

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Сімутєнков Іван Вікторович**

**УДК 621.791.92**

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ АВТОМАТИЧНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПІД  
ФЛЮСОМ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ З ВИСОКОЧАСТОТНИМИ  
КОЛИВАННЯМИ ЕЛЕКТРОДА**

Спеціальність 05.03.06 - зварювання та споріднені процеси і технології

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті кораблебудування ім. адм. Макарова (НУК) Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент,  
**Драган Станіслав Володимирович**,  
Національний університет кораблебудування  
ім. адм. Макарова, професор кафедри зварювального  
виробництва.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Савицький Михайло Михайлович**,  
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона  
НАН України, м. Київ, керівник відділу  
«Фізико-металургійних процесів зварювання  
середньолегованих високоміцних сталей»;

доктор технічних наук, професор  
**Кузнецов Валерій Дмитрович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,  
завідувач кафедри «Інженерія поверхні».

Захист відбудеться «19» січня 2016 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 при Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерства освіти і науки України, за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерства освіти і науки України, за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9.

Автореферат розісланий «17» грудня 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02  
доктор технічних наук, професор



Л.І. Коростильов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність дослідження.** Підвищення надійності машин і механізмів - важлива науково-технічна задача, вирішення якої пов'язане як із запобіганням зносу - збільшенням зносостійкості робочих поверхонь, так і з оперативним ремонтом - скороченням періоду простою обладнання, що експлуатується. Для створення або відновлення таких поверхонь широко використовують різні способи зміцнення, напилення і наплавлення. Одне з провідних місць серед методів наплавлення, завдяки високій продуктивності і якості наплавленого шару, займає автоматичне електродугове наплавлення. Однак автоматичне наплавлення під флюсом (АНФ) характеризується надмірним тепловкладенням в основний метал (ОМ). Надлишок тепла призводить до зростання частки участі основного металу в наплавленому шарі (ЧОМ), збільшення деформацій, зниження механічних властивостей наплавленого шару. Існуючі способи АНФ дозволяють багато в чому усунути ці недоліки, але їхня реалізація потребує використання складних зварювальних установок або дорогих джерел зварювального струму з програмуванням параметрів режиму. Альтернативний шлях полягає у використанні серійного зварювального обладнання, оснащеного порівняно недорогим пристроєм, який активізує процес наплавлення. Під активізацією слід розуміти збудження в електродному дроті високочастотних коливань, які, у свою чергу, призводять до руйнування рідкометалевого шару (РМШ), що знаходиться на торці електрода, з реалізацією дрібнокрапельного переносу металу, який дозволяє керувати формою проплавлення, процесами кристалізації металу шва, регулювати тепловкладення в ОМ. У зв'язку з цим дослідження, присвячені розробці технології АНФ з високочастотними коливаннями електрода (ВКЕ), спрямовані на розширення можливостей технології АНФ з керування характером переносу металу і геометрією наплавленого шару, а також на підвищення продуктивності та зниження ЧОМ, актуальні для суднобудівної, машинобудівної та інших галузей промисловості України.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні етапи дисертаційної роботи виконані згідно з договорами про творчу співпрацю з ТОВ «Смарт-Груп Меритайм» (м. Херсон), №1886 від 20.11.2012 р. "Розробка технології та обладнання для ремонтного наплавлення під флюсом з високочастотними механічними коливаннями електрода зношених поверхонь деталей суднових механізмів і пристроїв" (ДР № 0113u001025) і ТОВ «Чорноморська яхтова верф» (м. Миколаїв), № 1205 від 01.06.2015 р. "Удосконалення технології відновлення галтелей при ремонті гребних валів автоматичним наплавленням під флюсом" (ДР № 0115u001622). Рівень участі здобувача в роботах - відповідальний виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка технології автоматичного однодугового наплавлення під флюсом конструкційних сталей на основі керування характером переносу металу через дугу під впливом високочастотних механічних коливань електродного дроту.

Для досягнення зазначеної мети були сформульовані та вирішені наступні завдання:

1. Розкрито механізм впливу ВКЕ на умови відриву крапель з торця електродного дроту, характер переносу металу через дугу, геометрію і властивості наплавленого шару.

2. Розроблена розрахунково-експериментальна методика визначення параметрів високочастотного впливу на електрод для керування характером переносу металу.

3. Розроблено конструкцію механічного генератора імпульсного впливу на електродний дріт, що дозволяє реалізувати комплексне керування характером переносу металу через дугу, геометрією та властивостями наплавленого шару, з можливістю встановлення його з мінімальними витратами на стандартне зварювальне устаткування.

4. Експериментально досліджено вплив параметрів керуючого впливу на стійкість дугового процесу, геометрію, структуру і твердість наплавленого шару та продуктивність наплавлення.

5. Виконане дослідно-промислове впровадження у виробництво технології автоматичного наплавлення конструкційних сталей під флюсом з високочастотними коливаннями електрода під час виготовлення та ремонту деталей суднових машин та механізмів.

**Об'єкт дослідження** - процес отримання нових і відновлення зношених поверхонь деталей машин з конструкційних сталей методом однодугового АНФ з додатковим керуючим впливом у вигляді високочастотних позаосьових коливань електрода.

**Предмет дослідження** - технологічні параметри дугового процесу і властивості наплавленого металу при однодуговому АНФ з ВКЕ.

**Методи дослідження.** Досягнення мети та розв'язання поставлених у роботі завдань ґрунтувалося на положеннях теорії зварювальних процесів, методах прикладної математики та металознавстві.

Експериментальні дослідження проводили на спеціально розробленому стенді, що складається з джерела живлення інверторного типу, зварювального трактора і розробленого генератора високочастотних імпульсних переміщень електрода.

Хімічний аналіз наплавленого металу виконували за допомогою растрового електронного мікроскопа – мікроаналізатора РЭММА - 102-02. Вимірювання твердості основного і наплавленого металу проводили з використанням твердоміру ТП-10, мікро- та макроструктуру металу досліджували на оптичному мікроскопі *NEOFOT* - 22.

Вплив ВКЕ на стабільність процесу наплавлення і перенесення металу оцінювали за статистично обробленими осцилограмами струму і напруги, отриманими за допомогою електронного *USB*-осцилографа.

Вимірювання геометричних параметрів наплавленого валика, дослідження структури і твердості наплавленого металу здійснювали на мікро- і макрошліфах, визначення коефіцієнта наплавлення проводили за загальноприйнятою методикою.

В рамках представленої роботи досліджується технологія наплавлення сталевих деталей дротами з низьковуглецевої і корозійностійкої сталі.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше науково обґрунтована та експериментально підтверджена можливість керування продуктивністю наплавлення та геометрією наплавленого валика при автоматичному наплавленні під флюсом шляхом імпульсного механічного впливу на електродний дріт, внаслідок чого збуджуються позаосьові високочастотні коливання торця електроду (ВКЕ), які перевищують природну частоту при крапельному переносі (15...20 Гц) та обумовлюють примусовий перехід до дрібнокрапельного. Гранична частота коливань для керування продуктивністю наплавлення дротом  $\varnothing$  2 мм становить 1000 Гц, для керування геометрією валика - до 600 Гц.

2. Вперше показано, що при ВКЕ керований відрив краплі з торця електродного дроту  $\varnothing$  2 мм здійснюється в результаті дії двох силових механізмів: інтегрального силового балансу (ІСБ), який реалізується при амплітуді коливань  $A_k > 2$  мм і частоти  $20 < f_k < 500$  Гц та гравітаційно-капілярного розпилення (ГКР), який реалізується при  $0,2 < A_k < 2,0$  мм і  $f_k > 100$  Гц. У діапазоні частот  $100 < f_k < 500$  Гц обидва механізми діють спільно з переважним впливом механізму ІСБ, що забезпечує комбіноване керування продуктивністю розплавлення електродного дроту та геометрією наплавленого валика.

3. Розрахунковим шляхом, з використанням розроблених математичних моделей, встановлено, що для ініціювання процесу подрібнення крапель та збільшення ефективності передачі тепла від дуги до електроду при струмі 200 А під флюсом ОСЦ-45 на торці сталевих електродного дроту  $\varnothing$  2 мм потрібно утримувати рідкометалевий шар товщиною 0,3...0,6 мм, яку забезпечують коливання з мінімальною частотою  $f_k = 75$  Гц. Із зростанням сили струму товщина рідкометалевого шару та частота коливань пропорційно зростають.

