

DOI 10.32820/2079-1747-2020-25-137-144

УДК 621.791.037

**ПРО МОЖЛИВІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУГ В ЗОНІ СТИКОВОГО З'ЄДНАННЯ СПЛАВА АМГЗ ПРИ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ЕЛЕКТРОДОМ, ЩО НЕ ПЛАВИТЬСЯ, У АРГОНІ**

©Сітніков Б.В., Маршуба В.П.

**Інформація про авторів:**

**Сітніков 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.

Наведено відомості про вплив параметрів режиму імпульсно-дугового зварювання неплавким електродом в аргоні на розподіл залишкових напружень в зоні стикового з'єднання сплаву АМГЗ товщиною 2 мм, які можуть бути використані при виборі режимів зварювання, що дозволяють підвищити експлуатаційні характеристики зварних конструкцій і їх технологічність. Показано, що збільшення жорсткості режиму зварювання за рахунок зменшення часу протікання струму імпульсу призводить до зниження величини максимальних напруг, що розтягують, і ширини зони їх дії. Встановлено, що зі збільшенням часу циклу зварювання рівень залишкових напружень підвищується.

Для дослідження впливу тривалості циклу зварювання на величину максимальних напруг, що розтягують і ширину їх дій в зоні стикового з'єднання були проведені експерименти при  $T_{ц} = 0,80$  с,  $T_{ц} = 0,64$  с і  $T_{ц} = 0,48$  с. Тривалість імпульсу і паузи, протягом кожного циклу зварювання, змінювалася від 0,16 до 0,32 с. За результати проведених досліджень, при тривалості імпульсу  $t_i = 0,24$  с. видно що, зі збільшенням часу циклу зварювання величина максимальних напруг, що розтягують і ширина їх дії в зоні стикового з'єднання підвищуються. При цьому у всіх трьох випадках зі збільшенням тривалості дії струму імпульсу рівень залишкових напружень і ширина їх дій в зоні стикового з'єднання збільшуються. Аналогічна картина розподілу залишкових зварювальних напружень в зоні стикового з'єднання спостерігається і від тривалості паузи. Зі збільшенням часу дії струму паузи зростає величина максимальних напруг, що розтягують і ширина зони їх дії.

**Ключові слова:** імпульсно-дугове зварювання, вольфрамовий електрод, аргон, сплав АМГЗ, погонна енергія, залишкові напруги.

**Ситников Б.В., Маршуба В.П.** «О возможности регулирования остаточных напряжений в зоне стыкового соединения сплава АМГЗ при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом в аргоне»

Приведены сведения о влиянии параметров режима импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в аргоне на распределение остаточных напряжений в зоне стыкового соединения сплава АМГЗ толщиной 2 мм, которые могут быть использованы при выборе режимов сварки, позволяющие повысить эксплуатационные характеристики сварных конструкций и их технологичность. Показано, что увеличение жесткости режима сварки за счет уменьшения времени протекания тока импульса приводит к снижению величины максимальных

растягивающих напряжений и ширины зоны их действия. Установлено, что с увеличением времени цикла сварки уровень остаточных напряжений повышается.

Для исследования влияния продолжительности цикла сварки на величину максимальных растягивающих напряжений и ширину их действий в зоне стыкового соединения были проведены эксперименты при  $T_{\text{ц}} = 0,80$  с,  $T_{\text{ц}} = 0,64$  с і  $T_{\text{ц}} = 0,48$  с. Длительность импульса и паузы, в течение каждого цикла сварки, изменялась от 0,16 до 0,32 с. По результатам проведенных исследований, при длительности импульса  $t_i = 0,24$  видно что с увеличением времени цикла сварки величина максимальных растягивающих напряжений и ширина их действия в зоне стыкового соединения повышаются. При этом во всех трех случаях с увеличением продолжительности действия тока импульса уровень остаточных напряжений и ширина их действий в зоне стыкового соединения увеличиваются. Аналогичная картина распределения остаточных сварочных напряжений в зоне стыкового соединения наблюдается и от длительности паузы. С увеличением времени воздействия тока паузы возрастает величина максимальных растягивающих напряжений и ширина зоны их действия.

**Ключевые слова:** импульсно-дуговая сварка, вольфрамовый электрод, аргон, сплав АМг3, погонная энергия, остаточные напряжения.

