

increasing, the deposited metal peeled off along the line of fusion with the base metal. With an increase in the carbon content in the deposited metal to 5.3% when surfacing the charging apparatus cones, the permissible thickness is limited to 0.012 – 0.017 m, which is controlled by turning the groove before surfacing.

The regularity of increasing welding stresses and decreasing crack resistance with increasing of the deposited metal thickness confirms the minimum energy law, according to which minimum energy – maximum quality. With a decrease in energy during high-speed welding, the beads width, heat input, and welding stresses are reduced, the microstructure is refined, the interatomic distance is reduced, interatomic bonds increase, which ensures the impact toughness, the deposited metal crack resistance and wear resistance an increase. The high-speed surfacing on low energy energy-saving process by reducing the deposited metal thickness, which reduces energy and heat input, reduces the crystal lattice microdistortions, microstresses, dislocation density, welding stresses, reduces interatomic distances, increases interatomic bonds, crack resistance strength, wear resistance and corrosion resistance has been developed. Minimum energy – maximum crack resistance, wear resistance and corrosion resistance.

**Keywords:** high speed surfacing on low energy, deposited metal thickness, superposition principle, crystal lattice microdistortions, microstresses, dislocation density, welding stresses, interatomic distance, interatomic bonds, crack resistance, wear resistance, corrosion resistance.

Стаття надійшла 09.10.2023 р.

УДК 621.791.753.042

[doi.org/10.31498/2522-9990262023294132](https://doi.org/10.31498/2522-9990262023294132)

Щетиніна В.І.

### ЕНЕРГО-І МАТЕРІАЛОЗБЕРІГАЮЧИЙ ПРОЦЕС ОДНОСТОРОННЬОГО ВИСОКОШВИДКІСНОГО ЗВАРЮВАННЯ

Енерго- і матеріалозберігаючий процес одностороннього високошвидкісного зварювання обмежено витіканням рідкого металу з ванни та утворенням підрізів, 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. Ефективним способом підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань є зростання швидкості зварювання та кристалізації, що обмежено утворенням підрізів, природа яких повністю не встановлена.

На основі дослідження магнітного поля зварювального струму при односторонньому зварюванні встановлено, що з підвищенням швидкості зварювання індукція попереду дуги не задежить від швидкості, позаду дуги зменшується, а в зоні сплавлення, де утворюються підрізи, збільшується. Встановлено, що індукція магнітного поля в зоні сплавлення, при зварюванні зростає, внаслідок зменшення кількості теплоти в бокових кромках, зниження електричного опору і збільшення струму, що тече кромками ванни. Індукція визначає магнітний тиск на метал в зоні сплавлення. При збільшенні швидкості зварювання, зростає спрямований вниз магнітний тиск, під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів.

Розроблена електромагнітна теорія утворення підрізів, згідно якої при підвищенні швидкості зварювання посилюється охолодження активних плям, концентрується дуга і зменшується тепловкладення в бокові кромки ванни, електричний опір яких знижується. В результаті зростає величина струму, що тече боковими кромками ванни, індукція магнітного поля і в квадратичній залежності магнітний тиск, під дією якого рідкий метал

## Машинобудування і зварювальне виробництво

стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів. Електромагнітна теорія утворення підрізів підтверджується тим, що при зварюванні тонкого металу підрізи не утворюються, при збільшенні товщини зварювального металу схильність до утворення підрізів зростає, що є результатом зростання феромагнітної маси, індукції магнітного поля зварювального струму і магнітного тиску, максимальне значення якого розташовується на поверхні, де утворюються підрізи.

Розроблено енерго- і матеріалозберігаючий процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, що складається з дроту і U-подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, по напрямку зварювання. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки, збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни. В результаті, електричний опір зростає, зменшується струм, що тече боковими кромками, і спрямований вниз магнітний тиск, що запобігає утворенню підрізів та забезпечує підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань в 2–2,5 рази.

**Ключові слова:** одностороннє високошвидкісне зварювання, підрізи, електромагнітна теорія утворення підрізів, магнітне поле зварювального струму, магнітна індукція, магнітний тиск, зона сплавлення, складовий електрод, ударна в'язкість зварних з'єднань.

