



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080
office@spbstu.ru

09.09.2020 № НК-Д-295

на № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО «СПбПУ»,
член-корреспондент РАН,
д.т.н., профессор



Сергеев В.В.

ОТЗЫВ

ведущей организации

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого» на диссертационную работу

Высоцкого Игоря Васильевича

**«Разработка научных основ оптимизации процесса сварки трением с
перемешиванием алюминиевого сплава АД33»,**

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.16.01 – Материаловедение и термическая обработка
металлов и сплавов.

Актуальность диссертационной работы

Развитие техники неразрывно связано с развитием новых материалов.
Транспортное машиностроение, как одна из ведущих отраслей экономики
остро нуждается в сплавах с улучшенными свойствами, что вызвало бурное
развитие металлургии лёгких сплавов и привело к существенному росту
номенклатуры алюминиевых сплавов. Обладая низкой плотностью, высокой

жёсткостью, относительно высокой прочностью и замечательными коррозионными свойствами алюминиевые сплавы позволяют снижать массу транспортных средств, повышая при этом вес полезного перевозимого груза.

Но, практическое применение алюминиевых сплавов сталкивается с существенными трудностями, обусловленными невозможностью соединения посредством традиционных методов сварки, например, таких, как аргонодуговая сварка. Ответом на этот вызов стало создание нового метода сварки – сварки трением с перемешиванием (СТП), который в настоящее время интенсивно внедряется на предприятиях как в России, так и за рубежом. Основным преимуществом СТП является то, что процесс сварки осуществляется в твёрдой фазе, позволяя тем самым исключить значительную часть негативных процессов, свойственных сварке плавлением. Однако, при СТП термоупрочняемых алюминиевых сплавов, выделяющееся в процессе сварки тепло активирует процессы растворения и коагуляции частиц упрочняющих фаз что неизбежно приводит к существенной деградации свойств сварных соединений. Поэтому, представленная в диссертационной работе, разработка научных основ оптимизации процесса СТП, направленная на подавление негативных процессов деградации вторых фаз на примере термически упрочняемого алюминиевого сплава АД33, является актуальной научной и технической задачей, успешное решение которой позволит расширить номенклатуру свариваемых алюминиевых сплавов и повысить эффективность их сварки, а значит приведёт к созданию более функциональных и экономически эффективных в своём применении транспортных средств.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы из 209 наименований, изложена на 112 страницах и содержит 50 рисунков и 10 таблиц.

Во введении обоснована актуальность решаемой научной и технической проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту, обозначены научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приведён литературный обзор в котором рассматривается проблема использования сварки плавлением для соединения термоупрочняемых алюминиевых сплавов и возможные пути её решения посредством применения более современного метода сварки без расплавления материала, а именно сварки трением с перемешиванием. Детально описаны процессы фазовых превращений в алюминиевых сплавах системы Al-Mg-Si, к которой относится изучаемый в представленной работе сплав АД33. Понимание процессов СТП и фазовых превращений, происходящих в изучаемом сплаве с опорой на современные научные данные позволило автору выдвинуть несколько путей решения существовавшей проблемы деградации вторых фаз, а следовательно и механических свойств при СТП термоупрочняемых алюминиевых сплавов.

Во второй главе диссертации описаны методики проведения структурных исследований и механических испытаний с опорой на национальные стандарты ГОСТ и международные стандарты ASTM. Также подробно описан метод измерения температуры в зоне перемешивания шва и оригинальная методика подавления аномального роста зерна посредством прокатки сварных соединений.

В третьей главе диссертации рассмотрено влияние режимов сварки и послесварочной термической обработки, заключающейся в старении, на структуру и свойства сварных соединений. По результатам исследований термических циклов СТП автору удалось оптимизировать режимы сварки таким образом, чтобы СТП приводила к растворению частиц вторых фаз в зоне перемешивания шва и при этом практически не приводила к коагуляции частиц в зонах термического воздействия, что позволило посредством простого старения, проведённого после сварки, существенно восстановить

механические свойства шва и впервые для термоупрочняемого сплава АД33 достигнуть коэффициента прочности 90%. Однако, стоит отметить, что пластичность сварного соединения, восстановленного вышеуказанным образом, осталась на относительно низком уровне в 3,3%, что обусловлено локализацией деформации в наименее прочных зонах термического влияния.

