

Щетинін С.В., Десятський С.П.

РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ЩО ВВОДИТЬСЯ У ЗВАРЮВАЛЬНУ ВАННУ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ ЗВАРЮВАННІ

Енергія, яка вводиться дугою у зварювальну ванну, визначає тепловкладення, електричний опір, розтікання струму, магнітне поле і тиск, формування швів та ударну в'язкість зварних з'єднань. Дуга збуджується при закороченні чи в місці меншої відстані між електродами. Дуга прагне горіти при низькій напрузі, тому переміщується торцем електрода. Струм тече шляхом найменшого опору. При закороченні електрода на виріб дуга збуджується в результаті емісії електронів з поверхні катода, який забезпечує регенерацію зарядів.

При електродуговому зварюванні створюється магнітне поле дуги і струму, що тече виробом. Магнітне поле дуги створює пінч-ефект, що зменшує діаметр дуги до 10^{-6} м, підвищує щільність струму до 10^{11} А/м² і стабільність горіння дуги. Магнітне поле струму, що тече виробом, створює поперечне магнітне поле, під дією електромагнітної сили якого дуга відхиляється у бік меншого поля, протилежну струмопідводу, до обриву. Стабільність процесу та формування швів порушується. Підвищення швидкості зварювання обмежене утворенням підрізів, які є концентраторами напруг і знижують ударну в'язкість зварних з'єднань.

Розроблено електромагнітну теорію утворення підрізів, згідно з якою, при підвищенні швидкості зварювання підрізи утворюються під дією магнітного поля дуги, внаслідок посилення охолодження та зменшення діаметра дуги, підвищення індукції, магнітного тиску та посилення пінч-ефекту. Дуга концентрується, зменшується тепловкладення, знижується електричний опір та збільшується струм, через бокові кромки ванни. В результаті, зростає спрямований вниз магнітний тиск, під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів. На основі електромагнітної теорії утворення підрізів, для поліпшення формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні, за рахунок регулювання енергії та магнітного поля, розроблено спосіб одностороннього зварювання складовим електродом, з дротом всередині U-подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, в напрямку зварювання. На прямолінійних ділянках стрічки дуга переміщується торцем електрода попереду дроту, вздовж зварювальної ванни, збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни, що підвищує електричний опір, зменшує струм, спрямований вниз магнітний тиск у бокових кромках і попереджує утворення підрізів. Розроблено математичну модель джерела тепла, для чого складовий електрод представлений як складне джерело теплоти. Дуга, що горить в області дротяного електрода та забезпечує повне проплавлення при односторонньому зварюванні, є лінійним джерелом теплоти. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки і проплавляє приблизно 30% товщини основного металу, відповідно до значень безрозмірних критеріїв, є поверхневим джерелом кінцевої ширини. Складовий електрод можна уявити, як сукупність трьох джерел тепла: одного лінійного на осі та двох поверхневих кінцевої ширини у бокових кромках ванни.

Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання, який, за рахунок регулювання енергії і магнітного поля складовим електродом, запобігає утворенню підрізів. На дроті і прилеглих ділянках зігнутої стрічки утворюється дуга, що обертається. Площа,

Машинобудування і зварювальне виробництво

якою переміщається дуга, збільшується, тиск дуги зменшується, що забезпечує якісне формування швів, одностороннє зварювання на флюсовій подушці, незалежно від зазора в стику, збільшення швидкості зварювання та кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань у 2 – 2,5 рази.

Ключові слова: енергія, одностороннє високошвидкісне зварювання складовим електродом, математична модель джерела тепла, подрізи, ударна в'язкість зварних з'єднань.

Постановка проблеми. Одностороннє високошвидкісне зварювання на флюсовій подушці обмежено порушенням формування швів, внаслідок утворення подрізів, що призводить до зниження ударної в'язкості зварних з'єднань. Тому, розробка одностороннього високошвидкісного зварювання, що забезпечує підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань, є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для запобігання утворення подрізів при дводуговому зварюванні перша дуга проплавляє основний метал, а друга забезпечує відсутність подрізів і якісне формування швів. Однак, при дводуговому зварюванні не забезпечується рівномірне формування зворотного валику на флюсовій подушці. Вплив регулювання енергії, переміщення дуги торцем електрода, магнітного поля, за рахунок форми електрода, на формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні та ударну в'язкість зварних з'єднань досліджено недостатньо [1 – 10].

