

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-115-123  
УДК 621.791.037

**ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ  
ВИЗНАЧЕННІ ПОПЕРЕЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ МЕТАЛУ В ЗОНІ ШВА  
ПРИ АРГОНОДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ АЛЮМІНІЮ МАРКИ АД0**

**©Ситников Б.В., Маршуба В.П., Мірошніченко Н.М.,  
Соловей Л.В., Широков Стефан**

*Українська інженерно-педагогічна академія*

**Інформація про автора:**

**Ситников Борис Валентинович:** ORCID: 0000-0003-2581-1486; [sitnikovboris@outlook.com](mailto:sitnikovboris@outlook.com); кандидат технічних наук; доцент кафедри зварювання; Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Маршуба В'ячеслав Павлович:** ORCID: 0000-0003-1426-6240; [marshuba\\_vp@outlook.com](mailto:marshuba_vp@outlook.com); кандидат технічних наук; доцент кафедри зварювання; Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

**Мірошніченко Наталія Миколаївна:** ORCID: 0000-0002-0561-4138; [d\\_tasha@ukr.net](mailto:d_tasha@ukr.net); кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів; Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, м. Харків, 61002, Україна.

**Соловей Людмила Валентинівна:** ORCID: 0000-0001-5308-6782; [ludsol@ukr.net](mailto:ludsol@ukr.net); ст. викладач кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів; Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, м. Харків, 61002, Україна.

**Широков Стефан:** ORCID: 0000-0002-6216-2908; [fan.google@gmail.com](mailto:fan.google@gmail.com); студент кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів; Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, м. Харків, 61002, Україна.

В роботі проведено експериментальне дослідження закономірностей зміни поперечних переміщень в зоні шва під час кристалізації при аргонодуговому зварюванні електродом, що не плавиться, алюмінію марки АД0. Отримані дані можуть бути використані при виборі оптимального режиму зварювання, безпечного з точки зору кристалізаційного розтріскування.

У статті розглядається доцільність використання статистичних методів аналізу точності, стабільності й керування ТП, що передбачає контроль процесу лише за одним показником якості виробу. Для безрозмірного показника якості розглянуто оцінки параметрів та знайдено числові характеристики цих моделей. На основі отриманих оцінок запропоновано метод визначення якості технологічних процесів у машинобудуванні.

Отримані результати свідчать про те, що при зварюванні пластин встик без зазору базова відстань в залежності від швидкості зварювання і температури попереднього підігріву, може зменшуватися, збільшуватися, або залишатися незмінною. Момент, коли починається зближення базових точок, становить найбільший інтерес з точки зору оцінки можливості утворення кристалізаційних тріщин у звареному шві. Умови, при яких зменшення базової відстані відбувається одночасно з протіканням кристалізації металу в уже згаданому перетині є безпечними щодо утворення кристалізаційних тріщин, так як ослаблена ділянка шва піддається впливу, що стискає, від навколишнього металу, яке повністю або частково компенсує напруги розтягнення, які обумовлені складною усадкою. Якщо ж базова відстань залишається незмінними під час кристалізації, це свідчить про наявність напруги розтягування, яка обумовлена ускладненою усадкою. Це також створює небезпеку утворення кристалізаційних тріщин, оскільки напруги, як правило, концентруються в найбільш слабкій осьовій ділянці шву, де метал твердне в останню чергу.

При зварюванні пластин з алюмінію марки АД0 товщиною 4 мм збільшення швидкості зварювання з 8 до 32 м/год призводить до появи напруг, що розтягують, в області перебування металу шву у твердорідкому стані, що може призводити до виникнення кристалізаційних тріщин.

**Ключові слова:** якість, технологічний процес, моделювання, числові характеристики, безрозмірний показник.

**Ситников Б.В., Маршуба В.П., Мирошніченко Н.М., Соловей Л.В., Широков Стефан** «Использование интегрированных технологий при определении поперечных деформациях металла в зоне шва при аргонодуговой сварке алюминия марки АД0».

