

Щетинін С. В., Щетиніна В. І., Коваль О. В., Никитенко П. В., Елсаєд Халед

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ВИСОКОШВИДКІСНОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА НИЗЬКІЙ ПОГОННІЙ ЕНЕРГІЇ

Режим наплавлення визначає рух дуги по торцю електрода, тепловкладення, погонну енергію, зварювальні напруги, мікроструктуру і тріщиностійкість наплавленого металу. З підвищенням тепловкладення порушується рівновага в металі і виникають зварювальні напруги, під дією яких в металі утворюються тріщини. Оптимізовано режим високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який забезпечує стабільність процесу, якісне формування валиків і тріщиностійкість наплавлених валків. Доказано вплив параметрів режиму на формування наплавленого металу, частку участі основного металу і тріщиностійкість наплавленого металу, за рахунок регулювання вмісту вуглецю в шві. При високошвидкісному напавленні на низькій погонній енергії зменшується глибина проплавлення, що знижує частку участі основного металу в наплавленому і підвищує тріщиностійкість наплавленого металу. Ефективним способом зниження тепловкладення і погонної енергії є підвищення швидкості наплавлення, зі зростанням якої підвищується швидкість кристалізації, зменшується площа проплавлення основного металу і частка участі основного металу в наплавленому. Це забезпечує зниження вмісту вуглецю в зварювальній ванні, утворення пор СО і підвищення тріщиностійкості. Встановлено механізм підвищення тріщиностійкості, при високошвидкісному напавленні на низькій погонній енергії, за рахунок зменшення тепловкладення. Для підвищення тріщиностійкості при електродуговому напавленні необхідно зменшувати глибину проплавлення, яка при напавленні повинна бути не більше 2-х мм. Зменшення глибини проплавлення з 6-ти мм при зварюванні до 2-х мм при напавленні забезпечує зниження тепловкладення, зварювальних напруг, підвищення швидкості наплавлення і тріщиностійкості наплавленого металу. Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій енергії бандажованих опорних валків, який забезпечує мінімальні тепловкладення і зварювальні напруги, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, зростання міжатомних зв'язків, підвищення тріщиностійкості та відсутність поломок бандажів.

**Ключові слова:** Оптимізація режиму, високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії, зварювальні напруги, подрібнення мікроструктури, підвищення тріщиностійкості, бандажовані опорні валки.

**Постановка проблеми.** Валки прокатних станів, які експлуатуються при високих питомих тисках, змінних температурах, в умовах агресивних середовищ, виготовляються з високовуглецевої сталі 90ХФ, схильної до утворення гарячих і холодних тріщин. Тріщиностійкість визначає зносостійкість валків і в значній мірі впливає на виробництво, витратний коефіцієнт металу і вартість прокату. Тому підвищення тріщиностійкості наплавленого металу є важливою науково-технічною проблемою.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Тріщиностійкість високовуглецевих сталей залежить від тепловкладення і зварювальних напруг [1–10], які визначаються режимом наплавлення, тому вивченню механізму утворення тріщин і оптимізації режиму надають важливе значення. При відсутності нагріву метал знаходиться в рівновазі, енергія рівна нулю. При електродуговому напавленні під дією дуги і тепловкладення рівновага порушується, енергія зростає і виникають зварювальні напруги. Коли зварювальні напруги стають більше межі міцності утворюються тріщини. Одним з основних показників тепловкладення є погонна енергія, яка залежить від режиму електродугового

## Машинобудування і зварювальне виробництво

наплавлення. Однак вплив режиму і погонної енергії на якість наплавленого металу і механізм утворення тріщин при нанапавленні високовуглецевих сталей, з яких виготовляються робочі та опорні валки, повністю не встановлено.

**Мета досліджень.** Встановлення закономірностей впливу режиму наплавлення на тріщиностійкість, оптимізація режиму і розробка процесу підвищення тріщиностійкості при високошвидкісному напавленні на низькій погонній енергії.

**Основний матеріал досліджень.** Режим наплавлення визначає рух дуги по торцю електрода, тепловкладення, погонну енергію, зварювальні напруги, мікроструктуру і тріщиностійкість наплавленого металу.