Мета досліджень. Регулювання енергії та розробка одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, що забезпечує відсутність подрізів, підвищення якості зворотного валику на флюсовій подушці і ударної в'язкості зварних з'єднань.

Основний матеріал дослідження. Ефективним енерго- та матеріалозберігаючим процесом є одностороннє високошвидкісне зварювання, яке забезпечує збільшення швидкості зварювання та кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань. Однак, підвищення швидкості зварювання обмежене утворенням подрізів, які є концентраторами напруг і знижують ударну в'язкість зварних з'єднань.

Дуга визначає енергію, регулювання якої забезпечує формування швів та ударну в'язкість зварних з'єднань. У дузі головна роль належить катоду, головна роль якого в дузі полягає в емісії електронів з поверхні катода, що забезпечує регенерацію зарядів. Катодна пляма дуги, з діаметром порядку 10^{-6} м, постійно переміщається по катоду, внаслідок чого візуально видно площу, по якій переміщається дуга. Щільність струму, за останніми даними, становить 10^{11} А/м². Малий розмір катодної плями, висока щільність струму та рух катодної плями є результатом пінч-ефекту, тобто стиснення під впливом власного магнітного поля. Під дією пінч-ефекту йде ніби ланцюгова реакція – стиснення катодної плями під дією поля призводить до зменшення діаметра плями, що призводить до посилення магнітного поля, яке у свою чергу призводить до скорочення діаметра плями. Процес продовжується до обриву дуги. Дуга знову збуджується у місці найменшої відстані між електродами, згідно із законом найменшого опору.

При електродуговому зварюванні створюється магнітне поле дуги і струму, що тече виробом. Магнітне поле струму дуги створює пінч-ефект, який зменшує діаметр дуги, підвищує щільність струму та стабільність горіння дуги. Магнітне поле струму, що тече виробом, створює поперечне магнітне поле, під дією якого дуга відхиляється у бік меншого поля, у бік, протилежний струмопідводу аж до обриву. Стабільність процесу та формування швів порушується. Діюча на дугу електромагнітна сила зварювального струму пропорційна струму I , індукції магнітного поля B і довжині дуги L_d [3]:

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$F_{EMД} = IBl_{д}, H.$$

Для підвищення швидкості зварювання, розроблено електромагнітну теорію утворення підрізів, згідно з якою, при підвищенні швидкості зварювання підрізи утворюються під дією магнітного поля дуги, внаслідок посилення охолодження та зменшення діаметра дуги, підвищення індукції, магнітного тиску та посилення пінч-ефекту. Дуга концентрується, зменшується тепловкладення, знижується електричний опір та збільшується струм через бокові кромки ванни. В результаті, зростає спрямований вниз магнітний тиск [3]

$$P_{EM} = \frac{B^2}{2\mu} \text{ Па},$$

під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів.

На основі електромагнітної теорії утворення підрізів, для поліпшення формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні, розроблено спосіб одностороннього зварювання складовим електродом, з дротом всередині U-подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, в напрямку зварювання (рис.1г). На прямолінійних ділянках стрічки дуга переміщається торцем електрода попереду дроту, вздовж зварювальної ванни, збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни, що підвищує електричний опір, зменшує струм, спрямований вниз магнітний тиск у бокових кромках і запобігає утворення підрізів.

Електромагнітна природа утворення підрізів підтверджується значною мірою. При зварюванні тонкого метала, підрізи не утворюються. Зі зменшенням глибини проплавлення, схильність до утворення підрізів знижується. З підвищенням глибини проплавлення, схильність до утворення підрізів посилюється. При дводуговому зварюванні перша дуга проплавляє метал, а друга забезпечує відсутність підрізів, за рахунок малої глибини проплавлення. При наплавленні перпендикулярною стрічкою (рис.1а), зі швидкістю 15 м/г утворюються підрізи, тому наплавлення валків перпендикулярною стрічкою не проводиться.