4. Експериментально встановлено, що найбільші зміни геометрії наплавленого валика відповідають коливанням електрода з частотою близькою до першого резонансу незалежно від напрямку коливань - вздовж або уперек валика. При частоті першого резонансу  $f_k \approx 500$  Гц для електрода  $\varnothing$  2 мм глибина проплавлення знижується на 65 %, частка участі основного металу в наплавленому - на 45%. Повздовжні коливання збільшують висоту валика на 80%, а ширину зменшують на 35 %. Коливання у поперечному напрямку, не впливаючи на висоту валика, збільшують його ширину на 25 %.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.** Обґрунтованість отриманих результатів підтверджується ретельним аналізом наукових робіт у цій галузі. Достовірність результатів досліджень забезпечена коректністю використаних методик, задовільним збігом результатів розрахунків і експериментальних досліджень, достатньою точністю експериментальних даних, їх математично-статистичною обробкою, а також впровадженням розробок у виробництво.

**Наукова значущість роботи** полягає в розкритті механізму впливу ВКЕ на характер переносу металу, технологічні показники процесу, властивості наплавленого шару при АНФ конструкційних сталей.

**Практична значущість отриманих результатів.** Отримані у дисертаційній роботі результати дали змогу розробити технологію автоматичного наплавлення з ВКЕ деталей суднових машин та механізмів конструкційними сталями, яка забезпечує при використанні електродного дроту  $\varnothing$  2 мм та режимів, регламентованих РД 212.0080-87, підвищення продуктивності процесу наплавлення на 46 %, зниження глибини проплавлення на 65 %, частки участі основного металу в наплавленому шарі на 45 %, що дозволяє зменшити кількість проходів, необхідних для отримання сприятливого хімічного складу і структури наплавленого металу або його нормованої твердості.

Розроблена розрахунково-експериментальна методика, яка встановлює зв'язок між параметрами режиму наплавлення, параметрами високочастотних коливань електрода, продуктивністю плавлення електродного дроту і геометрією наплавленого валика, дозволяє з достатньою точністю прогнозувати технологічні показники процесу наплавлення, розширюючи тим самим можливості технології однодугового автоматичного наплавлення під флюсом без зміни енергетичних параметрів режиму.

Розроблені спосіб і пристрій для наплавлення з вібраційним переміщенням торця електродного дроту, захищені патентом України на винахід, забезпечують реалізацію технології автоматичного наплавлення конструкційних сталей з ВКЕ при використанні серійного зварювального устаткування. Розроблена технологія засвідчена протоколом підтвердження відповідності технологічного процесу наплавлення стандарту ДСТУ ISO 15614-1:2010.

**Впровадження результатів роботи.** Результати роботи впроваджені на підприємстві ТОВ «Смарт-Меритайм груп» (м. Херсон), ТОВ «Чорноморська яхтова верф» (м. Миколаїв), НПФ АМІТІ (м. Миколаїв), а також у навчальний процес Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

**Особистий внесок автора** полягає у постановці задач, проведенні теоретичних досліджень, розробці розрахунково-експериментальної методики і математичної моделі, що дозволяють прогнозувати продуктивність плавлення електрода, масу крапель, які відриваються з торця електрода та переносяться через дугу, а також геометрію наплавленого шару в залежності від параметрів режиму наплавлення і параметрів ВКЕ.

За безпосередньою участю автора виконані експериментальні дослідження і проведена обробка та аналіз результатів впливу ВКЕ на технологічні показники процесу АНФ, а також розроблені та впроваджені у виробництво технологія наплавлення деталей суднових механізмів з високочастотними коливаннями електродного дроту.

Автору також належать загальні висновки дисертаційної роботи і положення, які виносяться на захист.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 17 всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 50-річчю кафедри зварювального виробництва НУК і 75-річчю Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» 14-17 жовтня 2009 р., м. Миколаїв; 1-й Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 90-річчю Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», 15 жовтня 2010 р., м. Миколаїв; 2-й Міжнародній науково-технічній конференції «Зварювальне виробництво в машинобудуванні: перспективи розвитку», 5-8 жовтня 2010 р., м. Краматорськ; Міжнародній науково-методичній конференції «Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій, підготовка кадрів», 6-8 вересня 2011 р., м. Маріуполь; 2-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», 5-7 жовтня 2011 р., м. Миколаїв; 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Зварювальне виробництво в машинобудуванні: перспективи розвитку», 2-5 жовтня 2012 р., м. Краматорськ; 4-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», 5-7 жовтня 2013 р., м. Миколаїв; 7-й Науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», 22-24 травня 2013 р., смт. Ворзель, Київська обл.; Міжнародній конференції «Зварювання та споріднені технології - сьогодення і майбутнє», 25-26 листопада 2013 р., м. Київ; 8-й Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», 20-22 травня 2015 р., смт. Ворзель, Київська обл.; 75-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», присвяченій 85-річчю заснування Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 14-15 травня 2015 р., м. Дніпропетровськ; Всеукраїнській науково - практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу», 15-18 вересня 2015 р., м. Херсон та ін.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 11 статей у спеціалізованих наукових виданнях, які входять до Переліку ДАК України, у тому числі одна в зарубіжному виданні, 17 тез доповідей у збірниках науково-технічних конференцій (7 міжнародних та 10 всеукраїнських), отримано 5 патентів України на корисну модель та 2 патенти України на винаходи.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаної літератури, який налічує 103 позиції. Повний обсяг дисертації становить 190 сторінок, у тому числі 110 сторінок основного тексту, містить 15 таблиць, 39 ілюстрацій і 7 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкрито суть і зміст проблеми, обґрунтована науково-технічна актуальність дослідження. Наведено загальну характеристику роботи.

Сформульовані мета і завдання досліджень, обґрунтовано вибір об'єкту і предмету досліджень. Описано методи дослідження. Сформульована наукова новизна і практична цінність отриманих результатів. Обґрунтовано достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи, публікації, структуру та обсяг дисертації.

**У першому розділі** виконаний аналітичний огляд літературних джерел про сучасний стан та перспективні розробки в області технології АНФ конструкційних сталей, а також аналіз методів вдосконалення технології однодугового АНФ і факторів, що сприяють підвищенню ефективності процесу наплавлення.

Аналіз показав, що існуючі способи АНФ характеризуються рядом недоліків і обмежень: 1) відсутня можливість активного впливу на процес переносу металу через дугу; 2) керування геометрією і властивостями наплавленого шару можливе тільки за рахунок зміни параметрів режиму; 3) технологічні можливості способів обмежені вузьким діапазоном допустимих параметрів режиму.

Одним із способів вдосконалення технології АНФ, зокрема за рахунок керування характером переносу металу, є вплив на електродний дріт поперечними відносно до осі електрода (позаосьовими) механічними імпульсними переміщеннями. Створювані при цьому високочастотні згинальні коливання дроту на ділянці вильоту забезпечують примусове видалення крапель металу з торця електрода і керування характером переносу металу з метою формування наплавленого шару з заданими геометричними параметрами і структурою.

Сформульовані висновки щодо розділу і завдання дослідження.

**У другому розділі** описана апаратура і наведена методика експериментального дослідження залежності між амплітудою і частотою високочастотних позаосьових коливань, впливу коливань електрода на процеси формування і відриву крапель, стабільність процесу наплавлення, геометричні параметри наплавленого шару, твердість, структуру металу, продуктивність наплавлення.

Виконана розробка пристрою (генератора) для створення позаосьових високочастотних коливань електродного дроту та експериментального стенду, що складається зі зварювального комплексу АСТ 1000 (інверторне джерело живлення і зварювальний трактор) і генератора високочастотних імпульсних переміщень електрода (рис. 1).

Стенд оснащений електронним USB осцилографом і ПК для запису і обробки експериментальних даних.

Для дослідження залежності між амплітудою і частотою коливань автором розроблена методика, заснована на вимірюванні сліду, що залишається на спеціальному зразку, загостреним торцем електродного дроту, закріпленого в струмопідводі зварювальної головки.

Вплив позаосьових високочастотних коливань на характер переносу крапель вивчали на розробленій автором лабораторній установці з відеозйомкою процесу формування та відриву крапель модельної рідини з

торця сталевій трубки, що коливається із заданими параметрами - амплітудою і частотою.

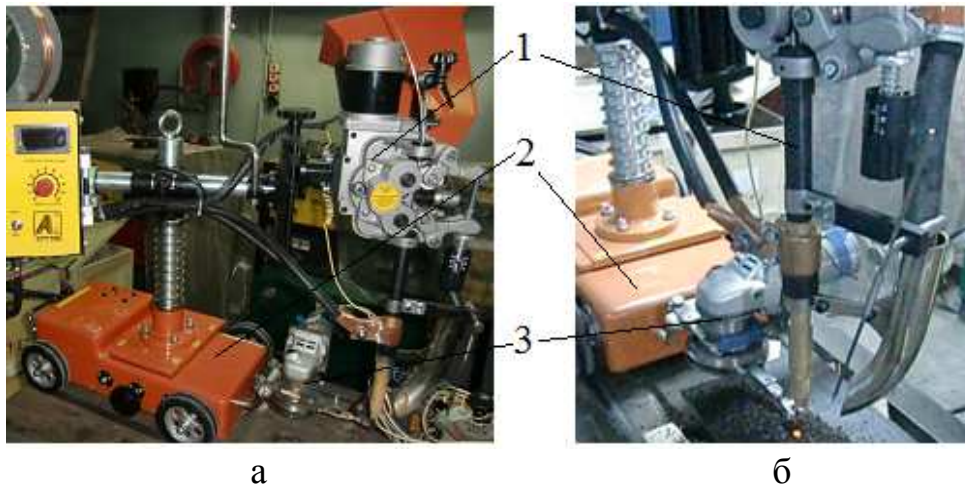


Рис. 1. Установка на зварювальному тракторі генератора імпульсних переміщень електродного дроту для створення позаосьових поперечних - а та поздовжніх - б коливань електрода 1 - зварювальна головка; 2 - каретка трактора; 3 – генератор

Хімічний аналіз наплавленого металу, вимірювання твердості і металографічні дослідження виконані з використанням стандартних методик.