Погонна енергія представляє собою відношення ефективної теплової потужності дуги –  $q_{II}$ , до швидкості наплавлення –  $V$ :

$$E_{II} = \frac{q_{II}}{V} = \frac{IU\eta_{II}}{V}, \text{ Дж/м}, \quad (1)$$

де  $I$  – величина зварювального струму, А;

$U$  – напруга на дузі, В;  $\eta_{II}$  – ефективний КПД, 0,9.

Зі збільшенням струму і напруги, погонна енергія підвищується, з ростом швидкості наплавлення – знижується.

Величина зварювального струму визначається кількістю заряджених частинок в одиницю часу і регулюється швидкістю подачі електрода в зону горіння дуги. З підвищенням струму кількість наплавленого металу зростає.

Напруга на дузі залежить від довжини дуги, зі зростанням якої напруга зростає. З урахуванням кінчної форми дуги, при підвищенні довжини дуги зростає площа, по якій рухається активна пляма, що призводить до підвищення ширини валика.

Ефективним способом зниження погонної енергії є підвищення швидкості наплавлення, з ростом якої зростає швидкість кристалізації, яка прямо пропорційна швидкості наплавлення  $V_{KP} = V_{зв} \cos \alpha$ . Зерна не встигають вирости до кристалізації, що забезпечує здрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, збільшення магнітної індукції, магнітного тиску і міжатомних зв'язків. В результаті підвищення швидкості наплавлення тріщиностійкість наплавленого металу зростає.

Підвищення швидкості зварювання обмежено утворенням підрізів, які є центрами тріщин. При електродуговому напавленні для підвищення тріщиностійкості розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, при якому зменшується глибина проплавлення і частка участі основного металу в наплавленому. В результаті зменшення глибини проплавлення підрізи не утворюються, тому при напавленні підвищення швидкості не обмежено.

Швидкість наплавлення визначає тепловкладення в основний метал і погонну енергію. При підвищенні швидкості наплавлення погонна енергія зменшується, внаслідок чого знижується глибина проплавлення, частка участі основного металу в наплавленому і підвищується тріщиностійкість деталей

Для оптимізації режиму наплавлення проводили автоматичне електродугове наплавлення валиків на різних режимах: дротом Св08Г2С, діаметром  $4 \cdot 10^{-3}$  м, на пластини  $(16 \times 200 \times 300) \cdot 10^{-3}$  м. Наплавлення проводили під флюсом АН60, на постійному струмі зворотної полярності, що забезпечує стабільність процесу, за рахунок розташування на електроді менш рухливого аноду. Струм змінювався в межах:  $I=400, 600, 800$  А; напруга на дузі  $U=28, 36, 40$  В; швидкість наплавлення  $V_H=(1,3; 2,1; 2,9) \cdot 10^{-2}$  м/с. Погонна енергія змінювалась в межах  $q_{II}/V = 1,8; 2,7$  і  $3,6$  МДж/м.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

В якості джерела живлення використовували випрямляч ВДУ 1204.

В результаті проведених досліджень встановлено, що при підвищенні зварювального струму, внаслідок зростання подачі електроду, кількість наплавленого металу, ширина наплавленого валика, висота посилення і глибина проплавлення зростають. При підвищенні напруги на дузі, внаслідок зростання довжини і конічної форми дуги, ширина валика зростає. Висота посилення і глибина проплавлення зменшуються.

При підвищенні швидкості наплавлення, внаслідок зменшення тепловкладення і погонної енергії, ширина проплавлення, висота посилення і глибина проплавлення зменшуються (рис. 1). При зменшенні погонної енергії частка участі основного металу в наплавленому, висота посилення і глибина проплавлення зменшуються (рис. 2).