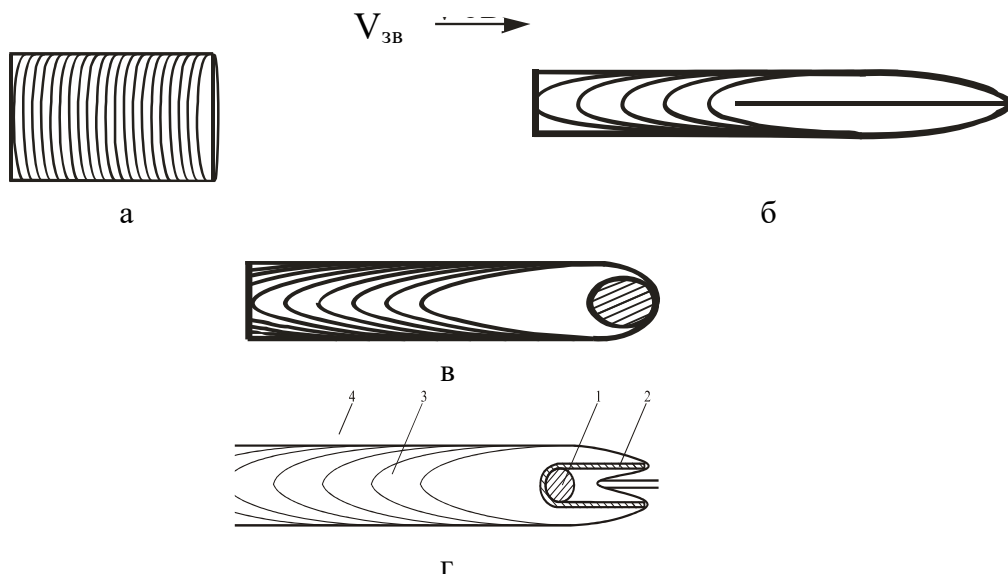


Рисунок 1 – Форма електрода

а – перпендикулярна стрічка; б – повздовжня стрічка; в – дріт;

г – енерго- і матеріалозберігаючий процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом:

1 – дріт; 2 – U-подібна стрічка; 3 – зварний шов; 4 – основний метал;

$V_{зв}$ – напрямок зварювання

Машинобудування і зварювальне виробництво

Ефективним енерго- та матеріалозберігаючим процесом є одностороннє високошвидкісне зварювання складовим електродом (рис.1г) на низькій енергії, яке забезпечує запобігання утворенню підрізів, зменшення тиску зварювальної дуги та якісне формування швів на флюсовій подушці, незалежно від зазору, зниження енергії, мікроспотворень кристалічних решіток, швидкості зварювання та кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань.

При зварюванні складовим електродом тепловкладення можна у значних межах регулювати, шляхом зміни довжини прямолінійних ділянок стрічки. Для визначення оптимальної форми електрода, що забезпечує ефективне тепловкладення в зварювальну ванну, розроблена розрахункова схема джерела тепла і проведений розрахунок ізотерм плавлення, для чого складовий електрод (рис.1г) представлений як складне джерело теплоти [7]. Дуга, що горить в області дротяного електрода і забезпечує повне проплавлення при односторонньому зварюванні, є лінійним джерелом теплоти. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки і проплавляє приблизно 30% товщини основного металу, відповідно до значень безрозмірних критеріїв $U\delta/2a = 19$ і $z/\delta = 0,3$ [5] є поверхневим джерелом кінцевої ширини. Складовий електрод можна уявити, як сукупність трьох джерел тепла: одного лінійного на осі та двох поверхневих кінцевої ширини у бокових кромках ванни.

Потужності джерел визначені пропорційно зайнятому кожним з них перерізу електрода, оскільки швидкість руху дуги по торцю електрода значно вища за швидкість зварювання. Товщина стрічки обрана 0,0005 м, внаслідок збільшення ефективності її застосування із зменшенням товщини [8], мінімум якої обмежений зниженням жорсткості. Діаметр дроту 0,004 м. Розрахунок зроблений для режиму зварювання:

$$I = 2100 \text{ A}; \quad U = 32 \text{ B}; \quad V = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

Порівняння розрахункових значень, ширини ізотерми плавлення 0,0215 м з експериментальними даними ширини шва 0,021 м, дає хорошу збіжність результатів у зоні сплавлення, тому вираз в достатній мірі відображає процес поширення тепла і може бути використано для визначення оптимальної форми складового електрода.

Під дією електромагнітної сили при зварюванні складовим електродом дуга переміщається у поздовжньому і поперечному напрямках, збільшується час існування дуги у бокових кромках ванни. У процесі зварювання дуга переміщається в області прямолінійних ділянок стрічки, потім переходить на дротяний електрод, потім знову на прямолінійні ділянки стрічки. На електроді постійно горить лише одна дуга, яка переміщається торцем зі швидкістю, що значно перевершує швидкість зварювання [3]. Згідно з принципом місцевого впливу джерел теплоти [5], збільшення області, зайнятої джерелом, призводить при зварюванні складовим електродом до збільшення тепловкладення в бокові кромки ванни і тепла, що розповсюджується попереду дуги на дротяному електроді, в результаті покращуються умови існування активної плями, зростає рухливість дуги і ширина зони, нагрітої вище температури плавлення.