**У третьому розділі** сформульовано теоретичні засади реалізації процесу автоматичного наплавлення низьковуглецевих конструкційних сталей під флюсом з ВКЕ.

На основі запропонованої автором фізичної моделі процесу відриву краплі з торця електрода під впливом високочастотних коливань розроблена математична модель, що зв'язує параметри коливань (частоту і амплітуду) з умовами і характером переносу металу через дугу за наявності або відсутності резонансу.

Сутність фізичної моделі керування характером переносу металу під впливом високочастотних коливань торця електрода полягає в наступному.

У результаті імпульсних переміщень електродного дроту, створюваних механічним генератором, і дії сил інерції, обумовлених пружними властивостями електродного дроту, останній здійснює високочастотні коливання, під впливом яких рідкометалевий шар видаляється з торця електрода у вигляді крапель, розміри яких визначаються параметрами керуючого впливу (КВ). Математична модель покладена в основу розробки розрахунково-експериментальної методики визначення параметрів КВ та оцінки їх впливу на продуктивність плавлення електродного дроту, геометрію наплавленого валика і структуру наплавленого шару з метою розширення технологічних можливостей АНФ.

Розроблена математична модель дозволяє встановити зв'язок між параметрами КВ - амплітудою і частотою стосовно до типових конструкцій струмопідводу (рис. 2, а, б). Електродний дріт на ділянці вильоту розглядається як математичний маятник зі стрижнем постійного перерізу і рівномірно розподіленою по його довжині масою.

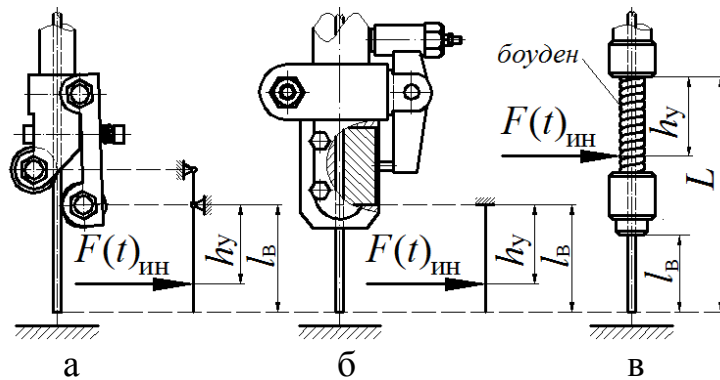


Рис. 2 Конструкції та відповідні розрахункові схеми струмопідводів з безперервною - а і з дискретною - б, в компенсацією зносу:  $l_B$  – виліт електрода,  $h_y$  – відстань від струмопідводу до точки прикладення КВ,  $F(t)_{ин}$  - сила, зумовлена дією механічного генератора,  $L$  – довжина струмопідводу розробленої конструкції.

Значення амплітуди коливань такого маятника (торця електрода) розраховується підсумовуванням її складових (табл. 1).

Таблиця 1

Складові амплітуди коливань торця електрода

|                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Тип розрахункової схеми<br>(умови закріплення<br>електрода)                          | Шарнірне (рис. 2,а)                                                                                                                                                                                                               | Жорстке<br>(рис. 2, б, в)                                               |
| Складові розрахункові<br>амплітуди коливань торця<br>електрода                       |                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                         |
| Повна амплітуда                                                                      | $A_K = A_{By}l_B/h_y + A_p + 2A_{ин \text{ ЭП}}$                                                                                                                                                                                  |                                                                         |
| Складова зумовлена<br>імпульсною дією генератора                                     | $A_{By} = 0,5[(D_p + d_p) - ((D_p + d_p)^2 - d_p^2)^{0,5}]$                                                                                                                                                                       |                                                                         |
| Складова зумовлена явищем<br>резонансу                                               | $A_p = A_{By}/(1 - (f_K/f_p)^2)$                                                                                                                                                                                                  |                                                                         |
| Складова зумовлена<br>інерційним переміщенням<br>електрода під дією сил<br>пружності | $A_{ин \text{ ЭП}} = \frac{2\rho S_{\text{э}} A_{By} f_K^2}{24EJ} \left[ l_B^2 b_1 (l_B + b_1) - \frac{l_B^2 (l_B + b_1)^3}{b_1} + \right. \\ \left. + 2 \left( \frac{2l_B^2}{b_1} + l_B \right) l_B^3 - \frac{l_B^4}{2} \right]$ | $A_{ин \text{ ЭП}} = \frac{2\rho S_{\text{э}} A_{By} f_K^2 l_B^4}{8EJ}$ |

У табл.1 прийняті позначення:  $D_p$ ,  $d_p$  – діаметр ролика ударника і діаметр задавального ролика генератора відповідно,  $f_k$ ,  $f_p$  – частота коливань, створювана генератором, і резонансна частота коливань електрода у струмопідводі відповідно,  $f_{pi} = \frac{d_e}{8\pi} \left( \frac{E}{\rho} \right)^{0,5} \left( \frac{p_i}{l_B} \right)^2$ . Тут  $d_e$  – діаметр електрода,  $E$  – модуль пружності,  $\rho$  – густина ОМ,  $k$  - функція Кривої;  $p_i = kl_B$  - корені

частотного рівняння, зумовлені характером закріплення кінця стрижня, що коливається;  $S_3$  – площа поперечного перерізу електрода,  $J$  – момент інерції поперечного перерізу електрода,  $b_1$  – крок установки напрямних роликів струмопідводу (рис. 1, а).

Розрахунки за формулами табл.1 та їх експериментальна перевірка показали, що зі збільшенням частоти коливань зростає їх амплітуда, особливо різко в інтервалі частот, близьких до резонансних. Порівняння результатів розрахунку з дослідними даними показало, що розбіжність не перевищує 5 % в інтервалі міжрезонансних частот і до 15% - в областях резонансів. Так, для сталевого електродного дроту Св-08А діаметром 2 мм і  $l_b = 45$  мм при збільшенні частоти  $f_k$  с 300 Гц до 900 Гц амплітуда  $A_k$  коливань торця електрода зростає з 1 до 5 мм. В області резонансу ( $f_p \approx 500$  Гц) амплітуда досягає  $A_k \approx 4$  мм, що перевищує розрахункову при відсутності резонансу в 4 рази.

Однак недолік методу регулювання амплітуди коливань за рахунок явища резонансу - дискретна зміна резонансних частот, тому застосування такого методу слід обмежити при використанні стандартних конструкцій струмопідводів (див. рис. 1, а, б) малим вильотом ( $l_b \leq 30 d_e$ ) в діапазоні частот  $f_k > 100$  Гц. Застосування струмопідводу розробленої конструкції (див. рис. 3.7, в) з еластичною вставкою (боуден) і збільшеною довжиною  $L$  дозволяє реалізувати резонанс при частоті  $f_k < 100$  Гц і підвищити амплітуду без порушення стабільності процесу. Крім того, струмопідвод такої конструкції за рахунок збільшеної маси і довжини знижує чутливість резонансної частоти до явищ, що супроводжують процес наплавлення - налипання бризок на струмопідвод і електрод, зміна довжини дуги тощо.

Встановити взаємозв'язок між параметрами КВ (частотою і амплітудою) і масою крапель, що видаляються з торця електрода, з метою керування характером їх переноса дозволяє розроблена математична модель на основі балансу сил, що діють на краплю, з урахуванням впливу механічного генератора.

Умова відриву краплі в цьому випадку має вигляд:

$$\sqrt{F(t)_{\text{ин}}^2 + \left(\sum F_a - \sum F_p\right)^2} \geq F_{\text{п.н}} \quad (1)$$

При перевищенні сил  $\sum F_a = F_{\text{пинч}} + G$ , що прагнуть відірвати краплю, над силами  $\sum F_p = P_b + P_p$ , що прагнуть її утримати, можливе керування характером переносу металу. Тут  $F_{\text{пинч}}$  – сила ПІНЧ-ефекту,  $G$  – вага краплі,  $P_e$  – сила тиску електронів,  $P_p$  – сила тиску парів,  $F_{\text{п.н}}$  – сила поверхневого натягу.