В работе проведено экспериментальное исследование закономерностей изменения поперечных перемещений в зоне шва при кристаллизации при аргонодуговой сварке алюминия марки АД0 неплавящимся электродом. Полученные данные могут быть использованы при выборе оптимального режима сварки, безопасного с точки зрения кристаллизационного растрескивания.

В статье рассматривается целесообразность использования статистических методов анализа точности, стабильности и управления ТП, предусматривается контроль процесса лишь по одному показателю качества изделия. Для безразмерного показателя качества рассмотрены оценки параметров и найдены числовые характеристики этих моделей. На основе полученных оценок предложен метод определения качества технологических процессов в машиностроении.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при сварке пластин встык без зазора базовая расстояние в зависимости от скорости сварки и температуры предварительного подогрева, может уменьшаться, увеличиваться или оставаться неизменной. Момент, когда начинается сближение базовых точек, представляет наибольший интерес с точки зрения оценки возможности образования кристаллизационных трещин в сварном шве. Условия, при которых уменьшение базового расстояния происходит одновременно с протеканием кристаллизации металла в анализируемом сечении являются безопасными при создании кристаллизационных трещин, так как ослабленный участок шва подвергается сжимающему воздействию от окружающего металла, полностью или частично компенсирует напряжения растяжения, которые обусловлены сложной усадкой. Если же базовое расстояние остается неизменными во время кристаллизации, это свидетельствует о наличии напряжения растяжения, которая обусловлена осложненной усадкой. Это также создает опасность образования кристаллизационных трещин, так как напряжения, как правило, концентрируются в наиболее слабой осевой области шва, где металл затвердевает в последнюю очередь.

При сварке пластин из алюминия марки АД0 толщиной 4 мм увеличение скорости сварки с 8 до 32 м/ч приводит к появлению растягивающих напряжений, в области пребывания металла шва в твердожидком состоянии, что может приводить к возникновению кристаллизационных трещин.

**Ключевые слова:** качество, технологический процесс, моделирование, численные характеристики, безразмерный показатель.

**Sitnikov B., Marshuba V., Miroshnichenko N., Solovey L., Shirokov Stefan** «The use of integrated technologies for determining the transverse deformations of metal in the weld zone during argon-arc welding of aluminum grade AD0».

An experimental study of the patterns of changes in transverse displacements in the weld zone during crystallization during argon-arc welding of AD0 grade aluminum with a non-consumable electrode was carried out. The data obtained can be used to select the optimal welding mode, safe from the point of view of crystallization cracking.

The article discusses the feasibility of using statistical methods for analyzing the accuracy, stability and control of TP, provides for process control on only one indicator of product quality.

For a dimensionless quality indicator, parameter estimates are considered and numerical characteristics of these models are found. Based on the obtained estimates, a method for determining the quality of technological processes in mechanical engineering is proposed.

The results obtained indicate that when butt welding without a gap, the base distance, depending on the welding speed and preheating temperature, may decrease, increase or remain unchanged. The moment when the rapprochement of the base points begins is of greatest interest from the point of view of assessing the possibility of the formation of crystallization cracks in the weld. Conditions under which a decrease in the base distance occurs simultaneously with the crystallization of the metal in the analyzed section is safe when creating crystallization cracks, since the weakened section of the weld is subjected to compressive action from the surrounding metal, fully or partially compensates for tensile stresses, which are caused by complex shrinkage. If the base distance remains unchanged during crystallization, this indicates the presence of tensile stress, which is due to complicated shrinkage. This also creates the risk of crystallization cracks, since stresses are usually concentrated in the weakest axial region of the weld, where the metal hardens last.

When welding plates made of aluminum, grade AD0, 4 mm thick, an increase in the welding speed from 8 to 32 m/h leads to tensile stresses in the region where the weld metal is in a solid-liquid state, which can lead to crystallization cracks.

