

**Бахматов П. В.**  
**P. V. Bakhmatov**

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ  
НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ANALYTICAL EVALUATION PROCESS FORMATION OF THE PERMANENT CON-  
NECTION OF CONSTRUCTION MATERIALS**



**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: bp\_1@mail.ru.

**Mr. Pavel V. Bakhmatov**, PhD., assistant professor of «Welding Technology» Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: bp\_1@mail.ru

**Аннотация.** В статье проведен подробный анализ дефектов сварных соединений конструкций при использовании различных способов сварки, установлены причины их появления.

**Summary.** The article gives a detailed analysis of the defects of welded joints of structures using different methods of welding, set the cause.

**Ключевые слова:** сварка, порообразование, разделительные операции, конструкционные материалы, механические свойства, дефектный поверхностный слой, газосодержание, коэффициент использования металла.

**Key words:** welding, pore formation, separation operations, construction materials, mechanical properties, the defective surface layer, gas content, metal recovery

УДК 621.791.947.2

В ходе технологических операций сварки различных конструкционных материалов разнообразными способами сварки велика вероятность появления проблем, связанных с изменением механических свойств по отношению к основному металлу, возникновением напряжений и деформаций, а вместе с тем и структурной неоднородности, образованием дефектов различной этимологии. В работе проведены анализ дефектов при производстве сварных конструкций с целью определения причин их появления и перспектива дальнейших исследований для поиска возможностей их устранения.

**Методика проведения исследований**

Анализ технологичности изготовления, свойств и дефектов проводили по результатам входного и технологического контроля материалов и деталей, изготовленных сваркой плавлением и оценкой возможности изготовления деталей, получение которых связано с высокой трудоемкостью и малым коэффициентом использования металла (КИМ) (фрезерование, штамповка) диффузионной сваркой и сваркой трением с перемешиванием (СТП).

**Сварка титановых конструкций летательных аппаратов.** Статистическому анализу подвергались результаты контроля при дефектоскопии 57242 мест в сварных швах панели центроплана, деталей хвостовой части фюзеляжа, защитного устройства и др. Толщина соединяемых заготовок не превышала 6 мм и 3880 мест 24 видов шпангоутов, 188 мест лонжеронов и других деталей толщинами от 6 до 200 мм.

Основными видами сварных соединений в изготавливаемых по серийной технологии конструкциях были стыковые и тавровые. Использовались следующие виды сварки: автома-

**Бахматов П. В.**

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

тическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, сварка погруженным вольфрамовым электродом и электронно-лучевая сварка (ААрДЭС, СПВЭ и ЭЛС). ААрДЭС стыковых и тавровых соединений листовых заготовок в серийном производстве осуществляется на специальных стапелях (УСПО-2,6) автоматом АДСВ-6 с применением в качестве защиты аргона высшей очистки, присадочной проволоки ВТ1-00 и неплавящегося вольфрамового электрода диаметром от 1,6 до 3 мм. СПВЭ заготовок из штамповок сплава ВТ20 осуществлялась на специализированной сварочной установке типа ГСПД-1М, изготовленной предприятием АО «Электромеханика» (г. Ржев). ЭЛС в вакууме в серийном производстве осуществлялась на установке ЭЛУ-21.

Качество сварных соединений контролировалось: визуально-оптическим осмотром, испытаниями механических свойств, анализом содержания примесей газов, рентгеноскопией, капиллярной дефектоскопией и др. Кроме того, осуществлялся 100-процентный контроль защитных газов аргона и гелия (проверялся каждый баллон) на содержание влаги и примесей газов в них.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

*Анализ результатов испытаний сварных соединений панелей* показывает, что их механические свойства – предел прочности и угол изгиба – находятся в пределах допуска требований ОСТ 1.90000-70 для основного металла ( $\sigma_b = 980...1060$  МПа и угол загиба  $30...50^\circ$ ). Из сопоставления результатов анализа испытаний механических свойств основного металла и сварных соединений видно, что прочность сварного соединения на 8...12 % меньше прочности основного металла.

*Анализ результатов испытания механических свойств сварных соединений штамповок* показывает, что предел прочности и ударная вязкость соответствуют требованиям для сварных конструкций (950 МПа и ударную вязкость  $60$  Дж/см<sup>2</sup>), т.е. укладываются в допустимые пределы для основного металла. Ударная вязкость металла зоны сплавления для большинства соединений –  $45$  Дж/см<sup>2</sup>, а металла шва составляет  $55$  Дж/см<sup>2</sup>. Причем после ЭЛС наблюдается снижение ударной вязкости в 1,5...2 раза по сравнению со сваркой погруженным неплавящимся электродом.