Струмопідвод здійснюється до дроту. Найбільш ефективно тепловкладення в бокові кромки ванни, при безпосередньому контакті дроту з прямолінійними ділянками стрічки. Дуга, що переміщається на прямолінійних ділянках стрічки, підігріває основний метал і покращує умови існування активної плями дуги, що горить на дроті. В результаті, при контакті дроту та зігнутої ділянки стрічки, підвищується стабільність процесу та рівномірність по висоті формування зворотного валика. Ефективне збільшення тепловкладення в передній та бокових кромках ванни, зниження спрямованого вниз магнітного тиску та якісне формування швів досягається при оптимальній відстані між прямолінійними ділянками стрічки 0,006 м (рис.1г).

Машинобудування і зварювальне виробництво

Зосередженість теплового потоку значною мірою залежить від довжини прямолінійних ділянок стрічки, зі збільшенням якої кількість теплоти, виділена у передній та бокових кромках ванни, зростає. В результаті, ізотерми плавлення зміщуються вперед у напрямку переміщення джерела та розширюються в напрямку, перпендикулярному осі шва. Розосередження теплового потоку уздовж ванни є одним з факторів, що визначають тепловкладення, зміну магнітного поля, поліпшення формування зворотного валика і забезпечують нормальну ширину шва при низькій напрузі. Однак, збільшення довжини прямолінійних ділянок стрічки обмежене зменшенням глибини проплавлення, внаслідок перерозподілу потужності джерела в бокові кромки ванни та збільшення площі, по якій рухається дуга. Зокрема, при зварюванні складовим електродом, з довжиною прямолінійних ділянок стрічки 0,03 м, глибина проплавлення зменшується втричі, в порівнянні з дротом і стає криволінійною, з різким збільшенням глибини проплавлення в зоні сплавлення, де утворюються тріщини та шлакові включення. Значне зменшення довжини прямолінійних ділянок стрічки до 0,01 м призводить до зниження кількості тепла в передній та бокових кромках ванни, утворення підрізів та порушення формування зворотного валика, внаслідок збільшення тиску дуги.

Розроблено математичну модель джерела тепла та зроблено розрахунок ізотерм плавлення, для чого складовий електрод представлений як складне джерело теплоти. Дуга, що горить в області дротяного електрода та забезпечує повне проплавлення при односторонньому зварюванні, є лінійним джерелом теплоти. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки і проплавляє приблизно 30% товщини основного металу, відповідно до значень безрозмірних критеріїв є поверхневим джерелом кінцевої ширини. Складовий електрод можна уявити, як сукупність трьох джерел тепла: одного лінійного на осі та двох поверхневих кінцевої ширини у бокових кромках ванни.

В результаті розрахунку ізотерм плавлення та експериментальних даних про вплив форми електрода на формування швів, встановлена оптимальна форма складового електрода, з довжиною прямолінійних ділянок стрічки 0,013 м і відстанню між ними 0,006 м (рис.1). Складовий електрод оптимальної форми, шириною 0,007 м і довжиною 0,018 м, формується в процесі подачі стрічки шириною 0,045 м і забезпечує якісне формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні на флюсовій подушці, без розділки кромки металу, товщиною 0,006–0,012 м.

Внаслідок збільшення тепловкладення та зменшення струму, що протікає через бокові кромки ванни, при зварюванні складовим електродом зменшується індукція та спрямований вниз магнітний тиск, під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів. Тому, при односторонньому високошвидкісному зварюванні складовим електродом, забезпечується формування швів без підрізів.

У процесі подачі, дротяний електрод згинається у напрямку зварювання, а стрічковий у протилежному напрямку. В результаті, між електродами у зоні зварювання утворюється зазор. На віддаленій від дроту ділянці зігнутої стрічки періодично збуджується дуга, катодна пляма якої розташовується на плазмі дуги, що горить на дротяному електроді. Це супроводжується утворенням рідкої перемички між дротом та стрічкою, порушенням стабільності процесу та формування зварних швів.