*Sitnikov B., Marshuba V.* «About the ability to regulate residual voltage in the joint zone to the АМg3 alloy with pulsed-arc welding by an electrode, which does not melt, in argon».

It has been suggested that the parameters are reduced in the pulse-arc welding mode by a non-fusible electrode in argon to isolate the excess voltage in the joint zone in the 2 mm alloy, because there are some variations in the welding mode. It is shown that the increase of the harshness of the welding mode due to the decrease in the time of the impulse current results in decreasing the maximum voltage and the width of its action area. It has been substantiated that due to the increase of the cycle length the level of residual voltage goes up.

For the sake of investigating the influence of the welding cycle length on the value of the maximum voltage, which extends, and the width of its impact in the joint zone, the experiment at  $T_{\text{ц}}=0,80$  s,  $T_{\text{ц}}=0,64$  s і  $T_{\text{ц}}=0,48$  s was conducted. Trivial impulse and pause, at each welding cycle, fluctuated between 0.16 and 0.32 s. The results of the performance, at trivial impulse  $t_i=0,24$  s., make it visible that, due to the increase in the welding cycle duration, the value of the maximum voltage, which extends, and the width of its impact in the joint zone increases too. In all the three cases, due to trivial discharges and impulses, the level of residual voltage and the width of it in the joint zone increases as well. The picture is similar to the increase of residual welding voltage in the joint zone, which is also possible due to the pause duration. As the pause time increases, the value of maximum voltage and the width of its area of action increase.

**Keywords:** pulse-arc welding, tungsten electrode, argon, alloy АМg3, running heat, residual voltage.

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

Місцевий нагрів металу при зварюванні в значній мірі є визначальним фактором утворення та розвитку деформацій і напружень в зоні термічного впливу. У свою чергу, їх рівні та зона поширення можуть істотно відбитися на точності, технологічності і трудомісткості виготовлення зварної конструкції, а також на її експлуатаційні характеристики. Найбільшою мірою це відноситься до тонкостінних конструкцій з великою кількістю і дов-

жиною зварних швів, особливо якщо вони виготовлені з легких сплавів [1-3]. Під час виготовлення зварних конструкцій спотворюються проектні форми і розміри виробів, на відновлення яких витрачається багато праці. Проведення різних технологічних операцій при виготовленні зварної конструкції, наприклад, таких як механічна обробка, призводить до перерозподілу напружень, спотворення розмірів конструкції, в деяких випадках до руйнувань в місцях концентраторів [1, 4]. В умовах експлуатації залишкові напруги і пластичні деформації металу можуть сприяти зменшенню міцності, корозійної стійкості і жорсткості звареної конструкції. Обґрунтоване і грамотне застосування методів запобігання та усунення зварювальних напруг і деформацій дозволяє, з одного боку, економно виготовляти зварні конструкції, з іншого – суттєво підвищити їх якість і надійність [1, 4].

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

З метою регулювання та усунення зварювальних деформацій і напружень розроблено багато методів, які є досить ефективними у тому чи іншому випадку. Однією з основних принципових можливостей зменшення зварювальних деформацій і напружень є зниження пластичної деформації укорочення або ширини зони її поширення при нагріванні шляхом регулювання термічного впливу при зварюванні [3, 4]. На цьому принципі засновані способи регулювання зварювальних деформацій і напружень, що передбачають вплив на теплові характеристики процесу, пов'язаного з підбором відповідних режимів зварювання з урахуванням зменшення обсягу пластичного укорочення, загальним або локальним підігрівом деталей перед зварюванням і штучним тепловідведенням від зони шва [3, 5].

На думку ряду авторів, застосування оптимальних полів підігріву дає можливість отримувати зварні з'єднання з порівняно невеликими залишковими напруженнями. При цьому їх сумарна величина істотно залежить від розташування і розмірів зони підігріву. Для призначення підігріву потрібно вказати профіль температурного поля (початок і кінець зони підігріву, максимальний рівень температури і перетин, в якому він досягається). Зі збільшенням товщини зварювальних деталей потрібно вести підігрів в області значно віддаленій від шва до більш високих температур. Для матеріалів з великими значеннями механічних характеристик підігрів слід вести ближче до шву і збільшувати максимальну температуру підігріву. Однак, про застосування підігріву для зменшення рівня зварювальних напруг і деформацій, серед дослідників немає єдиної думки в оцінці його ефективності. Крім того, підігрів деталей перед зварюванням вимагають значних енергетичних витрат [3].

