №а20090554 від 01.06.09 р. та №а200907495 від 17.07.09 р., які також підтверджують відмінні переваги отриманих результатів математичних моделей і високопродуктивної енергоощадної технології індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій в порівнянні з вітчизняними і зарубіжними аналогами.

**15. Практична цінність результатів та продукції** (галузі економіки та суспільства, де можливе їх використання, конкурентоспроможність та інвестиційна привабливість, ступінь впровадження)

– розроблені конструкції двохвиткових кільцевих індукторів, способи одночасного наплавлення тонких дисків, нагрівальні системи, що складаються з двохвиткового кільцевого індуктора і електромагнітного екрану, системи індуктор, тепловий і електромагнітний екрани (ІТЕЕ), системи (індуктор-магнітопровід) для одночасного наплавлення тонких сталевих дисків зубчатої і суцільної форми, які захищені 3 патентами України, дозволяють додатково економити електроенергію на 9-20% та покращити якість наплавленого металу;

– отримані алгоритми, графічні залежності і табличні дані дозволяють визначити конструктивні розміри нагрівальних джерел (індукторів і систем), а також силу струму для наплавлення дисків зубчатої форми довільних діаметрів і розмірів зони наплавлення (для прикладу діаметри дисків 210...420 мм, товщиною 2...6 мм, шириною та товщиною наплавленого металу відповідно 10...50 мм і 1,0...1,5 мм) без проведення експерименту, що дозволяє скоротити термін і матеріальні затрати, які пов'язані з розробленням нових технологічних процесів наплавлення дисків виходячи з потреб технології

– розроблено методики та пристрої для вимірювання температури в зоні наплавлення товщини шару наплавленого металу, зносостійкості та прогинів дозволяють оцінити якісні показники технологічного процесу наплавлення в залежності від типів нагрівальних систем способів індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій (одночасне, неперервно-послідовне, відцентрове і т.п.) при мінімальних термінах та матеріальних затратах;

– розроблена технологія для індукційного наплавлення тонких дисків (ножів гичкорізів) передбачається використати на ВАТ „Тернопільський комбайновий завод”, режими нагрівання та нагрівальні системи – на ВАТ „Каховський завод електрозварювального устаткування”, а також на ВАТ „Коломиясьільмаш” при виготовленні ножів ковша автономного навантажувача-екскаватора ПЕА-1,0 „Карпатець”, а також результати досліджень впровадженні в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в 2009 р.

**16. Використання результатів (продукції) у навчальному процесі**

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі при підготовці фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за напрямом 6.050504 «Зварювання» при вивченні дисципліни «Математичне моделювання зварювальних процесів», спеціалістів і магістрів спеціальності 7.092301, 8.092301 «Технологія та устаткування зварювання», при вивченні дисциплін «Підвищення зносостійкості та відновлення спрацьованих деталей машин і механізмів», «Наукові дослідження і техніка експерименту» і «Експериментальні дослідження в зварюванні», а також використовуються при підготовці аспірантів в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

**17. Бібліографічний перелік монографій, підручників, посібників, наукових статей, інших публікацій, дисертацій, які опубліковано за матеріалами досліджень за період виконання НДР**

1. Шаблій О.М. Енергоощадна технологія індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій з урахуванням екранування теплових та електромагнітних полів [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, Б.М. Береженко // Тези доповідей 11 наукової конференції ТДТУ ім. Івана Пулюя, 16-17 травня 2007р. С. 5.