Четвёртая глава посвящена изучению влияния деформации, предваряющей послесварочную обработку T6, на аномальный рост зерна, происходящий в процессе закалки. Внесение деформации в сварное соединение посредством плоской прокатки швов по трём маршрутам, а именно поперёк, вдоль и под углом 45° относительно направления сварки на степени обжатия 10% и 20% позволило установить зависимость между размером структурных элементов и локализацией деформации в сварном соединении. Автором было показано, что прокатка вдоль направления сварки на 10% позволяет получить при последующей закалке и старении равный размер структурных элементов во всех зонах сварного соединения, что приводит к полному восстановлению прочности и пластичности швов полностью исключая такое негативное явление, как локализация деформации.

Пятая глава диссертации является продолжением исследования влияния восстановления свойств швов посредством оптимизации режимов сварки и послесварочного старения. В частности, для наилучшего режима сварки, позволившего получить максимальный коэффициент прочности, были проведены исследования такого важного для практики, и при этом слабо освещённого в современной научной литературе параметра как многоцикловая усталость. Показано, что усталостная выносливость сварного соединения не уступает усталостной выносливости исходного материала.

Научная новизна

По итогу выполненных исследований получены следующие новые результаты:

1. Установлена взаимосвязь между режимами сварки и процессами фазовых превращений дисперсных частиц в различных зонах сварного соединения. В частности, показано, что комбинация высокой частоты вращения инструмента и высокой скорости сварки позволяет получить термический цикл сварки, максимально сужающий зоны термического воздействия, тем самым эффективно препятствующий коагуляции упрочняющей β' фазы и открывающий возможность для эффективного использования послесварочного старения как метода восстановления свойств швов.

2. Показано что внесение деформации в сварное соединение приводит к запуску механизма рекристаллизации вместо аномального роста зерна, тем самым эффективно подавляя последнее. К тому же показано, что при условии равной прочности всех зон сварного соединения, решающим фактором локализации деформации служит наибольший средний размер зерна.

Практическая значимость полученных результатов

Разработанные в рассмотренной диссертационной работе методики позволяют эффективно восстанавливать прочностные характеристики сварных соединений термоупрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si, полученных методом сварки трением с перемешиванием, так что впервые для сплава АД33 удалось получить коэффициент прочности сварного соединения 90% при сохранении усталостной выносливости швов на уровне исходного материала, что имеет большое практическое значение для всех областей транспортного машиностроения.

Результаты диссертационной работы могут представлять интерес для научно-исследовательских, производственных организаций и ряда технических вузов. В первую очередь, результаты могут быть использованы на таких предприятиях как ФГУН ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей» им. Академика И.В. Горынина, ЗАО «Сеспель» и ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, занимающихся исследованиями, разработкой и внедрением технологий сварки трением с перемешиванием алюминиевых сплавов.

Кроме того, разработанные методики восстановления прочностных свойств, после дополнительных исследований, могут быть применены и к другим системам термоупрочняемых алюминиевых сплавов.

Достоверность результатов исследования

Достоверность и обоснованность положений и выводов в работе обеспечиваются проведением большого количества экспериментов и использовании испытательных методик согласно стандартам ГОСТ и ASTM. Результаты получены с использованием современного оборудования, а именно: просвечивающего электронного микроскопа, растрового электронного микроскопа, рентгеновского дифрактометра. Также достоверность обеспечивается воспроизводимостью и согласованностью полученных результатов друг с другом. Результаты не противоречат современным научным представлениям.

Замечания по диссертационной работе

На основании рассмотрения диссертационной работы можно сделать следующие замечания:

1. В автореферате на стр.3, автор утверждает, что механические свойства сварных соединений не могут быть восстановлены, однако при получении качественного сварного соединения возможно проведение постадийной термической обработки для полного растворения дисперсных фаз с последующим старением, что позволит получить прочность сварного шва выше, чем прочность основного металла.

2. В автореферате на стр.10, автор употребляет термины «температура СТП» и «длительность термического цикла», не давая определений. Также некоторые термины, использованные автором в работе, представляются недостаточно корректными, например, вместо «пин» и «плечики» более правильно использовать «наконечник» и «заплечики».

3. В главе 2, раздел 2.2 автор описывает эксперимент по измерению температуры сварки. Однако описание не полное, следует добавить информацию об использованных термопарах и частоте измерений. В случае, если использовалась оборудование с низкой частотой измерений, максимальные зафиксированные температуры сварки могут быть неточными.

4. В главе 2, раздел 2.3 автор описывает эксперимент по СТП. Однако не указывает геометрические параметры рабочего инструмента.

5. Автору следовало бы привести более подробное описание методики измерения остаточных напряжений.