Штучний тепловідвід при зварюванні можна здійснювати від зварного шва, зони термічного впливу або зварного шва і зони термічного впливу одночасно. Найпростішими тепловідвідними пристроями є мідні підкладки, що застосовуються для формування кореня шва при зварюванні шва з повним проплавленням крайок. Ефективність тепловідведення за допомогою підкладок залежить від їх розмірів, різниці температур підкладки і зварного з'єднання, термічного опору зони контакту підкладки і зварного з'єднання. Підвищують ефективність тепловідведення та стабілізують тепловідвідні властивості в тепловідвідних підкладках охолоджуючі канали. При використанні в процесі зварювання технологічних оснасток з різного роду притискними тепловідвідними накладками необхідний гарантований по всій

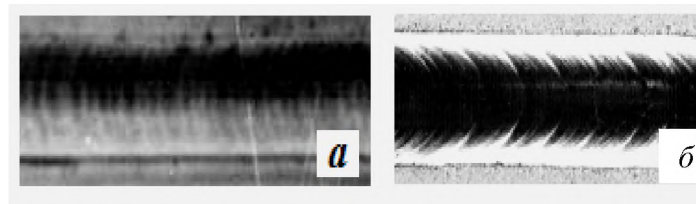
площі зіткнення теплової контакт. Це, як правило, нездійснено в повній мірі в разі протяжних зварних швів, і особливо при криволінійних поверхнях і складній формі конструкції. Крім того, такі спеціалізовані оснащення не універсальні, громіздкі і дорогі, а їх застосування нерідко вимагає значних затрат ручної праці [2]. Відомі приклади успішного використання охолоджуючих рідин, що контактують безпосередньо з поверхнею, що нагрівається [2, 6]. Але цей шлях в умовах реального виробництва потребує вирішення ряду проблем технологічного характеру, а також завдання захисту зони з'єднання, дуги і зварювальної ванни від води та її парів. Певні переваги дає застосування так званих теплопоглинальних паст. Ці пасти, що наносяться перед зварюванням в зоні термічного впливу або подаються на закристалізувався метал шва слідом за рухомою дугою, забезпечують ефективний тепловідвід незалежно від форми, площі і просторового положення нагрітої поверхні [2, 3]. При цьому значна частина тепла, зазвичай переходить в основний метал, інтенсивно поглинається пастою. Однак при дуговому зварюванні пари води, інтенсивно виділяються з пасти, можуть негативно впливати на стабільність зварювального процесу. Переваги способів тепловідведення з використанням кристалічних теплопоглиначів полягають в їх простоті, високій технологічності та універсальності. Однак кристалічні теплопоглиначі є матеріалами, що витрачаються і можуть відводити тільки обмежену кількість тепла [2, 3]. Відомі [7] способи тепловідведення із застосуванням в якості теплопоглиначів низькотемпературних середовищ (рідкий азот, сухий лід). Такі методи досить ефективні з точки зору тепловідведення, але нетехнологічними через складність використання низькотемпературних середовищ, а також досить дорогі.

Одним із шляхів скорочення тривалості перебування металу в області несприятливих температур, зменшення залишкових напруг і деформацій є зварювання з підвищеною швидкістю. Однак, підвищення швидкості дугового зварювання призводить до зниження сил поверхневого натягу, що утримують рідкий метал з боку кореня шва, збільшення його провисання і утворення прижогів. Таке явище має місце практично при всіх способах дугового зварювання, тому ж небезпека виникнення дефектів зазвичай зростає із збільшенням струму і швидкості зварювання. Істотного збільшення сил поверхневого натягу можна досягти зміною кривизни поверхні зварювальної ванни за рахунок застосування імпульсних методів зварювання, які дозволяють отримати форму проплавити близьку до сферичної. При цьому процесі дуга пульсує з постійним заданим співвідношенням імпульсу і паузи. Зварений шов отримують шляхом розплавлення окремих точок з певним перекриттям. Крок точок, час розплавлення точок, пауза між постановкою точок регулюється, в зв'язку з цим змінюються умови нагріву та охолодження металу точки, що твердіє, величини її усадки і деформації, а отже, і величину залишкових напруг. Варіюючи параметрами імпульсного процесу, можна ефективно впливати на форму і розміри зварювальної ванни, кристалізацію металу, формування шва, тимчасові і залишкові деформації та інші показники процесу зварювання [8].