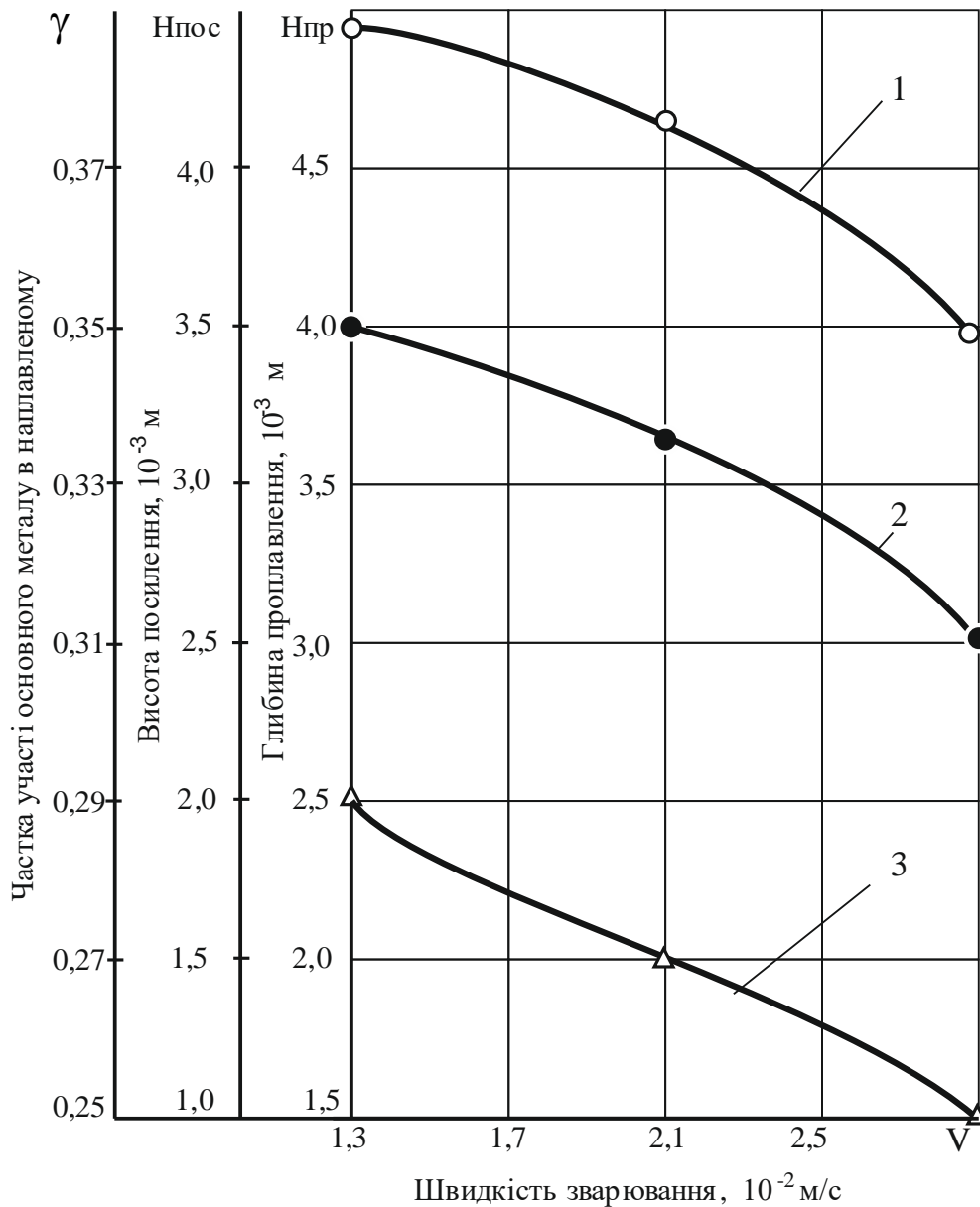


Рисунок 1 – Залежність частки участі основного металу в наплавленому (1), висоти посилення (2) і глибини проплавлення (3) від швидкості зварювання

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Зменшення частки участі основного металу в наплавленому забезпечує зниження вмісту вуглецю і підвищення тріщиностійкості наплавленого металу.

Основною відмінністю наплавлення від зварювання є значно менша глибина проплавлення. Для запобігання утворенню холодних тріщин і відшарувань наплавленого металу, а також пороутворення, необхідно забезпечити мінімальну частку участі основного в наплавленому металі, якою називається відношення площі проплавлення  $F_{ПР}$  до площі шва  $F$ :  $\gamma = \frac{F_{ПР}}{F}$ .