**Постановка проблеми.** Одностороннє високошвидкісне зварювання, яке є енерго- і матеріалозберігаючим процесом, обмежено утворенням підрізів, 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.** Підрізи обмежують підвищення швидкості зварювання і досліджені в достатній мірі [1–9]. Природа утворення підрізів фундаментально вивчена Б.С. Патонем, В.К. Лебедевим, І.В. Пентеговим і С.Л. Мандельбергом. Одні вважають, що підрізи утворюються внаслідок збільшення поверхневого натягу, інші внаслідок відхилення дуги назад, треті, в результаті підвищення тиску дуги. Однак, природа утворення підрізів при високошвидкісному зварюванні повністю не встановлена [1–9].

**Мета досліджень.** Встановлення природи утворення підрізів і розробка енерго- і матеріалозберігаючого процесу одностороннього високошвидкісного зварювання, що забезпечує підвищення якості формування швів і ударної в'язкості зварних з'єднань.

**Основний матеріал дослідження.** Струм в зварювальній ванні від активної плями розтікається рідким металом. Рідкий метал зварювальної ванни, з температурою 1700–18000° С вище точки Кюрі, немагнітний. Магнітне поле зварювального струму діє на рідкий метал ванни як на провідник зі струмом, що визначає рух металу, магнітогідродинамічні явища в ванні, формування швів і критичну швидкість зварювання. В області бокових кромки ванни на зварювальний струм і рідкий метал діє магнітне поле дуги. Під дією магнітного поля дуги, на рідкий метал ванни в області бокових кромки діє спрямований вниз магнітний тиск.

Для визначення природи утворення підрізів проводили дослідження впливу швидкості зварювання на магнітне поле зварювального струму попереду дуги, позаду дуги та в зоні сплавлення, де утворюються підрізи.

Вимірювання проводили при односторонньому зварюванні вимірювачем магнітної індукції EM4305, в якому використовується ефект Холла. Щуп, для вимірювання індукції магнітного поля, встановлювали в жорстко закріпленій на зварювальній голівці кварцевий ізолятор, в формі пробірки, який, внаслідок низької теплопровідності кварцу, забезпечує незначний нагрів зонда і максимально можливе наближення датчика Холла до дуги і рідкого металу ванни. При наближенні до дуги і основного металу, на відстань менш 0,016 м, кварцевий ізолятор і зонд розплавлялися.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

На основі проведених досліджень магнітного поля зварювального струму при односторонньому зварюванні встановлено, що з підвищенням швидкості зварювання індукція та магнітний тиск попереду дуги  $B_A$ ,  $P_A$  не залежить від швидкості, позаду дуги  $B_B$ ,  $P_B$  зменшується, а в зоні сплавлення  $B_C$ ,  $P_C$  збільшується (рис.1). Індукція магнітного поля в зоні сплавлення  $B_C$ , при підвищенні швидкості зварювання зростає, внаслідок зменшення кількості теплоти в бокових кромках, зниження електричного опору і збільшення струму, що тече кромками ванни. Індукція визначає магнітний тиск  $P = \frac{B^2}{2\mu}$  на метал в зоні сплавлення.

При збільшенні швидкості зварювання, зростає спрямований вниз магнітний тиск  $P_C$ , під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів.

Встановлена закономірність впливу швидкості зварювання на магнітне поле зварювального струму та на ударну в'язкість зварних з'єднань.

На основі отриманих даних о впливі швидкості зварювання на магнітне поле зварювального струму, розроблено електромагнітну теорію утворення підрізів.

Згідно електромагнітної теорії утворення підрізів, при підвищенні швидкості зварювання посилюється охолодження активних плям, концентрується дуга і зменшується тепловкладення в бокові кромки ванни, електричний опір яких знижується. В результаті зростає величина струму, що тече боковими кромками ванни, індукція магнітного поля і магнітний тиск, під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів.