По результатам механических испытаний образцов металла шва по ГОСТ 6996-66 установлено, что пределы прочности и текучести идентичны как для основного металла, так и для металла шва, значения относительного сужения и удлинения укладываются в нормы для основного металла (ОСТ 1.90000-70). Незначительное снижение удлинения и сужения металла шва по сравнению с основным металлом объясняется развитием химической структурной неоднородности в сварном шве.

Содержание водорода, азота, кислорода у большинства сварных соединений соответствует требованиям ОСТ 1.90013-71 и составляет: водорода – 0,0025 %, азота – 0,03 %, кислорода – 0,045 %.

*Анализ дефектов и недостатков различных способов сварки.*

**Сварка ААрДЭС.** 37 % от общего количества дефектов – визуально обнаруженные: подрезы – 14 %; характерный для тавровых соединений дефект – неоформленная галтель – 12 %; включения меди (подплавление оснастки) – 8 %; непровары – 3 %.

Рентгеноскопия сварных соединений деталей выявила 2,2 % дефектов из 57242 мест контроля. Поры – наиболее встречаемый из внутренних дефектов (43 %), диаметр одиночных пор 0,1...2,0 мм. Обнаруживаются цепочки пор, образующие почти сплошную линию; несплавления составляют – 12 %, размер несплавлений – 0,8...10 мм; вольфрамовые включения – 9 %, диаметр вольфрамовых включений – 1,1...4,5 мм; трещины – 6 %, глубина трещин – 1,5...11 мм. Отдельные дефекты имеют размер от 38 до 80 мм. Несплавления, трещины, как правило, располагаются в конце сварных швов.

Снижение пористости в сварных швах – одна из важнейших проблем, стоящих при изготовлении конструкций из титановых сплавов: количество контролируемых мест в конструкции – 15...180 и в случае дефектности хотя бы одного места необходима доработка детали (исправление дефекта), что увеличивает трудоемкость изготовления конструкции, а в отдельных случаях и невозможно.



**СПВЭ.** Общий уровень дефектности не превышает 2 %, а в зависимости от сечения свариваемых заготовок колеблется от 0,5 до 1,0 %. Анализ дефектов выявленных рентгенографией сварных соединений (3880 контрольных мест) установил основные дефекты: поры, непровар – нерасплавленная вставка (минимальный уровень дефектности), вольфрамовые включения (наибольший уровень дефектности). Дефекты располагаются преимущественно в центральной зоне металла шва. Размер пор и вольфрамовых включений составляет ~ 2 мм, нерасплавленная вставка (непровар) ~ 4 мм.

При сварке за один проход дефектов почти в 2 раза меньше, чем при сварке в два прохода. Дефектов в ОШЗ и ЗТВ не обнаруживается.

Анализ уровня дефектности при СПВЭ показывает, что образование нерасплавленной вставки (непровара) связано с малой глубиной проплавления за один проход, а вольфрамовые включения – с низкой стойкостью вольфрамовых электродов.

**ЭЛС.** Анализ дефектов сварных соединений, выполненных ЭЛС, выявленных рентгенографией 2188 мест показал, что обнаруживаются дефекты: поры, непровар, несплавления, подрезы, общий уровень которых не превышает 1,2 % от общего числа проверенных мест. Размеры дефектов колеблются: поры, цепочки пор 0,5...3 мм, непровар, несплавления-0,5...4 мм, подрезы 1...7 мм. Дефекты непровар, несплавления, подрезы характеризуют формирование усиления и корня шва при ЭЛС. Отступления от проектных размеров и формы отдельных элементов или всего изделия, вызванные его деформацией в процессе сварки, также относятся к дефектам.

Холодные трещины (ХТ) относятся к числу опасных и распространенных дефектов в сварных конструкциях из титановых сплавов. Технологическими причинами возникновения ХТ могут быть нарушения технологии сварки, термообработки, изготовления полуфабрикатов и т.п. Сложность конструкции, а также локальный нагрев и неравномерное распределения металла при сварке способствуют возникновению сварочных напряжений, коробления и возникновению холодных трещин, появляющихся лишь по истечении некоторого времени.

Результаты анализа дефектов швов показывают, что холодные трещины составляют 2...4 % от общего числа дефектов, возникают преимущественно в тавровых соединениях в зоне окончания сварного шва, длина трещин колеблется от 0,5 до 10 мм.

