



Сварка трением с перемешиванием  
высокопрочного алюминиево-литиевого  
сплава В-1469

В.И. Лукин

*доктор технических наук*

Е.Н. Иода

А.В. Базескин

И.П. Жегина

*кандидат технических наук*

Л.В. Котельникова

В.В. Овчинников

*доктор технических наук*

Август 2011

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Сварочное производство», № 4, 2012 г.

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

## **Сварка трением с перемешиванием высокопрочного алюминиево-литиевого сплава В-1469**

В.И. Лукин<sup>1</sup>, Е.Н. Иода<sup>1</sup>, А.В. Базескин<sup>1</sup>, И.П. Жегина<sup>1</sup>,  
Л.В. Котельникова<sup>1</sup>, В.В. Овчинников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов», г. Москва

<sup>2</sup> ОАО «РСК „МиГ”», г. Москва

*Приведены результаты исследований влияния технологии исправлений дефектов, возникающих при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава В-1469 (повторный проход, ручная аргоно-дуговая сварка), и термической обработки на механические свойства и характер разрушения сварных соединений.*

**Ключевые слова:** сварка трением, термическая обработка, механические свойства, алюминиевый сплав.

*Exploration results of influence of technics of correction of the defects arising at the friction stir welding of aluminium alloy В-1469 (repeated pass, manual argon arc welding), and heat treatments on mechanical properties and character of shattering of welded joints are resulted.*

**Key words:** friction welding, heat treatments, mechanical properties, aluminium alloy.

В последнее время все большее промышленное применение при изготовлении сварных конструкций из алюминиевых сплавов находит процесс сварки трением с перемешиванием (СТП), обеспечивающий получение соединения со свойствами, во многом превосходящими свойства соединения, полученного дугowymi способами сварки. Так, в настоящее время NASA и «Lockheed Martin» применяют этот способ для сварки подвесных баков шаттлов из алюминиево-литиевых сплавов.

Технико-экономические преимущества процесса СТП делают его высокоэффективным для получения неразъемных соединений интегральных конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов. В ряде случаев процесс не имеет альтернативы – когда в соединение входят сплавы, не свариваемые или ограниченно свариваемые традиционными способами сварки плавлением. Кроме того, процесс легко поддается автоматизации и отличается высокой экологичностью.

Работу проводили на заготовках толщиной 4 мм, вырезанных из средней зоны плиты сплава В-1469 толщиной 35 мм. Заготовки сваривали в состоянии Т после закалки по режиму: 535°C, выдержка в течение 120 мин, охлаждение в воде.

Химический состав сплава В-1469 (%): Al – основа; 3,2 Cu; 0,3 Mg; 0,1 Mn; 1,2 Li; 0,09 Zr; 0,11 Sc; 0,4 Ag; 0,04 Fe; менее 0,1 Si.

Сварку трением с перемешиванием выполняли на экспериментальной установке на базе вертикально-фрезерного станка.

Была выбрана конструкция инструмента, рабочий стержень которого имеет форму усеченного конуса со спиральной нарезкой поверхности (рис. 1).



Рисунок 1. Внешний вид рабочего инструмента

Инструмент изготавливали из стали P18. Для формирования соединения сборочно-сварочное приспособление оснащено подкладкой с формирующей канавкой из титанового сплава.

С целью исключения образования дефектов типа непроваров в течение всего процесса сварки поддерживали заданную глубину погружения инструмента (0,8–0,9 толщины соединяемых кромок).

Для СТП заготовок из плит сплава В-1469 толщиной 4 мм выбран режим сварки, обеспечивающий оптимальное формирование сварного

соединения:  $v_{св}=130$  мм/мин; угол наклона инструмента  $\alpha=2$  град; частота вращения инструмента  $\omega=1000$  об/мин.

Для предотвращения расхождения кромок в процессе сварки стыковое соединение фиксировали на прихватах, выполненных в начале и в конце стыка ручной аргоно-дуговой сваркой.