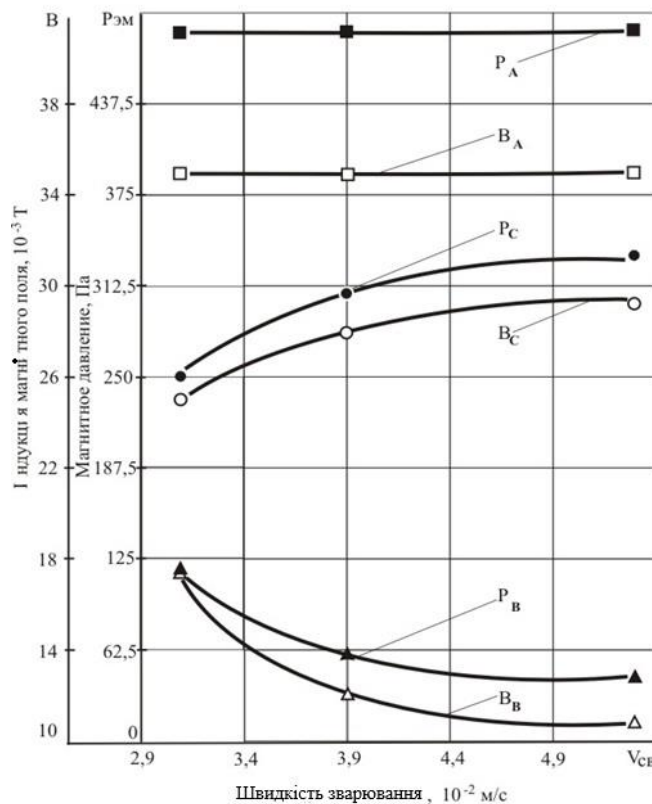


Рисунок 1 – Залежність індукції магнітного поля  $B$  і магнітного тиску  $P$  на рідкий метал ванни від швидкості зварювання на струмопідвід: струм 2700 – 2800 А, напруга 28- 30 В; попереду дуги  $B_A$   $P_A$ , позаду дуги  $B_B$   $P_B$ , в зоні сплавлення  $B_C$   $P_C$

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Електромагнітна теорія утворення підрізів підтверджується тим, що при зварюванні тонкого металу підрізи не утворюються, при збільшенні товщини зварювального металу схильність до утворення підрізів зростає, що є результатом збільшення феромагнітної маси, індукції магнітного поля зварювального струму і магнітного тиску, максимальне значення якого розташовується на поверхні, де утворюються підрізи

На підставі електромагнітної теорії утворення підрізів, розроблений процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, що складається з дроту і U-подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, по напрямку зварювання. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки, збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни. В результаті, електричний опір зростає, зменшується струм, що тече боковими кромками і спрямований вниз магнітний тиск, що запобігає утворенню підрізів.

При односторонньому високошвидкісному зварюванні складовим електродом внаслідок обертання дуги торцем U-подібної стрічки збільшується площа, знижується тиск дуги, що забезпечує якісне формування зворотного валика на флюсовій подушці незалежно від зазору.

При високошвидкісному зварюванні внаслідок охолодження зменшується діаметр і збільшується швидкість обертання дуги та кристалізації, посилюється пінч-ефект, здрібнюється мікроструктура, скорочується міжатомна відстань, підвищуються міжатомні зв'язки та ударна в'язкість зварних з'єднань.

Розроблено енерго- і матеріалозберігаючий процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, що складається з дроту і U-подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, по напрямку зварювання. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки, збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни. В результаті, електричний опір зростає, зменшується струм, що тече боковими кромками і спрямований вниз магнітний тиск, який запобігає утворенню підрізів та підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань в 2–2,5 рази.

Встановлені закономірності і розроблений спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом можуть бути використані при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей.

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

Енерго- і матеріалозберігаючий процес одностороннього високошвидкісного зварювання обмежено витіканням рідкого металу з ванни та утворенням підрізів, що приводить 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. Ефективним способом підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань є зростання швидкості зварювання та кристалізації, що обмежено утворенням підрізів, природа яких повністю не встановлена.

На основі дослідження магнітного поля зварювального струму при односторонньому зварюванні встановлено, що з підвищенням швидкості зварювання індукція попереду дуги не задежить від швидкості, позаду дуги зменшується, а в зоні сплавлення, де утворюються підрізи, збільшується. Встановлено, що індукція магнітного поля в зоні сплавлення, при підвищенні швидкості зварювання зростає внаслідок зменшення кількості теплоти в бічних кромках, зниження електричного опору і збільшення струму через бічні кромки ванни.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Індукція визначає магнітний тиск на метал в зоні сплавлення. При збільшенні швидкості зварювання, зростає спрямований вниз магнітний тиск, під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів.

Розроблена електромагнітна теорія утворення підрізів, згідно якої при підвищенні швидкості зварювання посилюється охолодження активних плям, концентрується дуга і зменшується тепловкладення в бічні кромки ванни, електричний опір яких знижується. В результаті зростає величина струму бічні кромки ванни, індукція магнітного поля і в квадратичній залежності магнітний тиск, під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що приводить до утворення підрізів.