2. Шаблій О.М. Дослідження властивостей наплавленого металу, отриманого в нагрівальній системі ІТЕЕ (індуктор, тепловий та електромагнітний екрани)полів [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька // Тези доповідей 11 наукової конференції ТДТУ ім. Івана Пулюя, 16-17 травня 2007р. С. 4.
3. Шаблій О.М. Дослідження залишкових напружень, деформацій та переміщень при індукційному наплавленні тонких елементів конструкцій з урахуванням комбінованого екранування теплових та електромагнітних полів [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, М.С. Михайлишин // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя – №2. - 2007. - С. 101-117.
4. Шаблій О.М. Математична модель оптимізації конструктивних параметрів нагрівальної системи з урахуванням комбінованого екранування теплових та електромагнітних полів [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя – № 2.– 2007. – С. 66-76.
5. Шаблій О.М. Математична модель остигання диска після наплавлення нагрівальною системою індуктор, тепловий та електромагнітний екрани [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, М.С. Михайлишин // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя – №3 2007, С. 176-183.
6. Шаблій О.М. Методика розрахунку нагрівальної системи індуктор-магнітопровід для наплавлення тонких елементів конструкцій [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, О.С. Письменний // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя – №3. – 2007. – С. 38-46.
7. Шаблій О.М. Методики експериментальних досліджень технологічних процесів індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя – №4. – 2007. – С. 69-78.
8. Шаблій О.М. Залишкові напруження, деформації та переміщення отримані при наплавленні нагрівальною системою індуктор, тепловий та електромагнітний екран (ІТЕЕ) [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, Б.М. Береженко // Тези доповідей 12 наукової конференції ТДТУ ім. Івана Пулюя, 14-15 травня 2008р., С. 3.
9. Шаблій О.М. Основні напрямки індукційного наплавлення робочих органів сільськогосподарських машин [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, О.І. Король // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя – №4. – 2008. – С. 100-109.
10. Шаблій О.М. Спосіб відновлення спрацьованих сталевих деталей [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, Б.М. Береженко // Патент на корисну модель №42596 по заявці № u200901692 від 26.02.09р. опубліковано Б. №13 від 10.07.09.
11. Шаблій О.М. Дослідження мікроструктури і властивостей наплавленого металу, отриманого при індукційному нагрівання [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя – №1. – 2009. – С.46-55.
12. Шаблій О.М. Енергоощадна технологія індукційного наплавлення тонких сталевих дисків [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, Б.М. Береженко // Тези доповідей 9<sup>го</sup> міжнародного симпозиуму українських інженерів механіків у Львові, 20-22 травня 2009р, С. 206-208, м. Львів.
13. Шаблій О.М. Шляхи вдосконалення технології індукційного наплавлення сталевих виробів [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, О.І. Король // Тези доповідей Всеукраїнської конференції ТДТУ ім. Івана Пулюя 13-14 травня 2009р., С.4.
14. Шаблій О.М. Основні напрямки відновлення спрацьованих металевих коліс [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, Б.М. Береженко, О.І. Король // Тези доповіді всеукраїнської наукової конференції ТДТУ ім. Івана Пулюя 13-14 травня 2009р., С.3.
15. Шаблій О.М. Спосіб відновлення спрацьованих сталевих деталей[Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, І.І. Стойко, О.І. Король //Патент на корисну модель №45731 по заявці №u200905443 від 29.05.09р. опубліковано Б. №22 від 25.11.09р.
16. Шаблій О.М. Пристрій для наплавлення тонкостінних деталей [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, М.С. Базар // Заявка на видачу патенту а200905554 від 01.06.09р.
17. Шаблій О.М. Основи проектування та конструювання енергоощадних нагрівальних систем для індукційного наплавлення та відновлювання робочих поверхонь металевих конструкцій [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, Я.І. Микитин, О.І. Король // Тези доповідей міжнародної конференції 06-09 жовтня 2009р. м. Краматорськ С.75-76.

18. Шаблій О.М. Енергоощадні нагрівальні системи для індукційного наплавлення тонких сталевих дисків [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, О.І. Король, М.С. Базар // В друці стаття у фаховому виданні Вісник ДДМА 11 стор. 2009Краматорськ ст. 2009р.
19. Шаблій О.М. Електротермічна індукційна нагрівальна система для відновлення робочих поверхонь залізничних коліс [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, Я.І. Микитин, О.І. Король // Тези доповіді міжнародної конференції в Миколаєві НУК 14-17 жовтня,2009р. С.115.
20. Шаблій О.М. Спосіб наплавлення сталевих деталей [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, О.І. Король, М.С. Базар // Заявка на видачу патенту а200907495 від 17.07.09р.
21. Шаблій О.М. Енергоощадна нагрівальна система для індукційного наплавлення тонкостінних елементів конструкцій [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, М.С. Базар // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя - №3. – 2009. – С.91-97.

**18. Кількість штатних співробітників \_\_\_\_\_, кількість сумісників 7 молодих учених з оплатою 2, кількість студентів з оплатою 1, які брали участь у виконанні НДР**

**19. Обґрунтування доцільності подальшого проведення наукових досліджень і розробок із даної тематики, орієнтовна тематика досліджень.**

**20. Рішення науково-технічної ради від 16,01,2010р, протокол № 2: робота із даної тематики виконана в повному обсязі згідно технічного завдання на високому науковому рівні. Отримані результати перевершують світові аналоги.**

Керівник роботи

Проректор із наукової роботи

\_\_\_\_\_ Шаблій О.М.  
д. фіз. мат наук, професор, заслужений діяч  
науки і техніки України, академік АН  
України, проректор із зв'язків з  
виробництвом

\_\_\_\_\_ Рогатинський Р.М.  
доктор технічних наук, професор