### **3. Виклад основного матеріалу.**

Автоматичне зварювання пластин розміром 300×2×200 мм виконували встик за один прохід в нижньому положенні вольфрамовим електродом марки ЕВЛ (ГОСТ 23949-80) діаметром 4 мм в аргоні вищого сорту (ГОСТ 10157-79) від джерела живлення ТІР-300Д з прис-

тавкою, що дозволяє регулювати процес проплавлення основного металу і формування шву за рахунок пульсації струму дуги з постійним заданим співвідношенням імпульсу і паузи (рис. 1). Установка дозволяла візуально спостерігати процеси в дузі і зварювальній ванні, проектувати їх зі збільшенням на екран, а також кінографіювати у відбитому світлі [9]. Газоподводящу апаратуру, шланги та зварювальний пальник ретельно промивали спиртом перед початком експериментів і регулярно очищали і промивали в процесі роботи. Зварювані зразки піддавалися спеціальній обробці по їх очищенню, яка полягала у видаленні консерваційного мастила розчинником і хімічній обробці для видалення окисної плівки [10, 11]. В ході експериментів змінювалися такі параметри: швидкість зварювання  $V_{zsv}$ ; величина зварювального струму  $I$  та тої, що діє в період імпульсу; тривалість  $t_i$  дії струму імпульсу. Загальна тривалість  $t_n$  дії струму чергової дуги; жорсткість режиму  $G = t_n / t_i$  і тривалість циклу  $T_u = t_i + t_n$ . Величину струму імпульсу встановлювали за умови однакової ширини проплавлення зі зворотнього боку шва. Струм чергової дуги під час паузи не чинив істотного впливу на глибину проплавлення і не перевищував 15 А. Витрата захисного газу у всіх дослідах залишалася постійною і дорівнювала 9 л / хв. Визначення залишкових напруг в зразках проводили за допомогою механічного тензометра за методикою наведеною в роботі [1].



**Рис. 1** Зовнішній вигляд шва  $\times 2$ : а –  $G = 0$ ; б –  $G = 1$

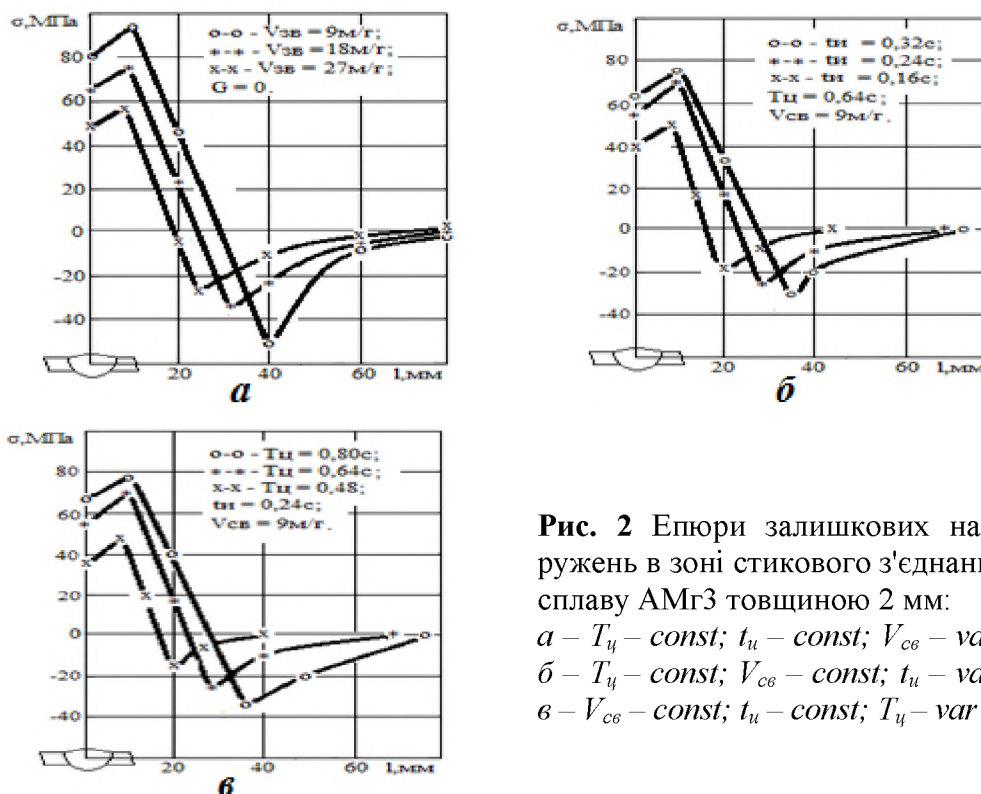
На рис. 2, а представлені результати досліджень залишкових напружень в зоні стикових з'єднань алюмінієвого сплаву АМг3 товщиною 2 мм, виконаних зі швидкістю зварювання 9, 18 і 27 м/г. Як видно з наведених залежностей, зі збільшенням швидкості зварювання з 9 до 27 м/г величина максимальних напруг, що розтягують і ширина їх дії в зоні стикового з'єднання помітно зменшується. Так, наприклад, при зварюванні зі швидкістю 9 м/г, ширина напруг, що розтягують в зоні стикового з'єднання становить 71 мм, а при зварюванні зі швидкістю 18 і 27 м/г, відповідно, 57 і 23 мм; величина максимальних напруг, що розтягують при зварюванні зі швидкістю 9 м/г дорівнює 90 МПа, а при зварюванні зі швидкістю 18 і 27 м/г, відповідно, 75 і 55 МПа.