Гарантований відрив краплі буде забезпечений, коли кінетична енергія механічних коливань електрода перевищить вільну енергію поверхні краплі, що утворюється з РМШ на торці електрода. Рівняння для розрахунку частоти ВКЕ, яка приводить до відриву крапель з торця електрода:

$$f_{\text{min1,2}} = \sqrt{\frac{2\sigma S_3 K_\phi \pm \sqrt{(2\sigma S_3 K_\phi)^2 - (k_1 A_k)^2 (\sum F_a - \sum F_p)^2}}{m_k (k_1 A_k)^2}}, \quad (2)$$

де  $m_k$  – маса краплі,  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу,  $K_\phi$  – поправковий коефіцієнт, що залежить від співвідношення діаметрів краплі і електрода,  $k_1=0,5$  - коефіцієнт, що враховує конструкцію генератора.

Характер переносу металу змінюється під впливом високочастотних коливань електрода, що збільшують швидкість його плавлення. Виходячи з припущення, що кожен імпульс КВ призводить до відділення з торця електродного дроту однієї краплі з масою визначеною товщиною РМШ, отримано і розв'язане рівняння, що дозволяє розрахувати максимальні значення частоти ВКЕ:

$$f_{max1,2} = K \frac{G_{пл}}{3600m_k} + \frac{\pi\eta d_э^4}{128m_k^2} \pm \frac{\sqrt{\pi\eta d_э^2}}{16m_k^2} \sqrt{K \frac{G_{пл}m_k}{900} + \frac{\pi\eta d_э^4}{64}} \quad (3)$$

де  $G_{пл}$  – продуктивність плавлення електрода,  $K$  – коефіцієнт, що враховує збільшення продуктивності плавлення електрода за рахунок підвищення ефективності розігріву електрода дугою,  $\eta$  – динамічна в'язкість розплавленого металу.

Рекомендований діапазон частот ВКЕ, в якому на торці електрода утримується РМШ мінімально допустимої товщини і забезпечується керування характером переносу металу, обмежується значеннями, розрахованими за рівняннями (2) і (3). Залежно від співвідношення частоти коливань і маси відокремлюваних з торця електрода крапель, керування характером переносу металу може бути досягнуто реалізацією двох силових механізмів: 1) механізму інтегрального силового балансу (ІСБ), тобто в результаті взаємодії сил, що діють на краплю як на єдине ціле, і 2) механізму гравітаційно-капілярного розпилення (ГКР), при якому краплі рідини зриваються з гребенів стоячих капілярних хвиль.

Межі дії зазначених механізмів наведені на рис.3.

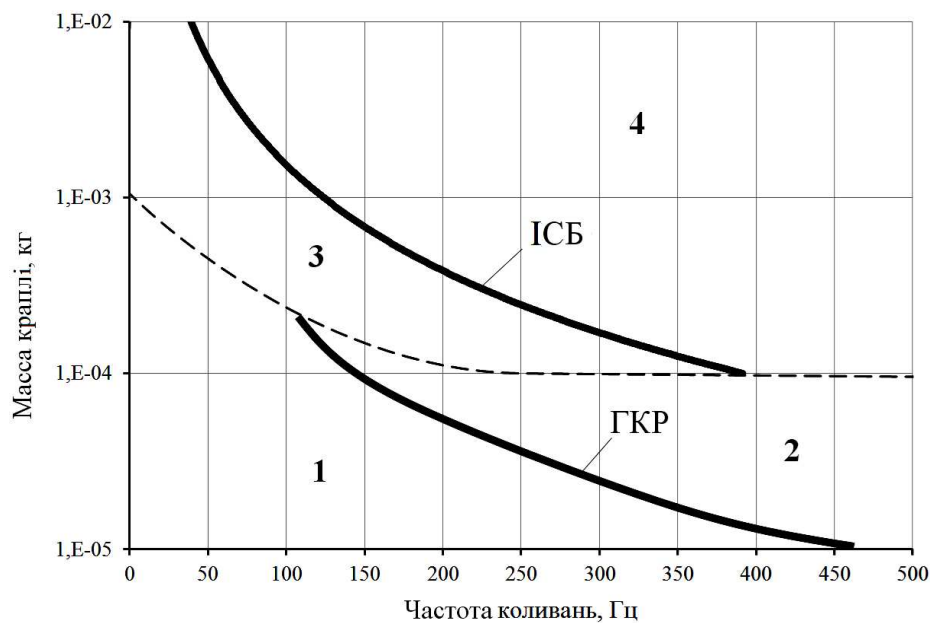


Рис. 3. Розрахункові діапазони розмірів крапель при керуванні характером переносу металу залежно від частоти коливань електрода ( $d_э=2$  мм;  $I_{зв}=200$  А;)

*Область 1* - керування характером переносу металу за рахунок позаосьових високочастотних коливань електрода неможливо.

*Область 2* - краплі відокремлюються за рахунок механізму ГКР. Межі цієї області розширюються зі зростанням амплітуди коливань і швидкості плавлення електрода.

*Область 3* - відділення крапель відбувається нерівномірно і лише за рахунок ГКР.

*Область 4* - краплі відокремлюються за рахунок ІСБ.

Крупнокрапельне перенесення (маса краплі більше 0,1 г) має місце при реалізації механізму ІСБ, при цьому амплітуда коливань торця електрода повинна перевищувати діаметр електродного дроту.

Для електрода  $\varnothing$  2 мм механізм ІСБ забезпечує відрив краплі при  $A_k > 2$  мм і  $20 < f_k < 500$  Гц; механізм ГКР реалізується при  $0,2 < A_k < 2,0$  мм і  $f_k > 100$  Гц; у діапазоні частот  $100 < f_k < 500$  Гц обидва механізми діють спільно з переважним впливом механізму ІСБ.

Дрібнокрапельне перенесення можливе при товщині РМШ  $h_c \leq 0,1 d_e$  і реалізується переважно з використанням механізму ГКР. У цьому випадку достатня амплітуда коливань менша за діаметр електрода.

Зменшення товщини РМШ під впливом високочастотних коливань, крім подрібнення крапель металу, сприяє підвищенню ефективності розплавлення електрода. Для цього на торці електродного дроту потрібно утримувати рідкометалевий шар мінімальної товщини, достатньої для ініціювання процесу подрібнення крапель та збільшення ефективності передачі тепла від дуги до електрода. Граничні співвідношення між параметрами ВКЕ, які при фіксованих параметрах режиму наплавлення забезпечують керування товщиною рідкометалевого шару, становлять:  $f_k \geq f_{жмс}$ ;  $A_k < d_e$ , ( $f_{жмс}$  – частота коливань рідкометалевого шару). Розрахунки показують, що при автоматичному наплавленні сталевим електродом  $\varnothing$  2 мм струмом 200А необхідна товщина рідкометалевого шару становить 0,3...0,6 мм і утримується при найбільшій частоті коливань  $f_k = 75$  Гц. Із зростанням сили струму товщина рідкометалевого шару та частота коливань пропорційно зростають.

Використовуючи розроблену модель процесу передачі тепла від дуги до електрода, з урахуванням зменшення товщини РМШ при ВКЕ, отримана залежність для визначення приросту маси розплавленого електродного металу:

$$\Delta G_{пл} = \frac{c(T_k - T_{пл})\pi r_{ст}^2}{(q_{пл} + q_n(T_{пл} - T_0))(1 + Q_k)h_c}, \quad (4)$$

де  $T_k$ ,  $T_0$  – середня температура крапель і температура навколишнього середовища відповідно,  $q_{пл}$ ,  $q_n$  - питома теплота плавлення і теплоємність рідкого металу електрода відповідно,  $Q_k$  - теплова потужність, що витрачається на кипіння,  $r_{ст}$  – ефективний радіус стовпа дуги,  $c$  – коефіцієнт теплопровідності.

При наплавленні під флюсом ОСЦ-45 сталевим електродом  $\varnothing$  2 мм з ВКЕ частотою  $f_k = 300$  Гц при силі струму 200 А приріст маси розплавленого електродного металу становить  $\Delta G_{пл} = 2$  кг/год, що підтверджується результатами експериментальних досліджень, наведених у розд. 4. Поряд з підвищенням продуктивності плавлення електрода високочастотні коливання забезпечують керований вплив на геометричні параметри наплавленого шару: глибину проплавлення, висоту і ширину наплавленого валика, ЧОМ.

Регулювання глибини проплавлення і ЧОМ при наплавленні з ВКЕ обумовлено зміною схеми джерела нагрівання залежно від лінійної швидкості переміщення дуги. Значення амплітуди коливань торця електродного дроту, яке визначає вибір схеми джерела нагрівання для оцінки впливу на геометрію зони проплавлення, має бути таким:

$$A_k > \sqrt{2 \frac{Pe}{f_k}} m, \quad (5)$$

де  $m$  – коефіцієнт температуропровідності основного металу,

$Pe = \frac{Vl}{m}$  критерій (число) Пекле. Тут  $V$  – швидкість переміщення джерела нагріву в напрямку наплавлення,  $l$  – характерний лінійний розмір джерела нагріву, прийнятий рівним  $A_k$ .