Зазор між дротом та стрічкою збільшується зі зростанням вильоту. Для підвищення стабільності процесу і якості, зварювання складовим електродом під флюсом проводиться на дуже низькому вильоті $(17-19) \times 10^{-3}$ м. При цьому, посилюється саморегулювання, дуга стає жорсткою, менш чутливою до зміни зазору в стику, що пояснюється зменшенням довжини дуги, зануренням стовпа в основний метал, збільшенням щільності струму та стабільності процесу зварювання. Підвищення стабільності та покращення формування швів при зменшенні вильоту характерно і для зварювання дротяним електродом [9,10]. Припускають,

Машинобудування і зварювальне виробництво

що це є наслідком утворення дуги, що обертається і збільшенням площі нагріву при певному відношенні вильоту і щільності струму або процесів у зварювальному контурі, з індуктивністю [9], що цілком можливо.

Одностороннє високошвидкісне зварювання складовим електродом проводиться під склоподібним флюсом дрібної грануляції АН-348АМ і ОСЦ-45М, що забезпечує збільшення тиску, концентрацію дуги і стабільність процесу. Склоподібний флюс використовується і у флюсовій подушці, що забезпечує якісне формування зворотного валика внаслідок збільшення щільності флюсу.

Значне зниження тиску дуги, при зварюванні складовим електродом, забезпечує якісне формування зовнішнього і зворотного валиків при односторонньому високошвидкісному зварюванні під склоподібними флюсами дрібної грануляції. При заміні пемзовидного флюсу АН-60 на склоподібний АН-348АМ або ОСЦ-45М формування швів покращується.

Формування зовнішнього шва покращується, внаслідок занурення дуги в основний метал, підвищення щільності струму, збільшення ефективності тепловкладення і зменшення спрямованого вниз магнітного тиску у бокових кромках ванни. Формування зворотного валика покращується, внаслідок збільшення щільності струму, підвищення саморегулювання дуги та стабільності процесу.

При зварюванні складовим електродом дрібний склоподібний флюс АН-348АМ або ОСЦ-45М забезпечує рівномірний по всій довжині кромки тиск флюсової подушки. Заміна пемзовидного на склоподібний флюс робить зварювання складовим електродом значно економічнішим за дводуговий процес, так як вартість склоподібного в 1,5 рази нижче пемзоподібного.

Дріт і стрічка, при зварюванні складовим електродом, подається з однаковою швидкістю, подача виробляється на стандартних, однодугових зварювальних автоматах з механізмом для подачі та профілювання електрода, який забезпечує вигин плоскої стрічки при подачі до U-подібної форми (рис. 1г).

Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання, який, за рахунок регулювання енергії і магнітного поля складовим електродом з дроту та стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту у напрямку зварювання, дуга збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни, що запобігає утворенню підрізів. На дроті і прилеглих ділянках зігнутої стрічки утворюється дуга, що обертається. Площа, якою переміщається дуга, збільшується, тиск дуги зменшується, що забезпечує якісне формування швів, одностороннє зварювання на флюсовій подушці, незалежно від зазору

Встановленні закономірності та розроблений спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом можуть бути використані при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей, котлів залізничних цистерн і хребтових балок.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси одностороннього високошвидкісного зварювання, які забезпечують підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

ВИСНОВКИ

Енергія, яка вводиться дугою у зварювальну ванну, визначає тепловкладення, електричний опір, розтікання струму, магнітне поле і тиск, формування швів та ударну в'язкість зварних з'єднань. Згідно закону найменшого опору, дуга збуджується при закорочуванні чи в місці меншої відстані між електродами. Дуга прагне горіти при низькій напрузі, тому переміщається торцем електрода, струм тече шляхом найменшого опору. При

Машинобудування і зварювальне виробництво

закороченні електрода на виріб, дуга збуджується, в результаті емісії електронів з поверхні катода.

При електродуговому зварюванні створюється магнітне поле дуги і струму, що тече виробом. Магнітне поле дуги створює пінч-ефект, що скорочує діаметр дуги до 10^{-6} м, підвищує щільність струму до 10^{11} А/м² і стабільність горіння дуги. Магнітне поле струму, що тече виробом, створює магнітне поле, під дією якого дуга відхиляється у бік меншого поля, протилежну струмопідводу, до обриву. Стабільність процесу та формування швів порушується. Підвищення швидкості зварювання обмежене утворенням підрізів, які є концентраторами напруг і знижують ударну в'язкість зварних з'єднань.