**Keywords:** argon, tungsten electrode, welding speed, aluminium, the seam, lateral movements, crystallization cracks.

### **1. Постановка проблеми в загальному вигляді**

У процесі кристалізації твердодірного металу шва, що має мале відносне подовження, матеріал зазнає усадку і піддається впливу зварювальних деформацій [1]. У цей період навіть незначні напруги розтягнення можуть призвести до утворення кристалізаційних тріщин [2-4]. Основні закономірності виникнення деформацій і напружень при дуго-вому зварюванні алюмінієвих пластин, що розглянуті в роботах [5, 6]. На підставі експериментального дослідження закономірностей зміни зварювальних деформацій за допомогою методу муарових смуг був зроблений висновок про те, що для алюмінієвих сплавів характерним є поперечний стиск металу у зварювальній ванні [7]. Зі зростанням швидкості зварювання пік стиснення зсувається в бік більш низьких температур застигання. При цьому передбачалося [5, 6], що зварювальні напруги з'являються у ванні тільки після досягнення температури солідус. При температурі ж вище солідусу має відбуватися вільне переміщення металу в зварювальну ванну. Однак насправді напруги у зварному шві виникають під час перебування металу в твердодірному стані при температурах, що перевищують точку солідусу, тобто вони концентруються в найбільш слабкій ділянці [8].

З огляду на вищевикладене, можна зробити висновок, що для вибору оптимального режиму зварювання, безпечного з точки зору кристалізаційно-го розтріскування, необхідно вивчити закономірності поперечних деформацій металу шва під час перебування його в твердодірному стані.

### **2. Аналіз досліджень і публікацій по темі статті**

Зварювальні напруги та деформації досліджували і продовжують вивчати велика кількість вітчизняних і зарубіжних вчених. Розглянемо лише деякі сторони даного питання, що

безпосередньо стосуються проблеми утворення гарячих тріщин з урахуванням вимог, щодо зварювання алюмінію. З цієї точки зору велике значення має динаміка тимчасових напруг і деформацій у зварному шві.

Розглядаючи температурне поле на поверхні металу навколо джерела тепла, що переміщається, автор роботи [9] приходять до висновку про те, що в результаті підвищення температури смуги металу близько осі шва збільшуються по довжині більше, ніж паралельні смуги, що розташовані на крайках далі від осі. Внаслідок цього пластини, що зварюються, прагнуть зігнутися з утворенням зазору попереду і ззаду джерела теплоти, а безпосередньо попереду ванни завжди створюється область високих напруг та стиснення.

Наявність області напруг, що стискають або деформацій попереду зварювальної ванни, що рухається, природно, та не є небезпечною, так як тут метал плавиться, а не твердне. Картина напруг і деформацій при зварюванні в хвостовій частині шва, залежить від режиму зварювання, особливо від швидкості процесу, наявності зазору або оброблення, властивостей металу, товщини і ширини пластин, жорсткості кріплення тощо. У нормальних умовах хвостову частину ванни охоплюють зварювальні напруги, що стискають. Тут їм протистоять усадочні напруги перехідної зони, що розтягують. З точки зору запобігання гарячих тріщин поява зварювальних напружень, що стискають, корисна.

В роботі [10] розглянуто вплив режиму зварювання на технологічну міцність швів алюмінієвих сплавів. Відзначено, що вплив швидкості зварювання на стійкість металу шва до утворення кристалізаційних тріщин не завжди однозначно. Так, крім швидкості, необхідно враховувати також і форму провару, напрямок росту кристалів та ін.

При зварюванні стикових швів пластин або полотниць автори роботи [9] спостерігали наступну картину. Якщо шов варити з неповним (на глибину менш 2/3 товщини листа) проплавленням листа (товщиною більше 3...5 мм) схильного до утворення тріщин сплаву, поздовжні тріщини не виявляються. Зазвичай при цьому можливо утворення поперечних тріщин. При однопро-хідному зварюванні стикових швів з повним проваром форма шва менш сприятлива і зростає небезпека утворення поздовжніх тріщин. У разі зварювання без попереднього і супутнього підігріву з відносно великою швидкістю в основному відбувається зближення крайок. Якщо зварювати пластини з малою швидкістю, то в процесі зварювання метал встигає охолонути настільки, що останні ділянки шва відчують напруги розтягнення.