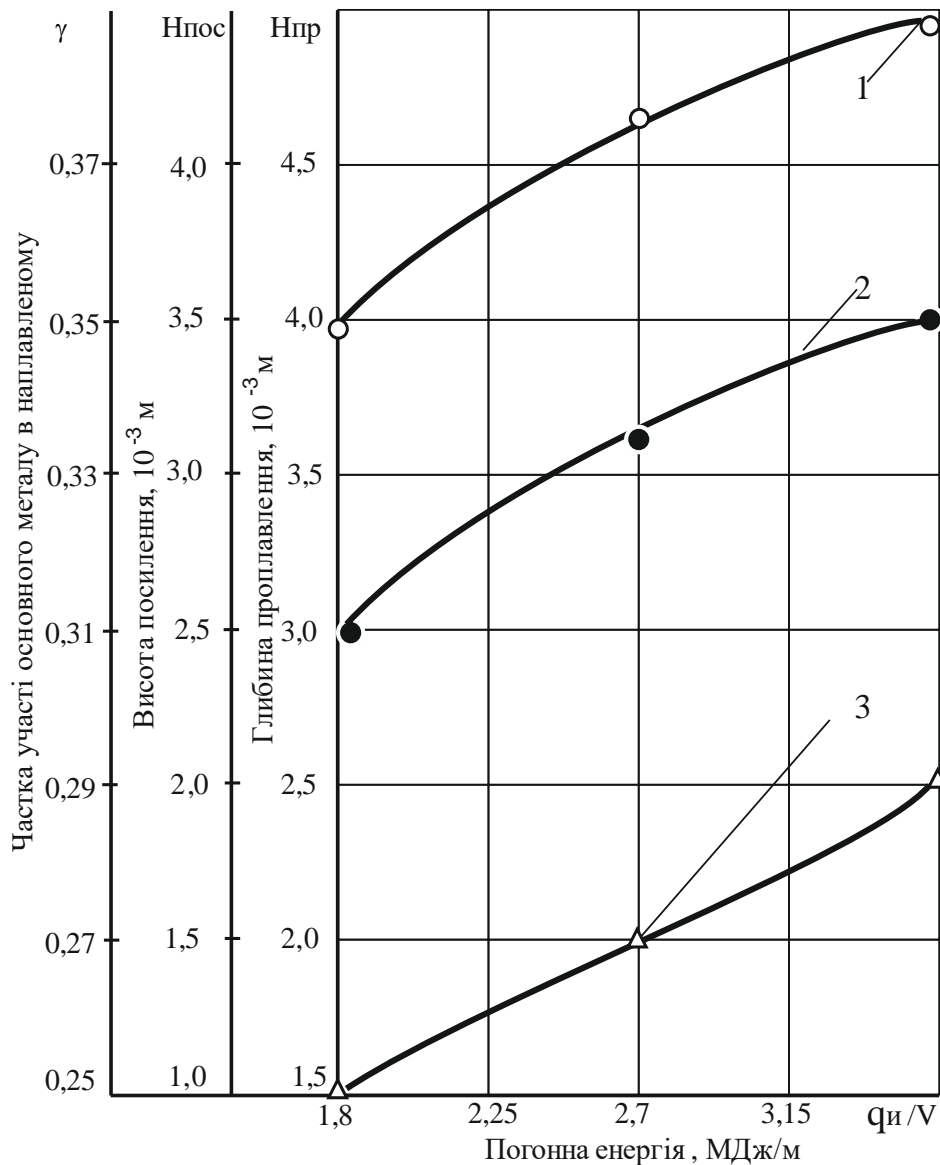


Рисунок 2 – Залежність частки основного металу в наплавленому (1), висоти посилення (2) і глибини проплавлення (3) від погонної енергії

Для зменшення частки участі основного металу в наплавленому рекомендується проводити наплавлення на низькій погонній енергії. Зниження глибини проплавлення, внаслідок зменшення феромагнітної маси, індукції магнітного поля і спрямованої вниз електромагнітної сили забезпечує формування швів без підрізів та підвищення критичної швидкості наплавлення.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Наплавлення проводиться автоматом АД231, на постійному струмі зворотної полярності, що забезпечує стабільність процесу. Можливість наплавлення з високою швидкістю на низькій погонній енергії встановлено при відновленні і зміцненні бандажованих опорних валків стану 3000, діаметром 2100 мм і роликів рольганга 400 мм.