После рентгеновского контроля из стыковых соединений вырезали образцы для механических испытаний по ГОСТ 6996–66. Результаты испытаний приведены в таблице.

Технологический вариант	Механические свойства		
	$\sigma_b$ , МПа	$\alpha$ , градус	KCU, кДж/м <sup>2</sup>
СТП, один проход	<u>310–340</u> 335	<u>60–70</u> 63	<u>180–245</u> 210
СТП + закалка + искусственное старение	<u>480–510</u> 490	<u>30–45</u> 38	<u>85–110</u> 95
СТП, два прохода	<u>275–300</u> 290	<u>20–33</u> 25	<u>154–231</u> 201
СТП + подварка АрДЭС	<u>180–220</u> 200	<u>28–32</u> 30	<u>27–52</u> 38

Учитывая, что прочность основного материала в закаленном состоянии составляет 420 МПа, а в закаленном и искусственно состаренном – 545 МПа, то прочность сварных соединений находится на уровне 0,8 от прочности основного материала в состоянии T при удовлетворительном уровне пластичности и ударной вязкости. Применение термической обработки сварных соединений по режиму термической обработки основного материала (закалка+искусственное старение 160°С, 40 ч, (T1)) позволяет повысить прочность сварного соединения до уровня 0,9 от прочности основного материала сплава В-1469-T1.

В зависимости от вида дефекта, возникающего при сварке, выбрали различную технологию ремонта. Для исправления таких дефектов, как рыхлоты, трещины и особенно непровары, применяли повторные проходы СТП. При наличии небольших внешних дефектов типа раковин, рыхлот и

непроваров их исправление осуществляли методом ручной аргоно-дуговой сварки, так как выполнение повторных проходов не всегда возможно.

Имитацию ремонтных вариантов проводили по следующим схемам:

- СТП + повторный проход СТП по основному режиму;
- СТП + ручная АрДЭС на глубину 0,5 от свариваемой толщины.

Для исправления дефекта типа рыхлоты (рис. 2, *а*) по центру шва выбирали канавку глубиной 1,8 мм и шириной 4 мм и заваривали с присадочным материалом Св-1201. Металлографические исследования сварных соединений показали, что применение аргоно-дуговой сварки позволяет устранить дефект. После подварки в некоторых швах возникает пористость по зоне сплавления. Структура переходной зоны характеризуется чередованием зон равноосного мелкого зерна и столбчатых кристаллов (см. рис. 2, *б*).

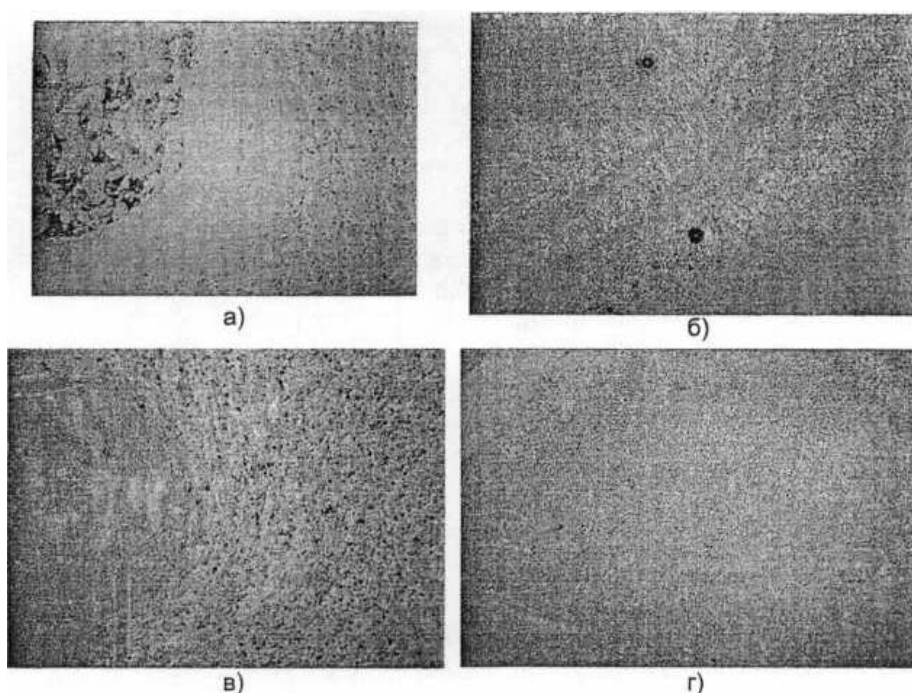


Рисунок 2. Микроструктура сварного соединения:

*а* – дефект, подлежащий исправлению,  $\times 50$ ; *б* – подварка АрДЭС,  $\times 50$ ;  
*в*, *г* – повторный проход СТП,  $\times 100$

Повторный проход СТП также устраняет дефект типа рыхлоты (см. рис. 2, *в*) и не приводит к росту зерна в центре шва. Размер равноосных зерен, как и до подварки, составляет 5–6 мкм (см. рис. 2, *г*).

Повторный проход СТП снижает прочность соединения на 10–15%, пластичность – в 2–3 раза. При этом значения ударной вязкости остаются примерно на том же уровне.

Применение в качестве ремонтного варианта ручной аргоно-дуговой сварки приводит к значительному снижению всех механических характеристик.

Для оценки характера разрушения сварных соединений при испытании на статическое растяжение и ударный изгиб проводили фрактографический анализ на электронном сканирующем микроскопе JSM6490LV фирмы «JEOL» (Япония).

На поверхности излома после сварки в один проход наблюдается слоистость в виде участков с непроваром (отдельные слои перемешиваемого металла с гладкой поверхностью) (рис. 3, *а*), рыхлотой (микронесплошности усадочного происхождения, имеющие строение в виде хаотично расположенных ячеек овальной формы) (рис. 4) и межзеренным изломом. Наличие участков с непроваром свидетельствует о недостаточном перемешивании при образовании сварного шва, появление рыхлоты межзеренного излома может быть связано с перегревом. После сварки в два прохода участки с непроваром встречаются редко, отсутствуют фрагменты с гладкой поверхностью (см. рис. 3, *б*), в отдельных случаях увеличивается количество рыхлот. Разрушение проходит в основном по механизму ямочного разрыва (рис. 5).

После одного прохода СТП присутствует мелкоямочный малопластичный излом (см. рис. 5, *а*). После второго прохода излом более шероховатый, что свидетельствует о его большей пластичности (см. рис. 5, *б*).

После подварки ручной аргоно-дуговой сваркой непровары отсутствуют, в изломе наблюдается большое количество пор, рыхлот, разрушение преимущественно межзеренное. Наблюдается разнотернистость (рис. 6, *а, б*), много интерметаллидных частиц на границах зерен (см. рис. 6, *в*).