У ряді досліджень вивчалася деформація металу шву в процесі утворення тріщин при зварюванні з одночасним записом значень температури. При вимірюванні температури металу в процесі зварювання, який характеризується неоднорідним температурним полем з великим градієнтом температур, найбільшого поширення набули термопари. З числа існуючих термопар, що зазвичай використовують для виміру температур в діапазоні 300...700° С, в роботі [11] була обрана хромель-алюмелева термопара. Дана термопара поряд з лінійною термоелектричної характеристикою при досить високій ЕРС відрізняється в досліджуваному діапазоні температур незначною розчинністю в рідкому алюмінії. Ця характеристика дуже ва-

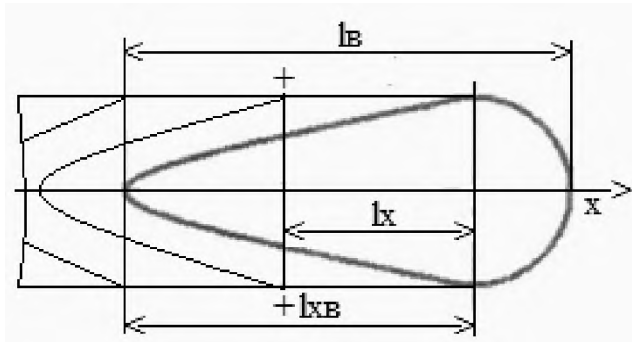
жлива для використання термопар без захисного чохла з метою зниження її інерційності. Така термопара, виготовлена з дроту діаметром 0,10...0,15 мм, набирає температуру 300° С за час, що не перевищує 0,5 с. Для збереження стабільним опору вимірювального контуру застосовувалися ковзаючі контакти. Істотний вплив на точність вимірювання надає спосіб введення спая термопар в рідкий метал. Термопару діаметром менше 0,8 мм через теплову дію дуги не вдається вводити в зварювальну ванну зверху. Більш зручним виявилось введення спая термопар в зварювальну ванну знизу (отвір діаметром 0,6 мм). При цьому виявилось необхідним вводити спай термопар на таку глибину, щоб в процесі зварювання він не виступав над рівнем рідкого металу, який покриває дно зварювальної ванни. При більшому діаметрі отвору або невеликій глибині занурення, спай термопар погано змочується рідким металом. Потім кінці термопар підключалися через опір до гальванометра або осцилографа.

Для вимірювання деформації був сконструйований деформометр [9]. Наявність між ніжками деформометра двох пружин, що взаємно врівноважують, одна одну дозволяє знизити до мінімуму тиск голок деформометра на метал, що кристалізується. У момент утворення зростаючих кристалів жорсткого каркаса, тиск голок практично дорівнює нулю. Воно збільшується в процесі кристалізації в міру зростання абсолютної величини деформацій. Завдяки одночасному збільшенню цих зусиль і міцності металу, що кристалізується, верхню температурну межу вимірювань приладу вдалося підняти істотно вище температури солідусу. Переміщення голок деформометра перетворюється в електричний сигнал за допомогою тензоопорів. Вступний сигнал від тензодатчика записується на осцилографі одночасно з ЕРС термопар. Це забезпечує автоматичну синхронізацію записи деформацій і температур у часі.

Оригінальну методику вимірювання переміщень зварювальних кромок при затвердінні металу застосували автори роботи [12]. Вони відмовилися від використання деформометра з ніжками, що заморожують в тілі шву, вважаючи, що тиск, який вони створюють, дорівнює опору металу в інтервалі крихкості. Для визначення деформацій застосували кінозйомку взаємного положення контрольних точок бази, що вимірювали, в процесі проходження через неї зварної дуги. При кінозйомки фіксували ризики, що перехрещуються, які нанесені на ті ділянки крайок, що з'єднуються, які не повинні оплавлятися. Складові зразки зварювалися круговими швами при нерухомому пальнику і кінокамери.