Бандаж, посаджений на ось з натягом, призводить до підвищення власних напружень в опорному валку, тому, при наплавленні необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги. При наплавленні бандажованих опорних валків з високою погонною енергією, внаслідок збільшення тепловкладення і зварювальних напружень, бандаж зламався. При наплавленні з низькою погонною енергією, на режимі: величина струму 750 – 800 А; напруга 30 – 32 В; швидкість 75 м/г, бандаж не зламався.

Оптимальний режим високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії бандажованих опорних валків: величина струму 750 – 800 А; напруга на дузі 30 – 32 В; швидкість наплавлення – 75 м/г

На підставі проведених досліджень, оптимізовано режим високошвидкісного наплавлення бандажованих опорних валків на низькій погонній енергії, який забезпечує мінімальні глибину проплавлення і частку участі основного в наплавленому металі.

Розроблено процес високошвидкісного наплавлення бандажованих опорних валків на низькій погонній енергії, який забезпечує зниження мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг, здрібнення мікроструктури, підвищення тріщиностійкості і відсутність полумок бандажів.

Встановлені закономірності впливу швидкості наплавлення і погонної енергії на частку участі основного металу в наплавленому, тріщиностійкість і зносостійкість можуть бути використані для розробки процесів високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії валків прокатних станів.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, які забезпечують підвищення тріщиностійкості та зносостійкості бандажованих опорних валків.

## ВИСНОВКИ

Режим наплавлення визначає рух дуги по торцю електрода, тепловкладення, погонну енергію, зварювальні напруги, мікроструктуру і тріщиностійкість наплавленого металу. З підвищенням тепловкладення порушується рівновага в металі і виникають зварювальні напруги, під дією яких в металі утворюються тріщини.

Оптимізовано режим високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який забезпечує стабільність процесу, якісне формування валиків і тріщиностійкість наплавлених валків. Доказано вплив параметрів режиму на формування наплавленого металу, частку участі основного металу і тріщиностійкість наплавленого металу, за рахунок регулювання вмісту вуглецю в шві. При високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії зменшується глибина проплавлення, що знижує частку участі основного металу в наплавленому і підвищує тріщиностійкість наплавленого металу.

Ефективним способом зниження тепловкладення і погонної енергії є підвищення швидкості наплавлення, зі зростанням якої підвищується швидкість кристалізації, зменшується площа проплавлення основного металу і частка участі основного металу в наплавленому. Це забезпечує зниження вмісту вуглецю в зварювальній ванні, утворення пор CO і підвищення тріщиностійкості.

Встановлено механізм підвищення тріщиностійкості при високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії, за рахунок зменшення тепловкладення. Для підвищення тріщиностійкості при електродуговому наплавленні необхідно зменшувати глибину

## Машинобудування і зварювальне виробництво

проплавлення, яка при наплавленні повинна бути не більше 2-х мм. Зменшення глибини проплавлення з 6-ти мм при зварюванні до 2-х мм при наплавленні забезпечує зниження тепловкладення, зварювальних напруг, підвищення швидкості наплавлення і тріщиностійкості наплавленого металу.

Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії бандажованих опорних валків, який забезпечує мінімальні тепловкладення і зварювальні напруги, здрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, зростання міжатомних зв'язків, підвищення тріщиностійкості та відсутність поломок бандажів.