Отримані результати, очевидно, слід пояснити наступним чином. Величина і характер розподілу зварювальних напружень в зоні стикового з'єднання знаходиться в прямій залежності від величини погонної енергії при зварюванні [1, 4]. При малих швидкостях зварювання проплавляюча здатність дуги мінімальна і для отримання повного проплавлення крайок, що зварюються, необхідна значна погонна енергія, що призводить до зростання величини напруг, які розтягують, та ширину зони їх дій. Зниження проплавляючої здатності дуги при малих швидкостях зварювання пояснюють зменшенням інтенсивності витіснення рідкого металу в хвостову частину зварювальної ванни [12]. У основи дуги утворюється шар рідкого металу, який перешкоджає проплавленню основного металу. Підвищення швидкості зварювання



сприяє витісненню рідкого металу в хвостову частину зварювальної ванни (рис. 3), збільшення проплавляючої здатності дуги і, як наслідок, зниження погонної енергії необхідної для забезпечення повного проплавлення крайок, що звариваються.

Величина максимальних напруг, що розтягують, і ширина їх дії в зоні стикового з'єднання в значній мірі визначається і жорсткістю режиму зварювання. У першому випадку, при постійній тривалості циклу  $T_{ij} = 0,64$  с, її регулювали за рахунок зміни тривалості імпульсу, в другому – тривалості паузи. Як видно з наведених залежностей (рис. 2, б), збільшення жорсткості режиму зварювання за рахунок зменшення часу дії струму імпульсу з 0,32 до 0,16 с. призводить до зниження величини максимальних напруг, що розтягують, і ширини зони їх дії.



**Рис. 2** Епюри залишкових напружень в зоні стикового з'єднання сплаву АМг3 товщиною 2 мм:  
 а –  $T_{ij} - const; t_u - const; V_{св} - var$ ;  
 б –  $T_{ij} - const; V_{св} - const; t_u - var$ ;  
 в –  $V_{св} - const; t_u - const; T_{ij} - var$



**Рис. 3** Фрагмент швидкісний кінозйомки процесу дугового зварювання неплавким електродом

Так, наприклад, при  $t_i = 0,32$  з ширина напруг, що розтягують в зоні стикового з'єднання становить 48 мм, а при  $t_i = 0,24$  і 0,16 с, відповідно, 44 і 34 мм; величина максимальних напруг, що розтягують при  $t_i = 0,32$  с дорівнює 78 МПа, а при а при  $t_i = 0,24$  і 0,16 с, відповідно, 72 і 48 МПа. Таку різницю в розподілі напруг, мабуть, так само слід пояснити зміною величини погонної енергії при зварюванні. Вона знижується зі збільшенням жорсткості режиму, що і призводить до зменшення рівня залишкових напруг і ширини зони їх дії [8]. З підвищенням жорсткості режиму за рахунок збільшення тривалості паузи зростає відстань між

зварювальними точками (рис. 1, б), кристалізація і усадження металу відбуваються великою швидкістю і теплоотводом, що у всіх дослідах призводило до збільшення рівня залишкових напружень.