Дузі, що коливається разом електродом поперек напрямку наплавлення з амплітудою більше 1 мм і частотою більше 10 Гц, відповідають значення  $Pe \geq 10$ , і її можна розглядати як розподілене швидкорухоме джерело тепла з лінійним розміром, рівним амплітуді коливань. У цьому випадку, розрахунками та експериментально підтверджений ефект зменшення глибини і площі проплавлення внаслідок розосередження теплового потоку під впливом ВКЕ. Так, при наплавленні на низьковуглецеву сталь електродом діаметром 2 мм, який коливається з частотою 140 Гц і амплітудою (шириною смуги нагріву) 30 мм, розрахункова глибина проплавлення зменшується з 2,2 до 0,8 мм (на 60 %), а ЧОМ зменшується з 0,30 до 0,17 (на 40 %) порівняно з наплавленням без коливань.

Для вибору ефективного сполучення параметрів (частоти  $f_k$  і амплітуди  $A_k$ ) для керування характером переносу металу і геометрією зони проплавлення розроблено розрахункову діаграму (рис. 4), за допомогою якої встановлені характерні області впливу на об'єкти керування.

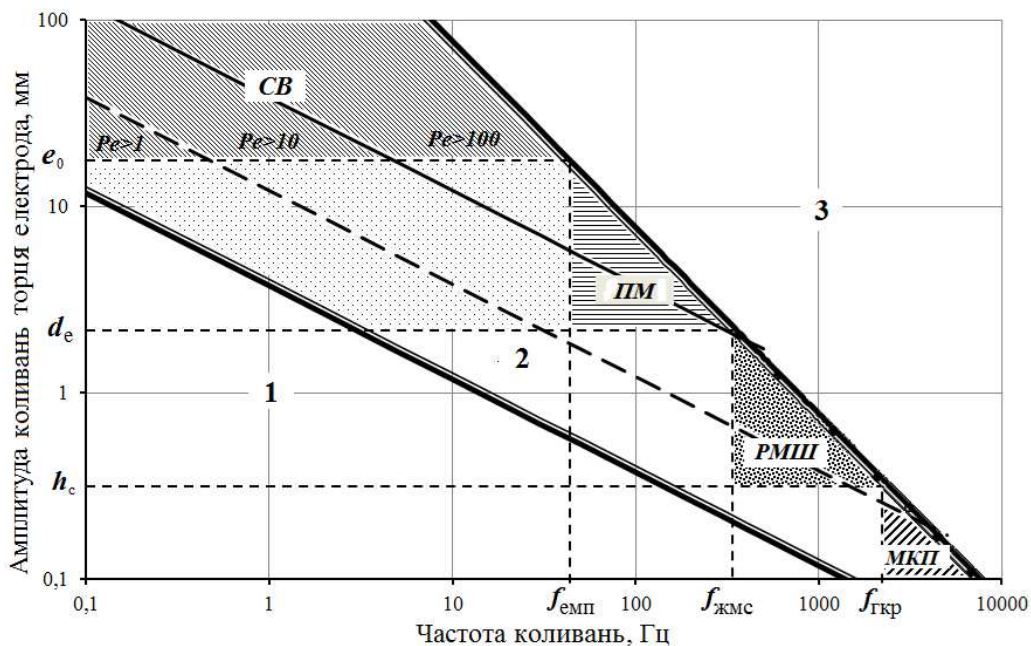


Рис.4. Діаграма для вибору параметрів керуючого впливу при позаосьових коливаннях торця електрода ( $d_e = 2$  мм)

*Область 1* - керування характером переносу металу відсутнє, геометрія проплавлення визначається шляхом впливу на траєкторію руху дуги.

*Область 2* - реалізується комбіноване керування геометрією проплавлення і перенесенням металу в залежності від співвідношення між частотою і амплітудою коливань:

а)  $f_k \geq f_{жмс}; A_k < d_e$  - керування товщиною РМШ на торці електрода;

б)  $f_k \geq f_{гкр}; A_k < d_e$  - керування мікрокрапельним перенесенням металу (МКП) при реалізації механізму ГКР;

в)  $f_k \geq f_{епм}, d_e < A_k < e_0$  - керування характером переносу металу (ПМ) і продуктивністю плавлення електрода ( $e_0, L_b$  - ширина і довжина зварювальної ванни відповідно при відсутності коливань);

г)  $f_k \leq f_{епм}, e_0 < A_k < L_b$  - керування геометрією проплавлення.

*Область 3* - порушення стабільності горіння дуги і погіршення якості формування наплавленого шару внаслідок надмірно високій швидкості позаосьових переміщень електрода.

**У четвертому розділі** представлені результати експериментальних досліджень впливу параметрів ВКЕ на характеристики дугового процесу та показники технології АНФ.

Дослідження впливу ВКЕ на стабільність дугового процесу і характер переносу металу проводили шляхом аналізу статистично оброблених осцилограм струму і напруги дуги, отриманих за допомогою електронного USB-осцилографа.

Встановлено, що при АНФ з ВКЕ стабільність дугового процесу залишається високою. Про зміну характеру переносу металу свідчить зміна частотних спектрів напруги дуги (рис. 5).

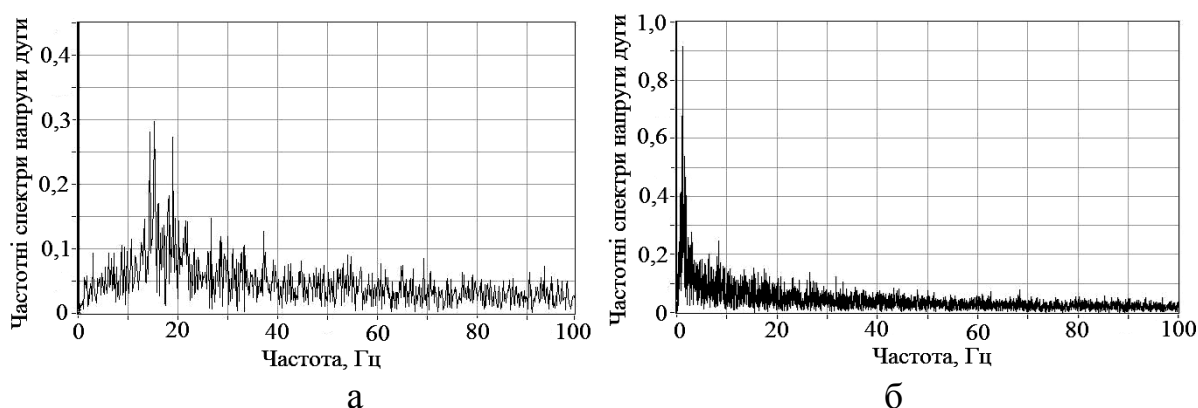


Рис. 5. Частотні спектри напруги дуги при наплавленні: а - без коливань електрода; б - з ВКЕ частотою  $f_k = 320$  Гц

Так, коливання напруги дуги з частотою  $f = 15 \dots 20$  Гц (рис. 5, а), характерні для природного крупнокрапельного переносу металу, зникають при наплавленні з ВКЕ, що пояснюється зниженням впливу крапель, подрібнених ВКЕ, на напругу і силу струму в дузі (рис. 5, б).

Про зміну характеру переносу металу під впливом ВКЕ свідчать і результати експериментальних досліджень з використанням модельної рідини. Підтверджено теоретичне положення про те, що в міру збільшення частоти і

амплітуди коливань товщина РМШ зменшується, а краплі подрібнюються. Так, за відсутності коливань діаметр крапель складав 3 ... 4 мм, а при коливаннях з частотою 500 Гц і амплітуді 1 ... 2 мм - 0,5 ... 1,0 мм.

Експериментально доведений також позитивний вплив ВКЕ на технологічні показники наплавлювального процесу. Коефіцієнт плавлення електрода зростає пропорційно частоті коливань (табл. 2), досягаючи в міжрезонансному інтервалі величини 22,6 г/А год (приріст становить  $\Delta K_{\text{п}} = +40\%$ ).

Таблиця 2

Залежність коефіцієнта наплавлення від частоти ВКЕ

| Частота коливань, Гц            | 0                        | 250                      | 305                      | 320                      |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Коефіцієнт наплавлення, г/А год | $\frac{15,0-15,2}{15,0}$ | $\frac{17,9-18,2}{18,2}$ | $\frac{19,6-20,0}{19,7}$ | $\frac{22,4-22,8}{22,6}$ |

Дослідження впливу ВКЕ на геометричні розміри наплавленого валика проводили шляхом аналізу поперечних макрошліфів (рис.6).