### **3. Виклад основного матеріалу**

Переміщення зварювальних кромок шву при затвердінні металу проводили безконтактним методом за методикою, яка наведена в роботі [12]. Автори відмовилися від використання деформометра з ніжками, що заморожені в тілі шва, вважаючи, що тиск, який вони створюють, дорівнює з опору металу в інтервалі крихкості. Для визначення деформацій застосували кінозйомку взаємного положення перехрещуються ризик вимірювальної бази в процесі проходження через неї дуги (рис. 1).



**Рис. 1** – Схема зварювальної ванни:

$l_b$  – довжина зварювальної ванни;  $l_{xv}$  – довжина хвостової частини зварювальної ванни; + – перехрещуються риси;  $l_x$  – проміжне положення рисок, що перехрещуються

При зварюванні використовували пальник з прозорою кришкою, що дозволяє спостерігати і фіксувати на кіноплівці зміни бази між контрольними відмітками, попередньо нанесеними зліва і праворуч від осі шва. Кінозйомку виробляли зі швидкістю 8...24 кадрів в секунду. Після проявлення плівки відстань між відмітками кожної бази вимірювали за допомогою інструментального мікроскопа.

Для зменшення похибки використовували базу 14...16 мм, при якій похибка становила не більше 0,2 %. В експериментах використовували пластини розмірами 200x150 мм завтовшки 4 мм. Зварювання проводили вольфрамовим електродом марки ЕВЛ діаметром 4 мм на змінному струмі від джерела живлення ТПР-300Д з використанням присадного дроту СвА5 діаметром 2 мм на режимах, зазначених у таблиці. Пристрій для кріплення і підігріву пластин складався з експериментальної нагрівальної електричної плити, на яку містився столик зі зразком, що досліджували. Зразки підігрівали до завданої температури  $T_p$ , потім відключали пристрій, що нагріває та починали процес зварювання.

На рис. 2 представлені результати вимірювань відносних переміщень  $\delta$ , у %, кромки, що зварюють, в поперечному напрямку при зварюванні пластин з алюмінію марки АД0 зі швидкістю 8, 16, 24 і 32 м/год. Початок вимірювань відносних переміщень відповідає моменту проходження дуги через переріз, що аналізують, кінець – моменту завершення кристалізації зварювальної ванни (табл.).

Отримані результати свідчать про те, що при зварюванні пластин встик без зазору в міру віддалення дуги від перерізу, що аналізують, базова відстань в залежності від швидкості зварювання і температури попереднього підігріву, може зменшуватися, збільшуватися, або залишатися незмінною. Момент, коли починається зближення базових точок, становить найбільший інтерес з точки зору оцінки можливості утворення кристалізаційних тріщин у звареному шві [9]. Умови, при яких зменшення базової відстані відбувається одночасно з протіканням кристалізації металу в уже згадуваному перетині є безпечними щодо утворення кристалізаційних тріщин, так як ослаблена ділянка шва піддається впливу, що стискає, від навколишнього металу, яке повністю або частково компенсує напруги розтягнення, які обумовлені складною усадкою. Якщо ж базова відстань залишається незмінною під час кристалізації, це свідчить про наявність напруги розтягування, яка обумовлена ускладненою усадкою. Це також створює небезпеку утворення кристалізаційних тріщин, оскільки напруги, як правило, концентруються в найбільш слабкій осевій ділянці шву, де метал твердне в останню чергу.