Величина максимальних напруг, що розтягують і ширина їх дії у зоні стикового з'єднання в значній мірі визначається і жорсткістю режиму зварювання. У першому випадку, при постійній тривалості циклу  $T_{\eta} = 0,64$  с, її регулювали за рахунок зміни тривалості імпульсу, в другому – тривалості паузи. Як видно з наведених залежностей (рис. 2, б), збільшення жорсткості режиму зварювання за рахунок зменшення часу дії струму імпульсу з 0,32 до 0,16 с. призводить до зниження величини максимальних напруг, що розтягують і ширини зони їх дії. Так, наприклад, при  $t_i = 0,32$  з ширина напруг, що розтягують в зоні стикового з'єднання становить 48мм, а при  $t_i = 0,24$  і 0,16 с, відповідно, 44 і 34 мм; величина максимальних напруг, що розтягують при  $t_i = 0,32$  с дорівнює 78 МПа, а при  $t_i = 0,24$  і 0,16 с, відповідно, 72 і 48 МПа. Таку різницю в розподілі напруг, мабуть, так само слід пояснити зміною величини погонної енергії при зварюванні. Вона знижується зі збільшенням жорсткості режиму, що і призводить до зменшення рівня залишкових напруг і ширини зони їх дії [8]. З підвищенням жорсткості режиму за рахунок збільшення тривалості паузи зростає відстань між зварювальними точками (рис.1, б), кристалізація і усадка металу, яка відбуваються великою швидкістю і тепловідводом, що у всіх дослідах призводило до збільшення рівня залишкових напруг.

Для дослідження впливу тривалості циклу зварювання на величину максимальних напруг, що розтягують і ширину їх дій в зоні стикового з'єднання були проведені експерименти при  $T_{\eta} = 0,80$  с,  $T_{\eta} = 0,64$  с і  $T_{\eta} = 0,48$  с. Тривалість імпульсу і паузи, протягом кожного циклу зварювання, змінювалася від 0,16 до 0,32 с. Результати проведених досліджень, при тривалості імпульсу  $t_i = 0,24$  с. наведені на рис. 2, в. Як видно з наведених залежностей, зі збільшенням часу циклу зварювання величина максимальних напруг, що розтягують і ширина їх дії в зоні стикового з'єднання підвищуються. При цьому у всіх трьох випадках зі збільшенням тривалості дії струму імпульсу рівень залишкових напружень і ширина їх дій в зоні стикового з'єднання збільшуються. Аналогічна картина розподілу залишкових зварювальних напруг в зоні стикового з'єднання спостерігається і від тривалості паузи. Зі збільшенням часу дії струму паузи зростає величина максимальних напруг, що розтягують і ширина зони їх дії.

### **Висновки**

Підвищення швидкості дугового зварювання неплавким електродом в аргоні сприяє зменшенню погонної енергії, величини напруг, що розтягують і ширини зони їх дії в стиковому з'єднанні сплаву АМг3 товщиною 2 мм. Збільшення жорсткості режиму зварювання за рахунок зменшення часу протікання струму імпульсу призводить до зниження величини максимальних напруг, що розтягують і ширини зони їх дії, а збільшення тривалості паузи призводить до їх підвищення. Зі збільшенням часу циклу зварювання від 0,48 до 0,80 с рівень залишкових напружень підвищується. При цьому, зі збільшенням часу дії струму імпульсу і паузи рівень залишкових напружень і ширина їх дії в зоні стикового з'єднання збільшуються.