Показана пропорційна залежність між частотою коливань і геометрією валика. Оскільки зі збільшенням частоти зростає амплітуда коливань, то знижуються теплова і силова дія дуги і крапель електродного металу на зварювальну ванну, внаслідок чого глибина проплавлення основного металу і ЧОМ зменшуються.

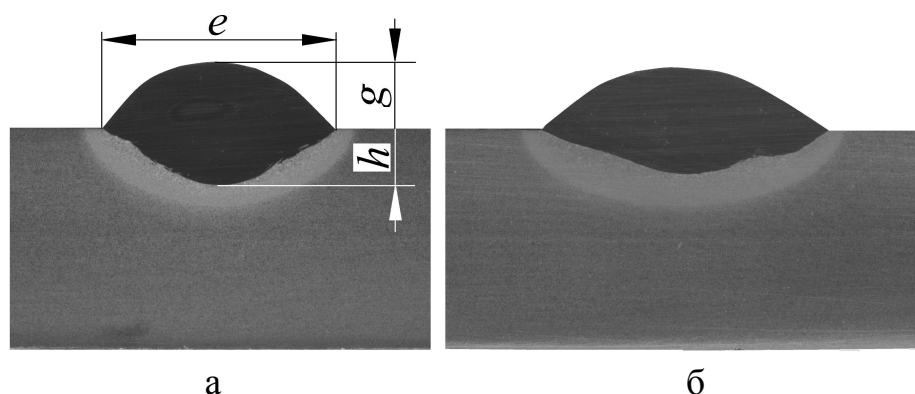


Рис. 6. Геометрія валиків, наплавлених дротом Св-06Х19Н9Т: **а** - без коливання електрода; **б** - з позаосьовими поперечними коливаннями частотою  $f_k = 140$  Гц

Встановлено, що збільшення частоти коливань торця електродного дроту в різній мірі впливає на зміну геометрії наплавленого валика залежно від інтервалу частоти – у резонансної або міжрезонансній області. У резонансної області зміни досягають  $\Delta g = +80\%$ ;  $\Delta e = -35\%$ ;  $\Delta h = -65\%$ ; у міжрезонансній -  $\Delta g = +15\%$ ;  $\Delta e = -20\%$ ;  $\Delta h = -15\%$ .

Для прогнозування геометрії валика при наплавленні з ВКЕ, а також для вибору параметрів режиму коливань з метою керування геометрією наплавленого шару результати експериментальних досліджень статистично оброблені і складені регресійні рівняння:

$$\begin{aligned} e &= 0,07I_{\text{св}} + 0,0004f_{\text{к}} + 0,342U_{\text{д}} - 0,069I_{\text{в}} - 2,22A_{\text{к}} - 8,39, \\ g &= 0,032I_{\text{св}} - 0,0002f_{\text{к}} - 0,083U_{\text{д}} + 0,004I_{\text{в}} + 0,621A_{\text{к}} - 2,21, \\ h &= 0,003I_{\text{св}} + 0,0002f_{\text{к}} + 0,037U_{\text{д}} - 0,017I_{\text{в}} - 0,709A_{\text{к}} + 2,17, \end{aligned} \quad (6)$$

Під час проведення досліджень впливу ВКЕ на геометрію наплавленого валика оцінювали також зовнішній вигляд наплавленого шару, структуру і хімічний склад металу в зоні наплавлення.

Основні результати цих досліджень зводяться до наступного:

- 1) при одношаровому наплавленні на конструкційну сталь легованим дротом в наплавленому металі підвищується вміст легуючих елементів внаслідок меншого розбавлення наплавленого шару металом основи. Так, при наплавленні з ВКЕ на сталь ВСтЗсп зварювальним дротом Св-06Х19Н9Т під флюсом 48-ОФ-6 вміст у наплавленому металі основних легуючих елементів - хрому і нікелю підвищується на 27 % і 14 % відповідно порівняно з наплавленням без коливань;
- 2) при наплавленні з ВКЕ, поряд зі збереженням високої якості формування наплавленого шару, частка участі основного металу при 30% -му перекритті валиків знижується з 0,25 ( $f_{\text{к}} = 0$ ) до 0,14 ( $f_{\text{к}} = 300$  Гц), що є позитивним фактором економії зварювальних матеріалів;
- 3) при двошаровому наплавленні зварювальним дротом Св-08А під флюсом АНК-18 внаслідок зниження ЧОМ у першому шарі твердість наплавленого металу підвищується на 50 НВ<sub>10</sub> в порівнянні з наплавленням, виконаним без коливань, досягаючи 300 НВ<sub>10</sub>. При наплавленні за стандартною технологією така твердість досягається тільки у другому шарі;
- 4) при наплавленні на режимах з малою погонною енергією ( $q_{\text{п}} = 9,2 \dots 10,4$  кДж/см) високочастотні коливання електродного дроту не чинять негативного впливу на умови формування наплавленого шару і його структуру.

Результати проведених експериментальних досліджень показали, що розроблена технологія автоматичного наплавлення конструкційних сталей під флюсом з ВКЕ задовольняє вимогам РД 212.0080-87 і рекомендується до використання при виготовленні і ремонті суднових механізмів і пристроїв, а також деталей механізмів підйомно-транспортної техніки портів і гідротехнічних споруд.

**У п'ятому розділі** наведено результати дослідно-промислового впровадження технології однодугового АНФ конструкційних сталей з ВКЕ. На підставі математичної моделі створена інженерна методика розрахунку і вибору параметрів режиму АНФ з позаосьовими ВКЕ. Для скорочення трудомісткості робіт щодо вибору параметрів ВКЕ і показників технології залежно від цілей наплавлення розроблена номограма, що пов'язує напругу, яка подається на привід генератора імпульсних високочастотних переміщень електрода, з частотою і амплітудою ВКЕ і далі з геометрією наплавлюваного валика і продуктивністю процесу наплавлення. Сформульовано технологічні вимоги до флюсів, які використовуються при АНФ з ВКЕ і технічні умови використання механічного генератора. Розроблено рекомендації щодо застосування технології АНФ з ВКЕ при ремонті деталей суднових механізмів і машин.

Розроблена технологія ремонтного наплавлення суднових валів впроваджена на суднобудівних підприємствах Півдня України. На ТОВ

«Смарт-Меритайм груп» (м. Херсон) дослідне наплавлення з ВКЕ на вал діаметром 300 мм із сталі 30 корозіонностійкого шару показало підвищення вмісту легуючих елементів в наплавленому шарі і скорочення загальної тривалості технологічного процесу на 20% порівняно з базовою технологією. На підприємстві ТОВ «Чорноморська яхтова верф» (м. Миколаїв) при багатопрохідному відновлювальному наплавленні валу діаметром 200 мм зі сталі 20, внаслідок зниження частки участі основного металу в першому шарі з 0,25 до 0,14, наплавлення всіх шарів виконане без переналагодження режиму, що є позитивним фактором зниження непродуктивних витрат часу при багат шаровому наплавленні. Розроблена технологія засвідчена протоколом підтвердження відповідності технологічного процесу наплавлення стандарту ДСТУ ISO 15614-1:2010.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА ЗАГАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

У роботі поставлена і вирішена важлива науково-практична задача розширення технологічних можливостей та підвищення продуктивності одноелектродного автоматичного наплавлення під флюсом конструкційних сталей на основі керування характером переносу металу через дугу під впливом високочастотних механічних коливань електродного дроту. Отримані наступні результати:

1. На підставі розкритого механізму впливу високочастотних коливань електродного дроту (ВКЕ) на продуктивність плавлення електрода, стабільність дугового процесу і характер переносу металу, а також на геометрію і властивості наплавленого шару розширені технологічні можливості одноелектродного автоматичного наплавлення під флюсом конструкційних сталей за рахунок активного керування характеристиками наплавленого металу та продуктивністю процесу наплавлення без зміни енергетичних параметрів режиму.

2. Встановлено, що відрив крапель з торця електродного дроту діаметром  $d_e$  і керування характером переносу металу при коливаннях електрода з частотою  $f_k$  і амплітудою  $A_k$  можуть бути досягнуті при реалізації двох силових механізмів: 1) механізму інтегрального силового балансу (ІСБ), який реалізується при амплітуді коливань  $A_k > d_e$  і частоті  $f_{\text{спм}} < f_k < 500$  Гц ( $f_{\text{спм}}$  - природна частота переносу металу); 2) механізму гравітаційно-капілярного розпилення (ГКР), який реалізується при амплітуді коливань  $0,1 d_e < A_k < d_e$  і частоті  $f_k > f_{\text{гкр}}$  ( $f_{\text{гкр}}$  - частота гравітаційно-капілярного розпилення). Для електрода  $\varnothing 2$  мм механізм ІСБ забезпечує відрив краплі при  $A_k > 2$  мм і  $20 < f_k < 500$  Гц; механізм ГКР реалізується при  $0,2 < A_k < 2,0$  мм і  $f_k > 100$  Гц; у діапазоні частот  $100 < f_k < 500$  Гц обидва механізми діють спільно з переважним впливом механізму ІСБ.