Таблиця. - Орієнтовні режими автоматичної аргонодугового зварювання неплавким електродом стикових з'єднань алюмінію марки АД0 товщиною 4 мм

№ опыта	<i>I</i> зв, А	<i>V</i> зв., м/год	<i>V</i> п.п., м/год	<i>T</i> п., ° С
1	190	8	22	20
2	220	16	27	20
3	260	24	32	20
4	320	32	38	20
5	170	8	22	100
6	200	16	27	100
7	240	24	32	100
8	300	32	38	100
9	160	8	22	150
10	190	16	27	150
11	230	24	32	150
12	290	32	38	150
13	150	8	22	200
14	180	16	27	200
15	220	24	32	200
16	280	32	38	200

Однак схильність до утворення тріщин, пов'язана з деформаціями металу шву, які зумовлені впливом навколишнього металу та залежить і від інших чинників: протяжності температурного інтервалу крихкості, щодо відповідного подовження в цьому інтервалі, темпу наростання деформацій розтягування. Тому постійний обсяг вимірюваної бази в інтервалі кристалізації не є фактором, який неминуче призводить до утворення кристалізаційних тріщин – він тільки свідчить про тенденцію зростання небезпеки розтріскування. Залежності, що отримані при дослідженні зварювання пластин алюмінію зі швидкістю 8 м/год (рис. 2, а), свідчить про наявність деформацій стиснення в період перебування металу шва в твердорідкому стані, як при підігріві зразків, так і без нього. У разі збільшення швидкості зварювання до 16 м/год, твердіє метал шву при зварюванні пластин без підігріву, який спочатку піддавався впливу деформацій стиснення, а потім розтягування (рис. 2, б), що сприяє зниженню стійкості з'єднання, що зварюють, проти утворення кристалізаційних тріщин. Підігрів зразків при цій швидкості зварювання до 100° С і вище сприяє усуненню напруг, що розтягують в області перебування металу шва в твердорідкому стані. Подальше збільшення швидкості зварювання до 24 м/год призводить до того, що підігрів зразків до 100° С з метою усунення напруг, що розтягують, виявляється недостатнім (рис. 2, в). Наявність деформацій стиснення в період перебування металу шву в твердорідкому стані досягається при підігріві пластин до 150 і 200° С. Зі збільшенням швидкості зварювання до 32 м/год, що дозволяє забезпечити деформації стиснення в металі шва, що кристалізується, яке можливо лише при підігріві пластин до 200° С (рис. 2, г).