Електромагнітна теорія утворення підрізів підтверджується тим, що при зварюванні тонкого металу підрізи не утворюються, при збільшенні товщини зварювального металу схильність до утворення підрізів зростає, що є результатом збільшення феромагнітної маси, індукції магнітного поля зварювального струму і магнітного тиску, максимальне значення якого розташовується на поверхні, де утворюються підрізи

Розроблено енерго- і матеріалозберігаючий процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, що складається з дроту і U-подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, по напрямку зварювання. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки, збільшує тепловкладення в бічні кромки ванни. В результаті, електричний опір зростає, зменшується струм через бічні кромки, та спрямований вниз магнітний тиск, що запобігає утворенню підрізів і забезпечує підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань в 2–2,5 рази.

### Список використаних джерел

1. Фуджіта Ю. Технологія зварювання в сучасній промисловості Японії / Ю. Фуджіта, Ю. Наканісі, Н. Юріока // Автоматичне зварювання. - 2008. - С.48 - 54.
2. Бернадський В.М. Японія визначає пріоритети у зварюванні на ХХІ століття / В.М. Бернадський // Автоматичне зварювання. - 2002. - №3. - С.46.
3. Рябцев І.О. Наплавлення деталей машин и механізмів. – Київ: Екотехнологія, 2004. – 160 с.
4. Фінкель В.М. Фізика руйнування / В.М. Фінкель. - М.: Металургія, 1980. - 376с.
5. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму. - М.: Світ, 1982. - 306с.
6. Грановський В.Л. Електричний струм у газі. Встановлений струм / В. Л. Грановський. - М.: Наука, 1971. - 543с.
7. Фінкельбург В. Електричні дуги та термічна плазма / В. Фінкельбург, Г. Меккер - М.: Вид-во іностр. літ. 1961. - 369 с.
8. Ніколаєв Г.А. Міцність зварних з'єднань та деформації конструкцій / Г.А. Миколаїв, С.А. Куркін, В.А. Винокур. - М.: Вища школа, 1982. - 272 с.
9. Винокуров В.А. Теорія зварювальних деформацій та напруг / В.А.Винокуров, А.Г. Григор'янц. - М.: Машинобудування, 1984. -280 с.



## THE ENERGY- AND MATERIAL-SAVING ONE-SIDED HIGH-SPEED WELDING PROCESS

*The energy- and material-saving one-sided welding process is limited by the liquid metal leakage from the pool and the undercuts formation, which leads to the welded joints impact strength a decrease. Therefore, the one-sided high-speed welding development, which ensures the welded joints impact toughness increase, is the important scientific and technical problem. The effective way to increase the welded joints impact toughness is to increase the welding and crystallization speed, which is limited by the undercuts formation, the nature of which has not been fully established.*

*Based on the welding current magnetic field during one-sided welding, a study it was established that with increasing welding speed, the induction in the arc front does not depend on the welding speed, the arc behind it decreases, and in the fusion zone, where undercuts are formed, it increases. It has been established that the magnetic field induction in the fusion zone during welding speed, increasing due to the heat amount in the side edges a decrease, electrical resistance a decrease and the current flowing through the pool edges an increase. Induction determines the magnetic pressure on the metal in the fusion zone. As the welding speed increases, the downward magnetic pressure increases, under the influence of which liquid metal flows from the pool edges, which leads to the undercuts formation.*

*The undercut formation electromagnetic theory has been developed, according to which, with increasing welding speed, the active spots cooling increases, the arc is concentrated and the heat input into the pool side edges, the electrical resistance of which decreases, is reduced. As a result, the current, flowing through the pool side edges the magnitude, increases, the magnetic field induction and, in a quadratic dependence, the magnetic pressure, under the influence of which the liquid metal flows from the pool edges increases, which leads to the undercuts formation.*

*The undercuts formation electromagnetic theory is confirmed by the fact that when welding thin metal, undercuts do not form; with the metal being welded thickness increasing, the tendency to form undercuts increases, which is the ferromagnetic mass an increase the result, the welding current magnetic field induction and magnetic pressure, the maximum value of which is located on the surface, where the undercuts are formed.*

*The energy- and material-saving one-sided high-speed welding with a composite electrode, consisting of a wire and a U-shaped tape, the straight sections of which are located in the welding direction wire front, the process has been developed. arc burning in the tape straight sections increases heat input into the pool side edges. As a result, the electrical resistance increases, the current flowing through the side edges and the downward magnetic pressure decreases, which prevents the undercuts formation and ensures the welded joints impact toughness increase by 2 – 2.5 times.*

**Keywords:** *one-sided high-speed welding, undercuts, electromagnetic theory of formation of undercuts, magnetic field of welding current, magnetic induction, magnetic pressure, fusion zone, component electrode, impact toughness of welded joints.*

*Стаття надійшла 15.10.2023 р.*