3. З використанням розроблених математичних моделей показано, що для підвищення продуктивності процесу наплавлення на торці електродного дроту потрібно утримувати рідкометалевий шар мінімальної товщини, достатньої для ініціювання процесу подрібнення крапель та збільшення ефективності передачі тепла від дуги до електрода. Граничні співвідношення між параметрами ВКЕ,

які при фіксованих параметрах режиму наплавлення забезпечують керування товщиною рідкометалевого шару становлять:  $f_k \geq f_{жмс}$ ;  $A_k < d_e$ , ( $f_{жмс}$  – частота коливань рідкометалевого шару). При автоматичному наплавленні сталевим електродом  $\varnothing$  2 мм під флюсом ОСЦ-45 струмом 200 А необхідна товщина рідкометалевого шару становить 0,3...0,6 мм і утримується при найбільшій частоті коливань  $f_k = 75$  Гц. Із зростанням сили струму товщина рідкометалевого шару та частота коливань пропорційно зростають.

4. Розроблені та експериментально підтверджені математичні моделі, що описують процеси відриву крапель і переносу металу під впливом ВКЕ, дозволяють розрахувати параметри керуючого впливу - частоту і амплітуду, які забезпечують при збереженні стабільного дугового розряду підвищення продуктивності плавлення електрода і отримання необхідної геометрії наплавленого валика.

5. Встановлено, що при автоматичному наплавленні під флюсом з ВКЕ змінюється характер переносу електродного металу. Зафіксовані за допомогою осцилограм піки напруги в дузі з частотою  $f = 15 \dots 20$  Гц, характерні для природного крапельного переносу металу, зникають, переходячи в безперервний спектр частот внаслідок зменшеного впливу подрібнених коливаннями крапель металу на напругу в дузі та силу зварювального струму.

6. Експериментально встановлено, що збільшення частоти коливань торця електродного дроту в різній мірі впливає на зміну коефіцієнта плавлення електрода  $K_n$ , розміри наплавленого валика (висоту  $g$ , ширину  $e$  і глибину проплавлення  $h$ ) і частку участі  $\gamma$  основного металу в наплавленому валику в залежності від інтервалу частоти – у резонансній або міжрезонансній області, а також напрямку коливань. У резонансній області зміни досягають: при позаосьових повздовжніх коливаннях:  $\Delta g = +80\%$ ;  $\Delta e = -35\%$ ;  $\Delta h = -65\%$ ;  $\Delta \gamma = -45\%$  та  $\Delta K_n = +46\%$ , при в позаосьових поперечних коливаннях:  $\Delta e = 25\%$ ;  $\Delta h = -23\%$ ;  $\Delta \gamma = -26\%$ ;  $\Delta K_n = +46\%$ . У міжрезонансній області: при позаосьових повздовжніх коливаннях:  $\Delta g = +15\%$ ;  $\Delta e = -20\%$ ;  $\Delta h = -15\%$ ;  $\Delta \gamma = -30\%$ ;  $\Delta K_n = +25\%$ , при позаосьових поперечних коливаннях:  $\Delta e = 12\%$ ;  $\Delta h = -11\%$ ;  $\Delta \gamma = -15\%$ ;  $\Delta K_n = +25\%$ .

7. Показано, що менший ступінь розбавлення наплавленого металу основою сприяє поліпшенню характеристик поверхневого шару. При двохпрохідному наплавленні з ВКЕ дротом Св-08А під флюсом АНК-18 нормативна твердість наплавленого шару може бути досягнута вже в першому проході. При наплавленні дротом Св-06Х19Н9Т під флюсом 48-ОФ-6 вміст головних легуючих елементів - хрому і нікелю - підвищується на 27 % і 14 % відповідно порівняно з наплавленням без коливань. Використання ВКЕ при наплавленні на режимах з малою погонною енергією ( $q_n = 9,2 \dots 10,4$  кДж/см) не чинить негативного впливу на умови формування наплавленого шару і його структуру.

8. Розроблено технологію автоматичного наплавлення конструкційних сталей з ВКЕ: складені регресійні залежності і розроблена номограма, що дозволяє вибирати параметри керуючого впливу на електродний дріт з метою отримання заданих розмірів наплавленого валика і прогнозування технологічних показників процесу наплавлення; створений механічний генератор імпульсних переміщень електрода, що забезпечує коливання торця

електродного дроту уздовж або упоперек напрямку наплавлення з частотою до 10,0 кГц і амплітудою 0,5 ... 10,0 мм, з можливістю встановлення його на серійному зварювальному устаткуванні. Конструкція генератора захищена 4 патентами України на винаходи і корисні моделі.

9. Результати виконаних досліджень і розробок впроваджені у виробництво у вигляді вдосконаленої технології наплавлення конструкційних сталей під флюсом при виготовленні і ремонті деталей суднових машин і механізмів на ТОВ «Смарт-Меритайм груп» (м. Херсон, 2014 р.), на ТОВ «Чорноморська яхтова верф» (м. Миколаїв, 2015 р.), НПФ «АМІТІ» (м. Миколаїв, 2015 р.). Технологія, впроваджена на ТОВ «Чорноморська яхтова верф», засвідчена протоколом підтвердження відповідності технологічного процесу наплавлення стандарту ДСТУ ISO 15614-1:2010.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях ДАК України:

1. Дубовой, А.Н. Повышение производительности сварки под флюсом током малой плотности [Текст] / А.Н. Дубовой, С. В. Драган, И. В. Симутенков // Збірник наукових праць НУК. – 2009. - № 5(428). – С. 92 - 100.

2. Драган, С. В. Управление технологическими характеристиками дугового процесса при сварке под флюсом током малой плотности [Текст] / С. В. Драган, И. В. Симутенков, К. К. Трунин, И. Г. Лубковский // Вісник ДДМА – 2011 - № 1 – С. 71 - 76.

3. Драган, С. В. Разработка устройства для управления геометрическими параметрами шва при автоматической наплавке под флюсом [Текст] / С. В. Драган, И. В. Симутенков // Збірник наукових праць НУК. – 2011. - № 3(438). – С. 59 - 65.

4. Драган, С. В. Методика определения параметров высокочастотных механических колебаний электрода при автоматической наплавке под флюсом [Текст] / С. В. Драган, И. В. Симутенков, О. В. Игнатенков // Вісник ДДМА. – 2012. – № 3. - С. 124 - 127.

5. Голобородько, Ж. Г. Автоматическая наплавка под флюсом конструкционных сталей с поперечными высокочастотными импульсными перемещениями электрода [Текст] / Ж. Г. Голобородько, С. В. Драган, И. В. Симутенков // Автоматическая сварка. – 2013. – № 6. - С. 35 - 38.

6. Лебедев, В. А. Управление размерами валика при наплавке под флюсом с поперечными высокочастотными импульсными перемещениями электрода [Текст] / В. А. Лебедев, С. В. Драган, Ж. Г. Голобородько, И. В. Симутенков // Заготовительные производства в машиностроении – 2014. – №.4. - С. 6 – 10.

7. Лебедев, В. А. Технологические характеристики автоматической наплавки под флюсом с высокочастотными колебаниями торца электрода [Текст] / В. А. Лебедев, С. В. Драган, Ж. Г. Голобородько, И. В. Симутенков, Ю. А. Ярослав // Автоматическая сварка. – 2014. – № 8. - С. 35 - 38.

8. Симутенков, И. В. Стабильность дугового процесса при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода [Текст] / И.

В. Симутенков, С. В. Драган, Ю. А. Ярослав // Збірник наукових праць НУК. – 2014. - № 4. – С. 43 - 48.

9. Драган, С. В. Влияние высокочастотных колебаний электрода на геометрию проплавления при автоматической наплавке под флюсом [Текст] / С. В. Драган, Ю. А. Ярослав, И. В. Симутенков, В. Я. Трембич // Shipbuilding & Marine infrastructure. – 2015. - № 1(3). – С. 76-86.

#### **Патенти України на корисні моделі та патенти України:**

10. Пат. 92892 Україна, МПК В23К 9/00. Пристрій для коливання електродного дроту / Драган С. В., Симутенков І. В., Галь А. Ф., Лебедев В. О., Ярослав Ю. О., Тищенко В. О. - № у 2014 03267; заявл. 31.03.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17.

11. Пат. 95030 Україна, МПК В23К 9/00. Пристрій для імпульсних переміщень електродного дроту / Симутенков І. В., Драган С. В., Галь А. Ф., Лебедев В. О., Ярослав Ю. О., Тищенко В. О. - № у 2014 06651; заявл. 13.06.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23.