### Список використаних джерел:

1. Управление геометрией сварного шва аппаратными средствами при механизированной и автоматической дуговой сварке плавящимся электродом / В. А. Лебедев, С. Ю. Максимов, А. М. Жерносеков, Ю. Н. Сараев // Сварочное производство. – 2014. – № 5. – С. 10–16.
2. Максимов, С. Ю. Особливості дуги з імпульсним саморегулюванням процесу плавлення електрода при ручному дуговому зварюванні / С. Ю. Максимов, В. С. Сидорук, Д. М. Кражановський // Автоматичне зварювання. – 2019. – № 12. – С. 25–32.
3. К вопросу о саморегулировании дуги при сварке плавящимся электродом / Б. Е. Патон, С. Ю. Максимов, В. С. Сидорук, Ю. Н. Сараев // Сварочное производство. – 2014. – № 12. – С. 3–11.
4. Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, С. Ю. Максимов, И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12. – С. 34–42.
5. Прохоров, Н. Н. Физические процессы в металле при сварке. Т. 2 / Н. Н. Прохоров. – М. : Металлургия, 1976. – 600 с.
6. Финкель, В. М. Физика разрушения / В. М. Финкель. – М. : Металлургия, 1970. – 376 с.
7. Рябцев, И. А. Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев. – Киев : Экотехнология, 2004. – 160 с.
8. Влияние погонной энергии на образование отколов при наплавке высокоуглеродистой стали аустенитными проволоками / В. К. Каленский, Я. П. Черняк, В. Г. Васильев, Т. Г. Соломийчук // Автоматическая сварка. – 2001. – № 11. – С. 11–14.
9. Савицкий, А. М. Влияние скорости сварки и длительности периодического охлаждения на формирование структуры сварных соединений закаливающихся сталей при дуговой сварке с термоциклированием / А. М. Савицкий, М. М. Савицкий, Д. П. Новикова // Автоматическая сварка. – 2004. – № 8. – С. 41–45.
10. Сулова, Е. А. Влияние технологических факторов на склонность к образованию трещин / Е. А. Сулова, В. А. Игнатов, А. С. Зубченко // Сварочное производство. – 1990. – № 5. – С. 35–36.

**Щетинин С. В., Щетинина В. И., Коваль О. В., Никитенко П. В., Элсаед Халед**

### **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ НАПЛАВКЕ НА НИЗКОЙ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ**

*Режим наплавки определяет движение дуги по торцу электрода, стабильность процесса, тепловложение, погонную энергию, сварочные напряжения, микроструктуру и трещиностойкость наплавленного металла. С повышением тепловложения нарушается равновесие в металле и возникают сварочные напряжения, под действием которых в металле образуются трещины. Оптимизирован режим высокоскоростной наплавки на низкой*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

погонной энергии, который обеспечивает стабильность процесса, качественное формирование валиков и трещиностойкость наплавленных валков. Доказано влияние режима на формирование наплавленного металла, долю участия основного металла в наплавленном за счет регулирования содержания углерода в шве. При высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии уменьшается глубина проплавления, что снижает долю участия основного металла в наплавленном и повышает трещиностойкость наплавленного металла. Эффективным способом снижения тепловложения и погонной энергии является повышение скорости наплавки, с увеличением которой повышается скорость кристаллизации, уменьшаются площадь проплавления основного металла и доля участия основного металла в наплавленном. Это обеспечивает снижение содержания углерода в сварочной ванне, образование пор CO и повышение трещиностойкости. Установлен механизм повышения трещиностойкости при высокоскоростной наплавке на низкой погонной энергии за счет уменьшения тепловложения. Для повышения трещиностойкости при электродуговой наплавке необходимо уменьшать глубину проплавления, которая при наплавке должна быть не больше 2-х мм. Уменьшение глубины проплавления с 6-ти мм при сварке до 2-х мм при наплавке обеспечивает снижение тепловложения, сварочных напряжений, повышение скорости наплавки и трещиностойкости наплавленного металла. Разработан процесс высокоскоростной наплавки на низкой погонной энергии бандажированных опорных валков, который обеспечивает минимальные тепловложение и сварочные напряжения, измельчение микроструктуры, уменьшение межатомного расстояния, увеличение межатомных связей, повышение трещиностойкости и отсутствие поломок бандажей.

**Ключевые слова:** Оптимизация режима, стабильность процесса, высокоскоростная наплавка на низкой погонной энергии, сварочные напряжения, измельчение микроструктуры, повышение трещиностойкости, бандажированные опорные валки.