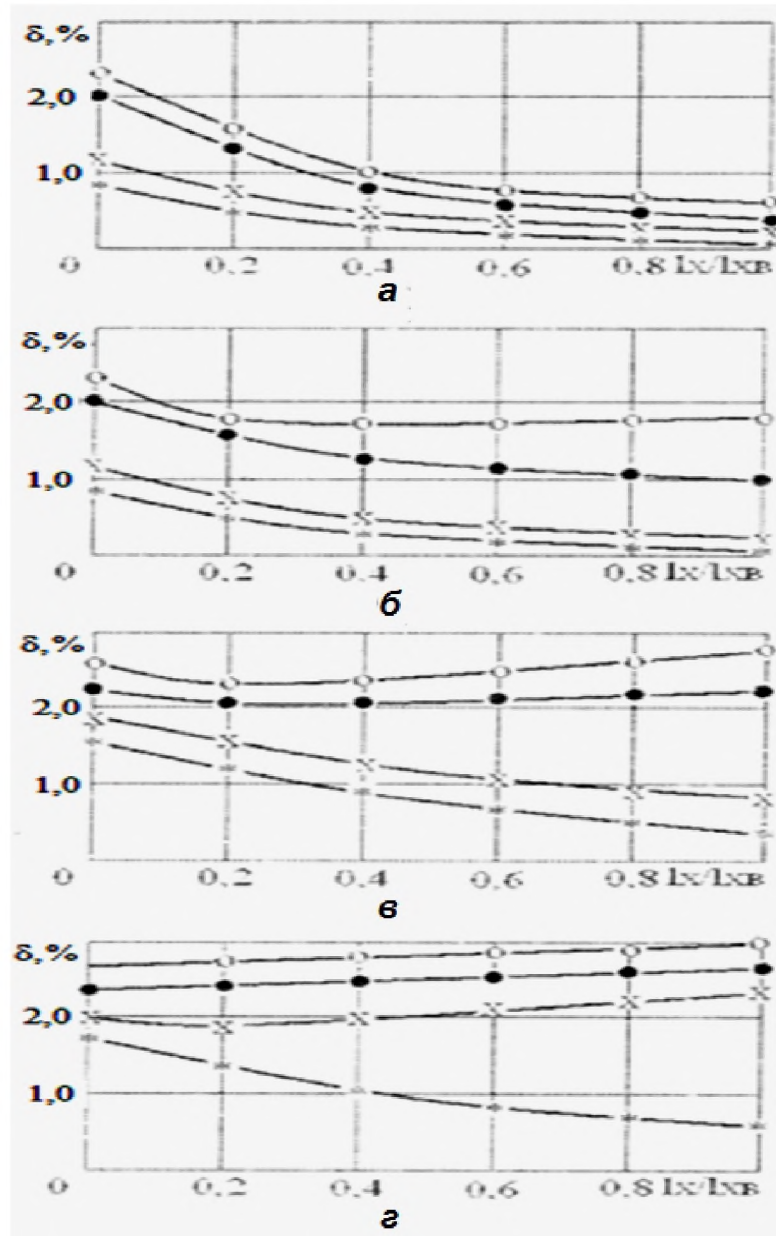


Рис 2. Відносні переміщення кромки, що зварюють в поперечному напрямку при:  
а –  $V_{св} = 8$  м/год; б –  $V_{св} = 16$  м/год; в –  $V_{св} = 24$  м/год; г –  $V_{св} = 32$  м/год;  
о-о –  $T_p = 20^\circ C$ ; ●-● –  $T_p = 100^\circ C$ ; х-х –  $T_p = 150^\circ C$ ; \*-\*-  $T_p = 200^\circ C$

### Висновки

При зварюванні пластин з алюмінію марки АД0 завтовшки 4 мм збільшення швидкості зварювання з 8 до 32 м/год призводить до появи напруг, що розтягують, в області перебування металу шву у твердорідкому стані, що може призводити до виникнення кристалізаційних тріщин. При зварюванні без підігріву виникнення кристалізаційних тріщин найменш ймовірно при  $V_{св} = 8$  м/год. Попередній підігрів пластин алюмінію марки АД0 завтовшки 4 мм сприяє усуненню напруг, що розтягують, в області перебування металу шву у твердорідкому стані і, як наслідок, підвищенню стійкості зварного з'єднання проти утворення кристалізаційних тріщин. Отримані результати можуть бути використані для вибору оптимальних режимів зварювання алюмінію марки АД0, яке безпечне з точки зору кристалізаційного розтріскування.