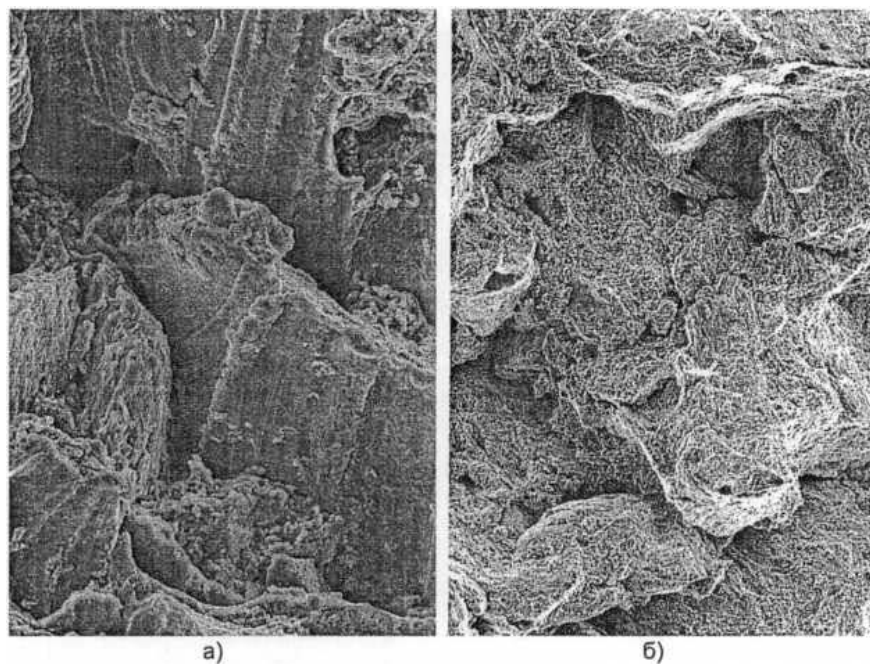


Рисунок 3. Строение излома после испытания на растяжение:  
*a* – непровар после сварки в один проход,  $\times 500$ ; *б* – отсутствие непровара  
после сварки в два прохода,  $\times 100$

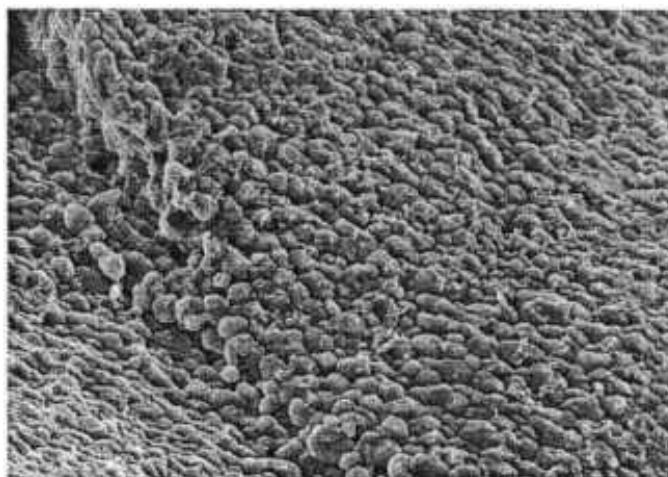


Рисунок 4. Строение участка с рыхлотой,  $\times 1000$

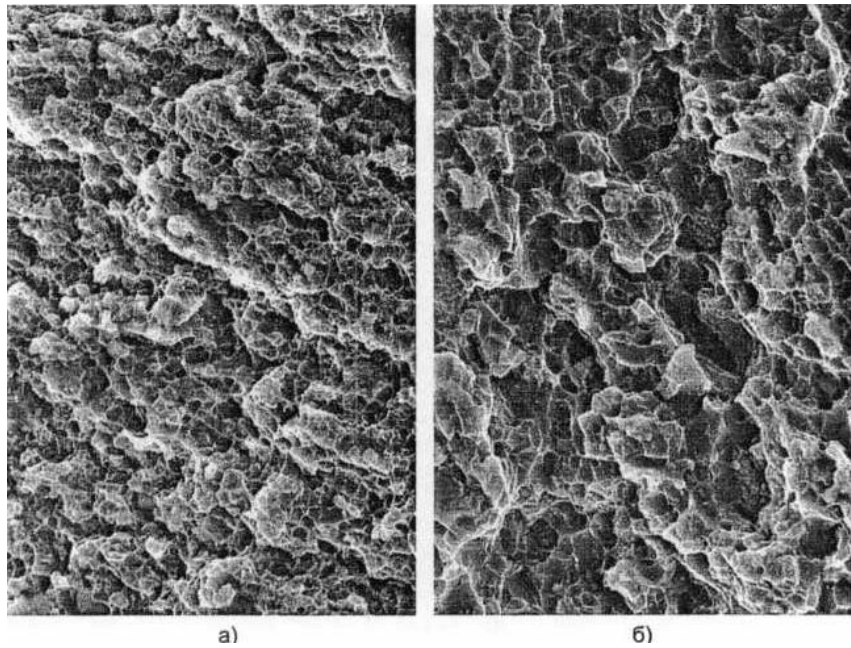


Рисунок 5. Стрoение излома ( $\times 2000$ ) после испытания на КСУ:  
*a* – ямочный рельеф после одного прохода; *б* – то же, после двух проходов