**Список використаних джерел**

1. Винокуров В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1984. – 271 с.
2. Лобанов Л. М. Регулирование термдеформационных циклов при сварке листовых конструкций с применением теплопоглотителей / Л. М. Лобанов, В. П. Павловский, В. П. Логинов [и др.] // Автоматическая сварка. – 1990. – № 9. – С. 39–46.
3. Гедрович А. И. Применение теплоотводящих устройств для снижения сварочных деформаций и напряжений / А. И. Гедрович, А. Б. Жидков // Автоматическая сварка. – 2000. – № 2. – С. 45–49.
4. Касаткин Б. С. Напряжения и деформации при сварке / Б. С. Касаткин, В. М. Прохоренко, И. М. Чертов. – Киев : Высш. шк., 1987. – 246 с.
5. Лобанов Л. М. Технологические средства уменьшения деформаций и напряжений / Л. М. Лобанов. – Киев : Знание, 1983. – 146 с.
6. Казимиров А. А. Исследование различных условий теплоотвода при сварке пластин из АМг5В / А. А. Казимиров, А. Я. Недосека // Автоматическая сварка. – 1963. – № 7. – С. 51–58.
7. Прохоров Н. Н. Расчётный анализ влияния местных стоков теплоты на снижение продольных деформаций при сварке пластин встык / Н. Н. Прохоров, В. М. Полунин // Сварочное производство. – 1992. – № 1. – С. 3–5.
8. Сварка в машиностроении : справочник. В 4 - х т. / под ред. П. А. Ольшанского. – М. : Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 504 с.
9. Ильенко Н. А. Исследование процессов сварки при помощи фотокинографирования в отражённом потоке света / Н. А. Ильенко, В. Ф. Сидоренко, Б. Ф. Кусков. // Сварочное производство. – 1978. – № 6. – С. 50–51.
10. Киселёв С. Н. Газоэлектрическая сварка алюминиевых сплавов / С. Н. Киселёв, В. А. Хаванов. – М. : Машиностроение, 1972. – 176 с.
11. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов / Д. М. Рабкин. – Киев : Наук. думка, 1986. – 256 с.
12. Патон Б. Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Б. Е. Патон. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.

**References**

1. Vinokurov, VA & Grigorjanc, AG 1984, *Teorija svarocnyh deformacij i naprjazhenij*, Mashinostroenie, Moskva.
2. Lobanov, LM, Pavlovskij, VP, Loginov, VP et. al. 1990, 'Regulirovanie termodeformacionnyh ciklov pri svarke listovyh konstrukcij s primeneniem teplopoglotitelej', *Avtomaticheskaja svarka*, no. 9, pp. 39-46.
3. Gedrovich, AI & Zhidkov, AB 2000, 'Primenenie teplootvodjashhijh ustrojstv dlja snizhenija svarocnyh deformacij i naprjazhenij', *Avtomaticheskaja svarka*, no. 2, pp. 45-49.
4. Kasatkin, BS, Prohorenko, VM & Chertov, IM 1987, *Naprjazhenija i deformacii pri svarke*, Vysshaja shkola, Kiev.
5. Lobanov, LM 1983, *Tehnologicheskie sredstva umenshenija deformacij i naprjazhenij*, Znanie, Kiev.
6. Kazimirov, AA & Nedoseka, AJa 1963, 'Issledovanie razlichnyh uslovij teplootvoda pri svarke plastin iz AMg5V', *Avtomaticheskaja svarka*, no. 7, pp. 51-58.
7. Prohorov, NN & Polunin, VM 1992, 'Raschjotnyj analiz vlijanija mestnyh stokov teploty na snizhenie prodolnyh deformacij pri svarke plastin vстыk', *Svarocnoe proizvodstvo*, no. 1, pp. 3-5.
8. Olshanskij, PA (ed.) 1978, *Svarka v mashinostroenii*, vol. 1, Mashinostroenie, Moskva.
9. Ilenko, NA, Sidorenko, VF & Kuskov, BF 1978, 'Issledovanie processov svarki pri pomoshhi fotokinografirovanija v otrazhjonnom potoke sveta', *Svarocnoe proizvodstvo*, no. 6, pp. 50-51.
10. Kisel'jov, SN & Havanov, VA 1972, *Gazoelektricheskaja svarka aljuminievych splavov*, Mashinostroenie, Moskva.
11. Rabkin, DM 1986, *Metallurgija svarki plavljeniem aljuminija i ego splavov*, Naukova dumka, Kiev.
12. Paton, BE 1974, *Tehnologija jelektricheskoi svarki metallov i splavov plavljeniem*, Mashinostroenie, Moskva.

Стаття надійшла до редакції 14 лютого 2020 р.