**Shchetinin S. V., Shchetinina V. I., Koval O. V., Nikitenko P. V., Elsad Khaled**

### REGIME OPTIMIZE IN THE HIGH-SPEED SURFACING AT LOW HEAT ENERGY

*The surfacing regime determines the arc motion along the electrode end face, process stability, heat input, heat energy, welding stresses, microstructure and deposited metal crack resistance. With heat input an increase, the metal equilibrium is disturbed and welding stresses arise, under the influence of which cracks are formed in the metal. The high-speed surfacing at low heat energy regime has been optimized, which ensures the process stability, beads high-quality formation and deposited rolls crack resistance. The regime influence on the deposited metal formation, the base metal share in the deposited metal due to the carbon content regulation in the weld is proved. With high-speed surfacing at low heat energy, the penetration decreases, which reduces the base metal share in the deposited metal and increases the deposited metal crack resistance. An effective way to reduce heat input and heat energy is to increase the surfacing speed, with an increase in which the crystallization speed increases, the base metal penetration area and the base metal share in the deposited metal decreases. This ensures weld pool carbon content, the CO pores formation a decrease and crack resistance an increase. The crack resistance mechanism increase during high-speed surfacing at low heat energy has been established due to a heat input decrease. The crack resistance during electric arc surfacing increase, it is necessary to reduce the penetration depth, which during surfacing should be no more than 2 mm. The penetration depth decrease from 6 mm at welding to 2 mm at surfacing provides a heat input, welding stresses decrease, the surfacing speed increase and deposited metal crack resistance. The*

*high-speed surfacing at low heat energy of the banded support rolls process has been developed, which provides minimal heat input and welding stresses, microstructure refinement, the interatomic distance decrease, an interatomic bonds increase, a crack resistance increase and bandage breakages absence*

**Keywords:** Regime optimize, process stability, the high-speed surfacing at low heat energy, welding stresses, microstructure refinement, crack resistance increase, banded support rolls.

*Стаття надійшла 01.09.2021 р.*

УДК 621.791

[doi.org/10.31498/2522-9990242021267038](https://doi.org/10.31498/2522-9990242021267038)

Пестунова Н. О.

### МОДЕРНІЗАЦІЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК СТОСОВНО ДО НАПЛАВЛЕННЯ ПОРОШКОВИМИ СТРІЧКАМИ

*Стаття присвячена модернізації пристроїв зварювальних апаратів для механізованого електродугового однопрохідного наплавлення зносостійких сплавів порошковими стрічками.*

*Зварювальні установки знаходять широке застосування для зварювання та наплавлення з використанням різних зварювальних матеріалів. До деяких установок розроблені додаткові пристрої, що дозволяють розширити можливості зварювальних апаратів при використанні електродних матеріалів різної форми та розмірів.*

*Спеціалізованих наплавних установок набагато менше ніж зварювальних. Зварювальні та наплавні установки складаються з ряду блоків: для переміщення установки уздовж траєкторії зварювання або наплавлення, для здійснення подачі електродного матеріалу, струмопідвод, управління. Принцип роботи зварювальних та наплавних установок має багато подібних технічних рішень.*

*Для проведення наплавних робіт широко застосовуються порошкові стрічки прямокутного перетину, що складаються з металевої оболонки та осердя. Конструкція оболонок порошкових стрічок відрізняється розмірами (шириною та товщиною), замковим з'єднанням і місцем його розташування. Деякі оболонки порошкових стрічок складаються з двох металевих стрічок, причому можливе використання металевих стрічок різної товщини.*

*Для наплавлення з використанням порошкових стрічок проведено аналіз і запропоновано пристрій для наплавлення чотирма порошковими стрічками. Використання інших модернізованих пристроїв дозволяє при механізованому однопрохідному електродуговому наплавленні отримати шар товщиною до 300 мм.*

**Ключові слова:** пристрій, порошкова стрічка, зносостійкий сплав.

*Розроблені порошкові стрічки відрізняються конструкцією оболонки, складом осердя. Їх практичне застосування обґрунтовується в кожному конкретному випадку необхідністю отримання наплавленого складу, який задовольняє умовам експлуатації наплавленого виробу. Деякі види перетинів порошкових стрічок, розташування замкового з'єднання і конструкції оболонок показані на рис. 1 [1-6].*