Розроблено електромагнітну теорію утворення підрізів, згідно з якою, при підвищенні швидкості зварювання підрізи утворюються під дією магнітного поля дуги, внаслідок посилення охолодження та зменшення діаметра дуги, підвищення індукції, магнітного тиску та посилення пінч-ефекту. Дуга концентрується, зменшується тепловкладення, знижується електричний опір та збільшується струм, що тече через бокові кромки ванни. В результаті зростає спрямований вниз магнітний тиск, під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів.

На основі електромагнітної теорії утворення підрізів, для поліпшення формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні, розроблено спосіб одностороннього зварювання складовим електродом, з дротом всередині U -подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, в напрямку зварювання. На прямолінійних ділянках стрічки дуга переміщається торцем електрода, попереду дроту вздовж зварювальної ванни, збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни, що підвищує електричний опір, зменшує струм, спрямований вниз магнітний тиск у бокових кромках і запобігає утворення підрізів.

Розроблено математичну модель джерела тепла та зроблено розрахунок ізотерм плавлення, для чого складовий електрод представлений як складне джерело теплоти. Дуга, що горить в області дротяного електрода та забезпечує повне проплавлення при односторонньому зварюванні, є лінійним джерелом теплоти. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки і проплавляє приблизно 30% товщини основного металу, відповідно до значень безрозмірних критеріїв є поверхневим джерелом кінцевої ширини. Складовий електрод можна уявити, як сукупність трьох джерел тепла: одного лінійного на осі та двох поверхневих кінцевої ширини у бокових кромках ванни.

Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання, який за рахунок регулювання енергії і магнітного поля складовим електродом з дроту та стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, у напрямку зварювання, дуга збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни, що запобігає утворенню підрізів. На дроті і прилеглих ділянках зігнутої стрічки утворюється дуга, що обертається.

Площа, якою переміщається дуга, збільшується, тиск дуги зменшується, що забезпечує якісне формування швів, незалежно від зазору в стику, збільшення швидкості зварювання та кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань у 2 – 2,5 рази.

Список використаних джерел

1. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму / Р.М.Уайт. - К.: Світ, 2002. - 306с.
2. Грановський В.Л. Електричний струм у газі. Встановлений струм / В. Л. Грановський. -К.: Наука, 2001. - 543с.
3. Фінкельбург В. Електричні дуги та термічна плазма / В. Фінкельбург, Г. Меккер. - К.: Наука., 1991. - 369 с.

Машинобудування і зварювальне виробництво

4. Кесаєв І.Г. Катодні процеси електричної дуги/ І.Г. Кесаєв. - К.: Наука, 1998. -244 с.
5. Рикалін Н.М. Розрахунок теплових процесів при зварюванні / Н.М. Рикалін. - К.: Машгіз, 2001. - 296 с.
6. Акулов А. І. Утримання рідкого металу зварювальної ванни поперечним магнітним полем / А.І. Акулов, А.М. Рибачук // Зварювальне виробництво.-2002. - № 2.- С. 3 - 4.
7. Чигарьов В.В. Розрахунок процесу поширення тепла при зварюванні змішаним електродом /В.В.Чигарьов, С.В.Щетинін //Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2001. – Вип.11. – С.175–177.
8. Гулаков С.В. Наплавлення під флюсом стрічковим електродом/С.В. Гулаков, В.М. Матвієнко, Б.І. Носовський. - Маріуполь, 2006. - 136с.
9. Акулов А.І. Граничні струми при зварюванні електродом, що плавиться /А.І.Акулов, Б.Л. Боженко, Г.Г. Чернишов // Изв. вишів. Машинобудування. - 1998. - №3. - С.132 - 137
10. Акулов А.І. Формуваннястикових швів при зварюванні в СО₂ в умовах технологічних збурень /А.І. Акулов, Б.Л. Боженко, Г.Г.Чернишов // Автоматичне зварювання. - 1999. - №12. - С.26 - 28.

Shchetynin S.V., Desyatskyi S.P.

REGULATION OF ENERGY INPUT INTO THE WELD POOL DURING ONE-SIDED WELDING

The energy introduced by the arc into the weld pool determines heat input, electrical resistance, current spreading, magnetic field and pressure, weld formation and the welded joints impact toughness. According to the law of least resistance, the arc is ignited by shorting or at the point of shortest distance between the electrodes. The arc tends to burn at minimum voltage, so it moves along the electrode tip. Current flows along the path of least resistance. When the electrode is shorted to the workpiece, the arc is ignited by electron emission from the cathode surface, ensuring charge regeneration.