6. В главе 2, раздел 2.7, автор утверждает: «Для каждого состояния было испытано не менее 2 образцов, по результатам испытаний которых вычислялось среднее значение». Такая формулировка порождает неточность, в связи с чем возникает ряд вопросов:

Сколько в действительности испытывалось образцов каждого состояния, на каждый режим?

Сколько образцов каждого режима проходили структурный анализ?

Достаточно ли этого количества для статистической оценки?

7. В главе 5 автор описывает испытания на усталостную прочность, отмечая при этом, что боковая поверхность образцов имела повышенную шероховатость в следствие резки, и являлась местом зарождения трещины, т.е. влияла на результат (хотя, как уточняется, были и исключения – трещина зарождалась с верхних поверхностей). Является ли данное условие (повышенная шероховатость боковой поверхности, являющаяся концентратором) определяющим результаты испытаний? Для чистоты испытаний автору следовало обработать боковую поверхность перед испытаниями.

8. В главе 3 автор утверждает, что структурный и фазовый анализ в зоне термического влияния проводился в определенных геометрическим способом областях, на заданном расстоянии от центра сварного шва, согласно рис. 3.4. Известно, что изменение режима сварки влияет на ширину зон термомеханического и термического влияния. Это означает что области, указанные на рис. 3.4 для разных режимов могли лежать в разных зонах сварного шва. Таким образом, возникает вопрос: изменялось ли положение области исследования в зависимости от режима, так, чтобы исследование проводилось в одинаковых зонах сварного соединения?

9. Сварка с двух сторон, использованная в работе, способствовала существенному усложнению процессов пластического течения и формирования микроструктуры, что в некоторой степени затруднило интерпретацию экспериментальных данных. Тем не менее, в рамках диссертационной работы было бы достаточно ограничиться односторонней сваркой.

10. Адаптация к практическому применению использованной в работе прокатки на 10% обжатия, как метода внесения деформации с целью подавления аномального роста зерна, может быть затруднительной из-за заметного уменьшения толщины сварного изделия. Автору следовало также проверить возможность использования меньших степеней обжатия швов с целью подавления аномального роста зерна.

Сделанные замечания не снижают положительной оценки работы, так как не затрагивают ее основные положения и выводы. Результаты научных исследований имеют существенное научное и практическое значение.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация логично построена, структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования. Результаты работы опубликованы в 9 научных работах (включая 6 статей в журналах из перечня ВАК и 3 патентах на изобретение) и прошли апробацию на международных и российских конференциях. Автореферат диссертации и публикации правильно и полно отражают содержание работы.

В целом диссертационная работа Высоцкого И.В. является завершенной научно-квалифицированной работой, в которой на основании выполненных автором исследований и их интерпретации получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важной научной и практической задачи. Работа выполнена на высоком научном уровне. Поставленные в работе цель и задачи полностью достигнуты, а основные результаты отражены в выводах. Выводы и результаты обоснованы и

достоверны. Диссертационная работа и автореферат написаны понятным научным языком, имеют четко прослеживаемую логику изложения. Результаты диссертационного исследования получены либо автором лично, либо при его непосредственном участии.

Диссертационная работа Высоцкого И.В. соответствует паспорту специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (п. 2 «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях»).

Заключение

Считаем, что по актуальности и уровню решения поставленных задач, объему выполненных исследований, научной новизне, достоверности и практической значимости полученных результатов, диссертационная работа Высоцкого И.В. «Разработка научных основ оптимизации процесса сварки трением с перемешиванием алюминиевого сплава АД33» соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор – Высоцкий Игорь Васильевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Диссертационная работа рассмотрена и обсуждена на заседании лаборатории легких материалов и конструкций Института машиностроения, материалов и транспорта. На заседании присутствовало 12 человек. Протокол № 1 от 29 мая 2020 г.

Заведующий лаборатории легких
материалов и конструкций,
к.т.н



Олег Владиславович
Панченко

Отзыв составил:

Ведущий научный сотрудник
лаборатории легких
материалов и конструкций,
к.т.н



Антон Алексеевич
Наумов

Панченко Олег Владиславович, кандидат технических наук, специальность - 05.02.10 – Сварка родственные процессы и технологии, доцент Высшей школы физики и технологии материалов, заведующий лаборатории легких материалов и конструкций Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Тел.: 8 (812) 946-86-99;

e-mail: panchenko_ov@spbstu.ru

Наумов Антон Алексеевич, кандидат технических наук, специальность - 05.16.05 – Обработка металлов давлением, доцент Высшей школы физики и технологии материалов, ведущий научный сотрудник лаборатории легких материалов и конструкций Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Тел.: 8 (812) 294-42-22;

e-mail: anton.naumov@spbstu.ru