**Электрошлаковая сварка (ЭШС).** Недостатками электрошлаковой сварки являются:

- производство сварки только в вертикальном или в близком к вертикальному положению (отклонение от вертикали не более 30°) свариваемых плоскостей;
- недопустимость остановки электрошлакового процесса до окончания сварки. В случае вынужденной остановки в сварном шве возникает дефект. В таком случае сварной шов подвергают ремонту или полностью удаляют и вновь заваривают;
- непровары – наиболее наблюдаемые дефекты при ЭШС (локализуется по двум или одной кромке, встречаются местные непровары у поверхности соединяемых элементов или посередине шва). Малая ширина шва, связанная с низким напряжением или высокой скоростью сварки, вызывает непровар по двум кромкам. Непровар по одной кромке происходит по причине неточного перемещения электрода по оси соединения, что вызывает смещение шва на одну из кромок с отсутствием оплавления второй кромки. При увеличении расстояния от конечного положения электрода до ползуна и при малой продолжительности остановки электрода в конечном положении возникает непровар у поверхности свариваемых деталей. Непровар по середине деталей по их толщине при сварке двумя подвижными электродами является следствием излишне большого расстояния между последними или «виляния» конца электрода из-за его перегрева. Участок шва с непроваром, размеры которого превышают нормативно установленные, должен быть удален и заварен заново;
- необходимость изготовления и установки перед сваркой технологических деталей (планки, «стартовые карманы», формирующие устройства и др.);
- крупнозернистая структура в металле шва и зоне термического влияния и связанная с этим низкая ударная вязкость металла сварного соединения при отрицательных температу-

рах. При ЭШС структура металла швов может характеризоваться наличием зоны 1 крупных столбчатых кристаллов (см. рис. 1, а), которые растут в направлении, обратном отводу тепла, зоны 2 тонких столбчатых кристаллов, характеризуемой меньшей величиной зерна и несколько большим их отклонением в сторону теплового центра, и зоны 3 равноосных кристаллов, располагающейся посередине шва. Строение швов зависит от способа ЭШС, химического состава металла шва и режима сварки. Повышение содержания в шве углерода и марганца увеличивает, а уменьшение интенсивности теплоотвода, наоборот, уменьшает ширину зоны.

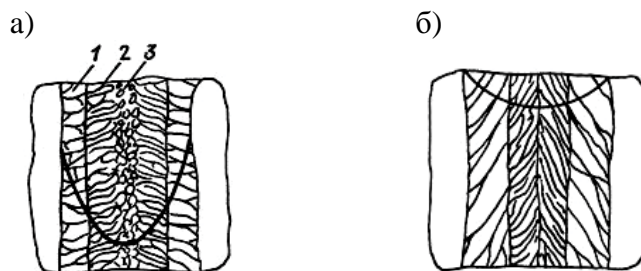


Рис. 1. Схема строения структур металла шва при ЭШС

При сварке проволочными электродами могут быть только первые две зоны (см. рис. 1, б) или какая-либо одна из них. Металл швов, имеющих структуру зоны 2, имеет пониженную стойкость против кристаллизационных трещин. Медленное охлаждение швов при ЭШС в интервале температур фазовых превращений способствует тому, что их структура характеризуется грубым ферритно-перлитным строением с утолщенной оторочкой феррита по границам кристаллов. Термический цикл околошовной зоны при ЭШС характеризуется ее длительным нагревом и выдержкой при температурах перегрева и медленным охлаждением. Поэтому в ней могут образовываться грубые видманштеттовы структуры, которые по мере удаления от линии сплавления сменяются нормализованной мелкозернистой структурой. В зоне перегрева может наблюдаться падение ударной вязкости, что устраняется последующей термической обработкой (нормализация с отпуском). Термический цикл ЭШС, способствуя распаду аустенита в области перлитного и промежуточного превращений, благоприятен при сварке низколегированных сталей, так как способствует подавлению образования закалочных структур.

Термический цикл, которому подвергался металл в отдельном участке ЗТВ при сварке, является основным фактором, определяющим конечную структуру его металла после окончания сварки. Решающими факторами термического цикла сварки являются максимальная температура, достигаемая металлом в рассматриваемом объекте, и скорость его охлаждения. Ширина и конечная структура различных участков зоны термического влияния определяются способом и режимом сварки, составом и толщиной основного металла.

Из перечисленных недостатков наиболее влиятельным на надежность сварных конструкций является образование крупного зерна в шве и околошовной зоне вследствие замедленного нагрева и охлаждения. Для устранения этой проблемы на практике, в основном, проводят термическую обработку: нормализацию или отжиг. Этот метод не всегда осуществим в виду того, что изделия, сваренные ЭШС, крупногабаритные: добиться равномерного нагрева по всему сварному соединению невозможно. Имеется возможность воздействия как кратковременными [1], так и постоянными электромагнитными импульсами [2] на расплавленный металл, что обеспечивает измельчение структуры и подавление ликвации, а перемешиватель для кристаллизатора МНЛЗ уникален своим принципом действия – он создает акустическую волну, воздействующую на фронт кристаллизации вдоль всей глубины жидкометаллической лунки.