**Список использованных источников:**

1. Жданов И. М. О деформациях металла шва в процессе кристаллизации при автоматической сварке / И. М. Жданов // *Сварочное производство*. – 1992. – №4. – С. 26-28.
2. Borland I. C. Fundamentals of solidification cracking in welds. Part 1 / I. C. Borland // *Welding and Metal Fabrication*. – 1989. – No. 1. – Pp. 19-29.
3. Borland I. C. Fundamentals of solidification cracking in welds. Part 2 / I. C. Borland // *Welding and Metal Fabrication*. – 1999. – No 3. – Pp. 99-107.
4. Matsuda F. Moving characteristics of weld edges during solidification in relation to solidification cracking in GTA weld of aluminium alloy thin sheet / F. Matsuda, K. Nakata, S. Harada // *Trans. IWRI*. – 1990. – Vol. 9, No 2. – Pp. 83-93.
5. Chichoski R. A. The character of stress fields around a weld arc moving on aluminium sheet / R. A. Chichoski // *Welding Journal*. – 1992. – Vol. 51, No 1. – Pp. 9-18.
6. Chichoski R. A. Understanding weld cracking in aluminium sheet / R. A. Chichoski // *Welding Journal*. – 2016. – no.4. – Pp. 24-30.
7. Chichoski R. A. Expansion and stress around aluminium weld puddles / R. A. Chichoski // *Welding Journal*. – 1989. – Vol. 58, No 9. – Pp. 263-267.
8. Семенов Н. И. Анализ изменения поперечных деформаций металла в зоне шва при аргодуговой сварке алюминиевых сплавов / Н. И. Семенов, Д. М. Рабкин // *Автоматическая сварка*. – 1990. – № 9. – С. 19-22.
9. Рабкин Д. М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов* / Д. М. Рабкин. – Киев : Наук. думка, 1996. – 256 с.
10. Якушин Б. Ф. Влияние режима сварки на технологическую прочность алюминиевых сплавов / Б. Ф. Якушин, Д. М. Чернавский // *Сварочное производство*. – 1992. – № 11. – С. 1-3.
11. Рабкин Д. М. Влияние эффективного интервала кристаллизации на склонность алюминиевых сплавов к образованию горячих трещин при сварке / Д. М. Рабкин, В. Г. Игнатьев, И. В. Довбищенко // *Автоматическая сварка*. – 1994. – № 4. – С. 13-14.
12. Чернавский Д. М. Измерение перемещений свариваемых кромок при затвердевании металла шва / Д. М. Чернавский, Б. Ф. Якушин // *Автоматическая сварка*. – 1993. – № 2. – С. 36-40.

**References**

1. Zhdanov, IM 1992, 'O deformacijah metalla shva v processe kristallizacii pri avtomaticheskoi svarke', *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 4, pp. 26-28.
2. Borland, IC 1989, 'Fundamentals of solidification cracking in welds. Part 1', *Welding and Metal Fabrication*, no. 1, pp. 19-29.
3. Borland, IC 1999, 'Fundamentals of solidification cracking in welds. Part 2', *Welding and Metal Fabrication*, no 3, pp. 99-107.
4. Matsuda, F, Nakata, K & Harada, S 1990, 'Moving characteristics of weld edges during solidification in relation to solidification cracking in GTA weld of aluminium alloy thin sheet', *Trans. IWRI*, vol. 9, no 2, pp. 83-93.
5. Chichoski, RA 1992, 'The character of stress fields around a weld arc moving on aluminium sheet', *Welding Journal*, vol. 51, no 1, pp. 9-18.
6. Chichoski, RA 2016, 'The character of stress fields around a weld arc moving on aluminium sheet', *Welding Journal*, no. 4, pp. 24-30.
7. Chichoski, RA 1989, 'Understanding weld cracking in aluminium sheet', *Welding Journal*, vol. 58, no 9, pp. 263-267.
8. Semenuk, NI & Rabkin, DM 1990, 'Analiz izmenenija poperechnyh deformacij metalla v zone shva pri argonodugovoi svarke aljuminievyh splavov', *Avtomaticheskaja svarka*, no. 9, pp. 19-22.
9. Rabkin, DM 1996, *Metallurgija svarki plavljeniem aljuminija i ego splavov*, Naukova dumka, Kiev.
10. Jakushin, BF & Chernavskij, DM 1992, 'Vlijanie rezhima svarki na tehnologicheskiju prochnost aljuminievyh splavov', *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 11, pp. 1-3.
11. Rabkin, DM, Ignatev, VG & Dovbishhenko, IV 1994, 'Vlijanie jeffektivnogo intervala kristallizacii na sklonnost aljuminievyh splavov k obrazovaniju gorjachih treshhin pri svarke', *Avtomaticheskaja svarka*, no. 4, pp. 13-14.
12. Chernavskij, DM & Jakushin, BF 1993, 'Izmerenie peremeshhenij svarivaemyh kromok pri zatverdevanii metalla shva', *Avtomaticheskaja svarka*, no. 2, pp. 36-40.

Стаття надійшла до редакції 19 жовтня 2019 р.