During electric arc welding, a magnetic field is created by the arc and the current, flowing through the workpiece. The arc's magnetic field creates a pinch effect—arc compression under the influence of its own magnetic field—reducing the arc diameter to 10-6 m, increasing the current density to 1011 A/m², and arc stability. The magnetic field of the current, flowing through the workpiece creates a transverse magnetic field, under the which the arc is deflected toward the side of the weaker field, opposite the current supply, until it breaks. Process stability and weld formation are disrupted. Increased welding speed is limited by the undercuts formation, which act as stress concentrators and reduce the welded joints impact toughness.

An electromagnetic theory of undercut formation has been developed, according to which, as welding speed increases, undercuts form under the influence of the arc's magnetic field, due to increased cooling and a decrease in arc diameter, increased induction, magnetic pressure, and a stronger pinch effect. The arc concentrates, heat input decreases, electrical resistance decreases, and current through the side edges of the weld pool increases. This results in increased downward magnetic pressure, causing liquid metal to flow from the weld pool edges, leading to undercut formation.

Based on the electromagnetic theory of undercut formation, a method for one-sided welding with a composite electrode has been developed to improve weld formation during one-sided welding by regulating energy and the magnetic field. This method consists of a wire inside a U-shaped strip, the straight sections of which are located ahead of the wire in the welding direction. On the straight sections of the strip, the arc moves along the end of the electrode ahead of the wire along the weld

Машинобудування і зварювальне виробництво

pool, increasing heat input into the pool side edges. This increases electrical resistance, reduces current flow, and creates downward magnetic pressure in the area of the side edges, preventing undercut formation.

A mathematical model of the heat source was developed, representing the composite electrode as a complex heat source. The arc burning in the area of the wire electrode and ensuring complete penetration during single-sided welding is a linear heat source. An arc burning in the straight sections of the strip and melting approximately 30% of the base metal thickness is, according to the dimensionless criteria, a surface heat source of finite width. The composite electrode can be represented as a combination of three heat sources: one linear heat source along the axis and two surface heat sources of finite width at the weld pool side edges.

A method for one-sided high-speed welding has been developed by regulating the energy and magnetic field with a composite electrode consisting of a wire inside a U-shaped strip. The straight sections of the strip are positioned ahead of the wire in the welding direction. The arc increases heat input into the weld pool side edges, preventing undercuts. A rotating arc is formed on the wire and adjacent sections of the curved strip according to the law of least resistance. The arc's travel area increases, and the arc pressure decreases, ensuring high-quality weld formation one-sided flux-bed welding, regardless of the welding gap in the joint and an increase in the welded joints impact toughness by 2–2.5 times.

Keywords: *the one-sided high-speed composite electrode welding, mathematical model of the heat source, undercut, welded joints impact toughness.*

Стаття надійшла 04.03.2026р.

Стаття прийнята 09.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.

131 – Прикладна механіка

УДК 621.791.052.004.64.

doi.org/10.31498/2522-9990312026359289

Захарова І.В., Спесівцев Я.І

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛОВИЗНИХ ДИЗЕЛІВ ШЛЯХОМ
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ В УМОВАХ ВІДБУДОВИ
УКРАЇНИ**

Одним із основних напрямів розвитку сучасного тепловозобудування є підвищення рівня форсування теплових дизелів, що дає змогу зменшити їх масу та габарити, а також підвищити економічність за рахунок зростання механічного коефіцієнта корисної дії. У зв'язку з цим дедалі більш актуальним стає питання надійності, оскільки підвищення рівня форсування дизеля об'єктивно призводить до її зниження.

На вітчизняних тепловозах у даний час встановлюються дизелі типу Д49, форсовані за ефективним тиском до рівня близько 2,0 МПа. У високофорсованих дизелях цього типу спостерігається значна теплова напруженість деталей циліндро-поршневої групи, надійність якої значною мірою визначає загальну надійність дизеля.

Зокрема, одними з найменш довговічних і водночас дороговартісних вузлів залишаються кришки циліндрів, основною несправністю яких є тріщини вогневого днища. Їх виникнення зумовлене дією високих температурних градієнтів, циклічних термомеханічних навантажень, концентрацією напружень у зонах клапанів і форсунок, а також процесами термічної втоми та релаксації напружень.