Перечисленные методы улучшают качество металла, но не способствуют получению мелкозернистой структуры. Проблема увеличения механических свойств не решена, поэтому необходимо изыскать возможность измельчения зерна пластической деформацией в области



предпревращений, т.е. одновременной деформации расплавленного и кристаллизующегося металла.

**Диффузионная сварка.** Изготовление корпуса замка, шайбы, обгонной муфты и других деталей методом штамповки имеет ряд недостатков: низкий коэффициент использования металла (0,06-0,58), высокая трудоемкость их изготовления, существуют ограничения по форме и размерам изготавливаемых заготовок.

В связи с этим необходимо проводить поиск и исследование способов, позволяющих существенно сократить технологический цикл изготовления изделий, повысить КИМ до 1,0, снизить энергоемкость технологических операций, тем самым повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции. К таким способам, в частности, можно отнести и диффузионную сварку, которая имеет ряд недостатков: дорогостоящее оборудование, ограничены размеры изготавливаемых деталей, необходимо создавать и постоянно поддерживать вакуумирование, усилие сдавливания и температуру, что достаточно затратно по времени и электроэнергии.

**Сварка трением с перемешиванием.** Фрезерование – единственный технологический процесс создания оребренных панелей летательных аппаратов, выполненных из высокопрочных алюминиевых сплавов, в ходе которого основная масса металла заготовки преобразуется в стружку (процент использования металла – 2-3).

Оребренные панели после фрезерования подвергаются формообразованию путем натяжки на специальные эталоны. На эту операцию также даются значительные технологические припуски. С целью уменьшения материалоемкости используют приваренные контактной сваркой технологические пластины, которые зачастую не выдерживают прилагаемых нагрузок. Переход к сварке панелей позволил бы не только значительно уменьшить материалоемкость производства, но и снизить энерго- и трудозатраты при их изготовлении.

Известно [3], что свариваемость высокопрочных алюминиевых сплавов при сварке плавлением неудовлетворительная из-за склонности образования горячих трещин. Кроме того, сварное соединение обладает повышенной хрупкостью и пониженной коррозионной стойкостью.

Наиболее перспективным методом для решения указанной проблемы является способ сварки трением с перемешиванием (СТП) [3]. Но и он не лишен недостатков: существенно снижаются механические свойства сварных соединений непосредственно после СТП. Поэтому следует активизировать научные изыскания механизма формирования сварного соединения при СТП, предварительных, сопутствующих и последующих СТП операций.

### **Выводы:**

1. Общими, наиболее опасными дефектами, для всех видов сварки являются холодные трещины и поры. Единственной особенностью для СПВЭ является формирование пористости в зоне нерасплавленной проставки и вольфрамовые включения. Исследования причин и механизма образования пор, появления трещин, вольфрамовых включений и мер по их исключению – одна из важнейших задач.

2. Проблема увеличения механических свойств после ЭШС не решена, поэтому необходимо изыскать возможность измельчения зерна пластической деформацией в области предпревращений, т.е. одновременной деформации расплавленного и кристаллизующегося металла.

3. Необходимо проводить поиск и исследование способов диффузионной сварки, позволяющих существенно сократить технологический цикл изготовления изделий, повысить КИМ до 1,0, снизить энергоемкость технологических операций, тем самым повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции по отношению к штамповке.

4. Следует проводить научные изыскания механизма формирования сварного соединения при СТП, предварительных, сопутствующих и последующих СТП операций с целью повышения механические свойства сварных соединений непосредственно после СТП.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ри, Э. Х. Электронно-микроскопическое исследование и микрорентгеноспектральный анализ бронзы, облученной в жидком состоянии наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) / Э. Х. Ри, С. В. Дорофеев, Хосен Ри // Литейщик России. – 2007. – № 7. – С. 33-36.
2. Гарнье, М. Возможности и перспективы электромагнитной обработки материалов / М. Гарнье // Магнитная гидродинамика. – 1996. – Т. 32. – № 2. – С. 131-140.
3. Штрикман, М. М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений. Ч. 2. Совершенствование инструмента и технологических схем сварки / М. М. Штрикман // Сварочное производство. – 2007. – № 10. – С. 25-32.