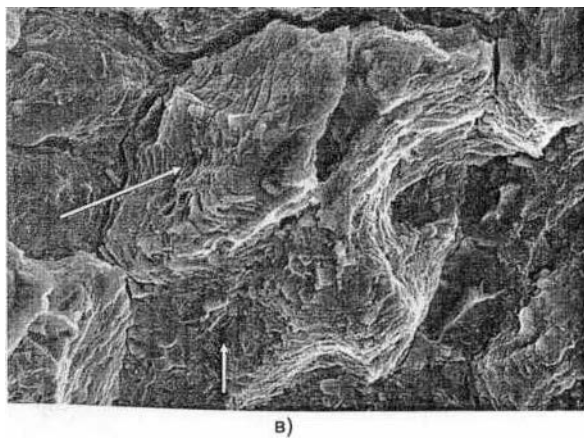
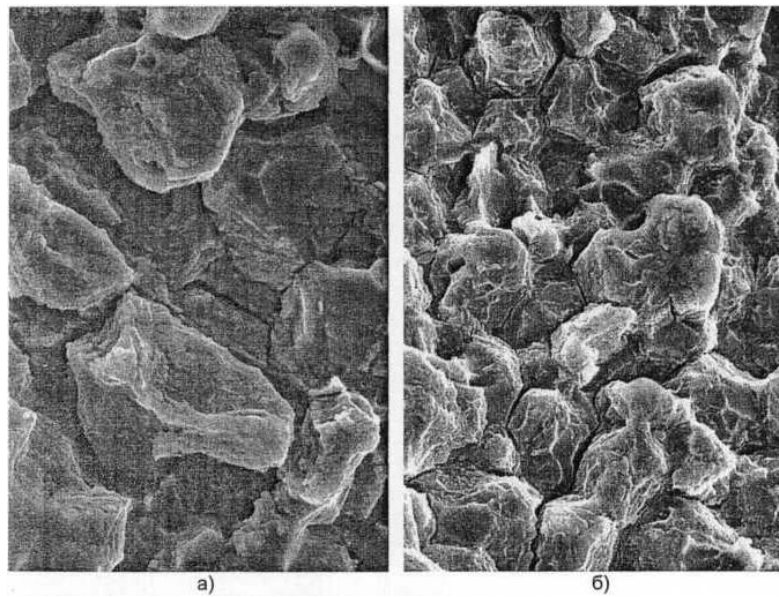


Рисунок 6. Стрoение излома ( $\times 2000$ ) после подварки АрДЭС:  
*a, б* – межзеренный излом, разнoзернистoсть; *в* – частицы интерметаллидных фаз (по стрелке) на поверхности зерна после испытания на  $\sigma_B$

## **Выводы**

Выбран режим сварки трением с перемешиванием (СТП), позволяющий получить качественное формирование сварного соединения на заготовках из плиты сплава В-1469 толщиной 4 мм.

Прочность сварных соединений составляет около 80% от прочности основного материала при удовлетворительном уровне пластичности и ударной вязкости. Применение термической обработки сварных соединений по режиму термической обработки основного материала (Т1) позволяет повысить прочность сварного соединения до 0,9 от прочности основного материала.

Повторные проходы СТП, применяемые для устранения дефектов, снижают прочностные характеристики сварного соединения на 10–15% и пластичность – в 2–3 раза. Применение в качестве ремонтного варианта ручной аргоно-дуговой сварки приводит к значительному снижению механических свойств.

Установили, что основными дефектами являются непровары, связанные с недостаточным перемешиванием металла, особенно в корневой части соединения, и рыхлоты, возникающие при перегреве свариваемого металла.

Исправление дефектов СТП с использованием ручной аргоно-дуговой сварки приводит к значительному порообразованию и хрупкому межзеренному разрушению, связанному с выделением большого количества интерметаллидных частиц по границе зерен.