12. Пат. 103640 Україна, МПК В23К 9/00. Способ зварювання та Пристрій для його здійснення / Симутенков І.В., Драган С.В., Галь А.Ф. - № а 2011 07798; заявл. 21.06.2011; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.

13. Пат. 104894 Україна, МПК В23К 9/00 В23К 9/12. Пристрій для подавання електродного дроту / Симутенков І.В., Драган С.В., Галь А.Ф. - № а 2011 15139; заявл. 21.12.2011; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.

#### **Тези доповідей на науково-технічних конференціях:**

14. Драган, С. В. Повышение производительности сварки под флюсом током малой плотности [Текст] / С. В. Драган, И. В. Симутенков // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій». - Миколаїв, Україна, 2009. - С.45 - 46.

15. Симутенков, И. В. Влияние высокочастотных колебаний электрода на геометрические параметры наплавленного валика при автоматической наплавке под флюсом [Текст] / И. В. Симутенков, С. В. Драган, О. В. Игнатенков // Тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів та інженерних споруд» - Миколаїв, Україна, 2012. – С.140 - 143.

16. Симутенков, И. В. Автоматическая наплавка стальных деталей судовых машин и механизмов под флюсом с поперечными высокочастотными колебаниями электрода [Текст] / И. В. Симутенков, С. В. Драган // Тези доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» - Миколаїв, Україна, 2013. - С. 75 – 77.

17. Драган, С. В. Автоматическая наплавка под флюсом с поперечными высокочастотными колебаниями электрода [Текст] / С. В. Драган, Ж. Г. Голобородько, И. В. Симутенков // Збірник тез стендових доповідей Міжнародної конференції «Зварювання та споріднені технології - сьогодення і майбутнє». - Київ, Україна, 2013. - С.170 - 171.

18. Симутенков, И. В. Стабильность дугового процесса при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода [Текст] / И. В. Симутенков, С. В. Драган, Ю.А. Ярослав // Тези

доповідей III Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. «Проблеми зварювання споріднених процесів і технологій і « зварювання та споріднені процеси і технології» - Миколаїв, Україна, 2014. - С.103 - 105.

19. Драган, С. В. Управление геометрией проплавления при автоматической наплавке под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода [Текст] / С. В. Драган, И. В. Симутенков, Ю.А. Ярослав // Тези доповідей 75 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» - Дніпропетровськ, Україна, 2015. - С.403 - 404.

20. Симутенков, И. В. Особенности расчета геометрии проплавления при автоматической наплавке под флюсом с поперечными высокочастотными колебаниями электрода [Текст] / И. В. Симутенков, С.В. Драган, Ю.А. Ярослав, В. Я Трембич // Тези доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених і спеціалістів «Зварювання та споріднені технологи». - Київ, Україна, 2015. - С. 130.

21. Симутенков, И. В. Технология автоматической наплавки под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода [Текст] / И. В. Симутенков // Тези доповідей Всеукраїнської науково - практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу». - Херсон Україна, 2015. - С. 68 - 70.

#### **У наведених роботах автору належить наступне:**

[1, 2, 14] автором досліджено вплив діаметра крапель на стабільність і продуктивність процесу наплавлення під флюсом, запропоновано використання ВКЕ як засіб керування розмірами крапель і підвищення ефективності процесу наплавлення. [3 - 5] автором розроблена математична модель, методика розрахунку параметрів керуючого впливу на електродний дріт і запропонована конструкція механічного генератора ВКЕ. [6] автором запропонована конструкція експериментального стенда, встановлено вплив ВКЕ на характер переносу металу при АНФ, визначено параметри реалізації керованого переносу металу. [7, 15-17, 21] автором запропонована технологія АНФ з ВКЕ, визначена сфера її застосування. [8, 18] автором встановлені основні фактори, що дестабілізують дуговий процес при наплавленні з ВКЕ, визначені граничні значення параметрів ВКЕ, що не порушують стабільне горіння дуги при наплавленні. [9, 19, 20] автором встановлені граничні області взаємозв'язку між частотою і амплітудою комбінованого керуючого впливу на електрод і розроблена діаграма для визначення параметрів ВКЕ з метою керування товщиною рідкометалевого шару на торці електрода, характером переносу металу через дугу і геометрією зони проплавлення.

У патентах [10-13] автором розроблені основні конструктивні схеми і формули винаходів.

## АНОТАЦІЯ

**Сімутенков І. В. Розробка технології автоматичного наплавлення під флюсом конструкційних сталей з високочастотними коливаннями електрода. - Рукопис.** Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - зварювання та споріднені процеси і технології. Національний університет кораблебудування, Миколаїв, 2015.

Дисертація присвячена розробці технології автоматичного наплавлення під флюсом з керуванням характером переносу металу шляхом збудження у електродному дрітці високочастотних коливань (ВКЕ) за допомогою спеціального механічного генератора. У роботі встановлено, що зі збільшенням частоти і амплітуди ВКЕ, при збереженні стабільності дугового процесу, змінюється характер переносу електродного металу і зростає продуктивність наплавлення. Показано також, що ВКЕ сприяють розосередженню тепла зварювальної дуги, внаслідок чого глибина проплавлення і частка участі основного металу у наплавленому знижуються.

Розроблено методику розрахунку параметрів ВКЕ - частоти і амплітуди - для керування продуктивністю наплавлення, розмірами наплавленого шару, часткою участі основного металу. Технологія автоматичного наплавлення під флюсом з ВКЕ впроваджена на суднобудівних підприємствах України.

Ключові слова: автоматичне наплавлення під флюсом, коливання електрода, керування характером перенесення металу, зона проплавлення, механічний генератор, властивості наплавленого шару, технологія.

## АННОТАЦИЯ

**Симутенков И. В. Разработка технологии автоматической наплавки под флюсом конструкционных сталей с высокочастотными колебаниями электрода. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – сварка и родственные процессы и технологии. Национальный университет кораблестроения, Николаев, 2015.

Диссертация посвящена разработке технологии автоматической наплавки под флюсом с управлением характером переноса металла, путем возбуждения в электродной проволоке высокочастотных колебаний (ВКЭ) с помощью специального механического генератора. В работе раскрыт механизм влияния ВКЭ на производительность плавления электрода, перенос электродного металла через дугу, свойства наплавленного слоя. Установлено, что с увеличением частоты и амплитуды колебаний электродной проволоки толщина жидкометаллического слоя на торце электрода уменьшается, а количество тепла, переданного от дуги к электроду, и масса наплавленного металла возрастают. Показано, что в результате ВКЭ изменяется характер переноса электродного металла, фиксируемый на осциллограммах тока и напряжения на дуге, однако стабильность дугового процесса остается высокой. Показано также, что ВКЭ способствуют рассредоточению тепла сварочной дуги, вследствие чего глубина проплавления и доля участия основного металла в

наплавленном снижаются. Расчетным путем определены области, соответствующие различному эффекту от воздействия параметров позаосевых ВКЭ на устойчивость дуги, характер переноса металла и геометрию зоны проплавления.

Экспериментальная проверка влияния ВКЭ на твердость, химический состав и структуру наплавленного металла не показала отрицательных результатов.

Разработана методика расчета параметров ВКЭ – частоты и амплитуды – для управления производительностью наплавки, размерами наплавленного слоя, долей участия основного металла, которая положена в основу руководящей технологической документации. Технология автоматической наплавки под флюсом с ВКЭ внедрена на судостроительных предприятиях Украины.

Ключевые слова: автоматическая наплавка под флюсом, колебания электрода, управление характером переноса металла, зона проплавления, механический генератор, свойства наплавленного слоя, технология.

## SUMMARY

**Simutenkov I. V. - Development of technology for automatic submerged cladding of structural steels with high-frequency vibrations of the electrode. - Manuscript.**

The dissertation thesis for the degree of Technical Sciences Candidate by 05.03.06 specialty. - Welding and related processes and technologies. National University of Shipbuilding, Mykolayiv, 2015.

The dissertation thesis is devoted to development of technology of automatic submerged cladding by controlling the metal transfer, implemented by high-frequency vibrations of the electrode wire produced using a special pulse generator mounted in a standard displacement of welding equipment. It is found that with increasing frequency and amplitude of the vibrations of the electrode thickness of the droplet located on the end of the electrode, and the amount of heat transferred from the arc to the electrode and the mass of the weld metal increase. As the amplitude of the vibrations is due to the dispersal of heat arc the penetration depth and the stake of the base metal in the weld decrease.

Based on the mathematical model was developed calculation method which establishes a relationship between the parameters of high-frequency vibrations of the electrode - frequency and amplitude and target parameters, weight drops, the deposition rate, the size of the cladding layer of the base metal stakes.

The technology of automatic submerged cladding with high-frequency vibrations of the electrode is applied at Ukrainian shipyards.

Keywords: automatic submerged arc cladding, vibrations of the electrode, control the character of metal transfer, the area of penetration, a mechanical oscillator, properties of the deposited layer, technology.