

УДК 629.12

**АКТУАЛЬНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С
ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТЕРМИЧЕСКИ НЕ УПРОЧНЯЕМЫХ
АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В СУДОСТРОЕНИИ НА
ПРИМЕРЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА СО СВАРКОЙ ПЛАВЛЕНИЕМ****Сомпольцева Анна Александровна,**

старший преподаватель

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова

a.sompoltseva@narfu.ru

Ивашнев Владимир Александрович,

бакалавр

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова

ivashnev.v@edu.narfu.ru

Соболев Денис Леонидович,

бакалавр

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова

Аннотация

В данной статье проведен сравнительный анализ методов образования сварного соединения алюминиевых сплавов, не упрочняемых термообработкой (Амг5, Амг6, Амг61) и широко применяющихся в судостроении. Для сравнения взят метод сварки плавлением в среде защитного газа и метод сварки трением с перемешиванием, а также рассмотрены некоторые технологические особенности обоих методов.

Ключевые слова: сварка плавлением, сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы.

**THE RELEVANCE OF USE OF FRICTION STIR WELDING OF THERMALLY
NOT STRENGTHENABLE ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOYS IN
SHIPBUILDING BY THE EXAMPLE OF COMPARATIVE ANALYSIS WITH
FUNCTION WELDING****Anna A. Sompoltseva,**

Senior Lecturer

Northern (Arctic) Federal University. M.V. Lomonosov

a.sompoltseva@narfu.ru

Ivashnev Vladimir Alexandrovich,

Bachelor

Northern (Arctic) Federal University. M.V. Lomonosov
ivashnev.v@edu.narfu.ru

Sobolev Denis Leonidovich,

Bachelor

Northern (Arctic) Federal University. M.V. Lomonosov

ABSTRACT

This article provides a comparative analysis of methods for forming a welded joint of aluminum alloys that are not hardened by heat treatment (AMg5, AMg6, AMg61) and are widely used in shipbuilding. For comparison, the gas-shielded fusion welding method and the friction stir welding method are taken, and some technological features of both methods are considered.

Keywords: fusion welding, friction stir welding, aluminum alloys.

В середине XX века с развитием металлургии алюминиевых, титановых и магниевых сплавов произошло появление высокоэффективных изделий в ракетостроении, авиастроении, судостроении, приборостроении, химической промышленности и наземном транспорте. В нашей стране, огромный вклад в разработку алюминиевых сплавов для судостроения, внесли ЦНИИ КМ «Прометей» и ИЛМиТ (институт легких материалов и технологий). Наряду с разработкой и совершенствованием сплавов, находит применение в промышленности применение принципиально новых способов создания неразъемного соединения. Наряду с традиционными способами, такими как: холодная сварка (получение биметалла), ручная дуговая сварка (покрытыми электродами и неплавящимся электродом в среде защитного газа), автоматическая сварка с применением флюса и защитного газа, механизированная сварка; все больше находят применение новые, эффективные методы сварки: плазменная, лазерная и сварка трением с перемешиванием. Широкое применение алюминиевых сплавов и способов сварки открывает новые возможности в развитии судостроения [1, 2, 3].

Алюминиевые сплавы в судостроении обладают следующими преимуществами:

1. Уменьшение веса и улучшения технических характеристик судна;
2. Коррозийная стойкость в следствии свойства алюминиевых сплавов образовывать на своей поверхности окисную пленку;
3. Гарантированные свойства сплавов;
4. Достаточная конструкционная прочность;
5. Ударостойкость и вибростойкость в виду физических и механических свойств сплавов;
6. Сохранение механических характеристик при отрицательных температурах;
7. Экологичность использования;
8. Сплавы немагнитны;
9. Отсутствует искрообразование;

Для сравнительного анализа рассмотрим алюминиевые, термически не упрочняемые сплавы системы Al-Mg, используемые для изготовления корпусных конструкций такие как: AMg5(1550), AMg6(1560), AMg61(1561) [4], их характеристики приведены в таблице 1, таблице 2 и таблице 3.

Таблица 1 - Химический состав.

Наименование сплава		Массовая доля элементов, %								
Марка	Номер	Si	Mn	Ti	Cu	Zr	Fe	Be	Zn	Mg
AMg5	1550	<0,5	0,3-0,8	0,02-0,1	<0,1		<0,5	<0,005	<0,2	4,8-5,8
AMg6	1560	<0,4	0,5-0,8	0,2-0,1	<0,1		<0,4	<0,005	<0,2	5,8-6,8
AMg61	1561	<0,4	0,7-1,1		<0,1	0,02-0,12	<0,4	<0,003	<0,2	5,5-6,5

Таблица 2 - Механические свойства.

Наименование сплава	T, °C	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Плотность, ρ, кг/дм ³	Твердость НВ, МПа
AMg5	20	300	150	15	2,65	65
AMg6	20	315	165	15	2,65	65
AMg61	20	335	180	12-15	2,65	65

Таблица 3 - Теплофизические свойства.

Наименование сплава	Температура кристаллизации, °C	Удельная теплопроводность, Вт/м · °C	Удельная теплоемкость, Дж/кг · °C	Коэффициент линейного расширения, T = 20 – 100°C, 10 ⁶ · 1/°C
AMg5	630	120	920	23,8
AMg6	630	122	920	24,7
AMg61	630	122	920	24,1

Из приведенных выше характеристик сплавов наблюдается схожесть по химическому составу и механическим свойствам, что немаловажно в дальнейшем анализе, т.к. технология сварки для этих сплавов является идентичной.

Сварка плавлением.

Приведенные термические не упрочняемые сплавы системы Al-Mg поставляются в виде листов, прутков, профилей и панелей. Сплавы имеют достаточно высокую прочность, хорошую пластичность и достаточную коррозионную стойкость. Все эти сплавы хорошо свариваются плавлением, коэффициент прочности соединения составляет 0,8-0,9 от прочности основного металла. Для рассматриваемых сплавов применимы следующие виды сварки: РДС (ручная дуговая сварка покрытыми электродами) на токе обратной полярности; автоматическая сварка по флюсу и под флюсом на токе обратной полярности; АДС (аргонно-дуговая сварка) ручная, автоматизированная и механизированная в среде защитного газа на постоянном и переменном токах. Используются так же новые виды сварки плавлением: импульсная, плазменная, лазерная и электронно-лучевая. Для сравнительного анализа рассмотрим способ ручной дуговой и механизированной сварки в среде защитного газа [5, 6].

Рассмотрим теплофизические, физико-химические и металлургические особенности алюминиевых сплавов, а также технологические приемы, характерные для сварки плавлением. Представим данное рассмотрение в виде блок-схем:

Рисунок 1 - Физико-химические свойства.

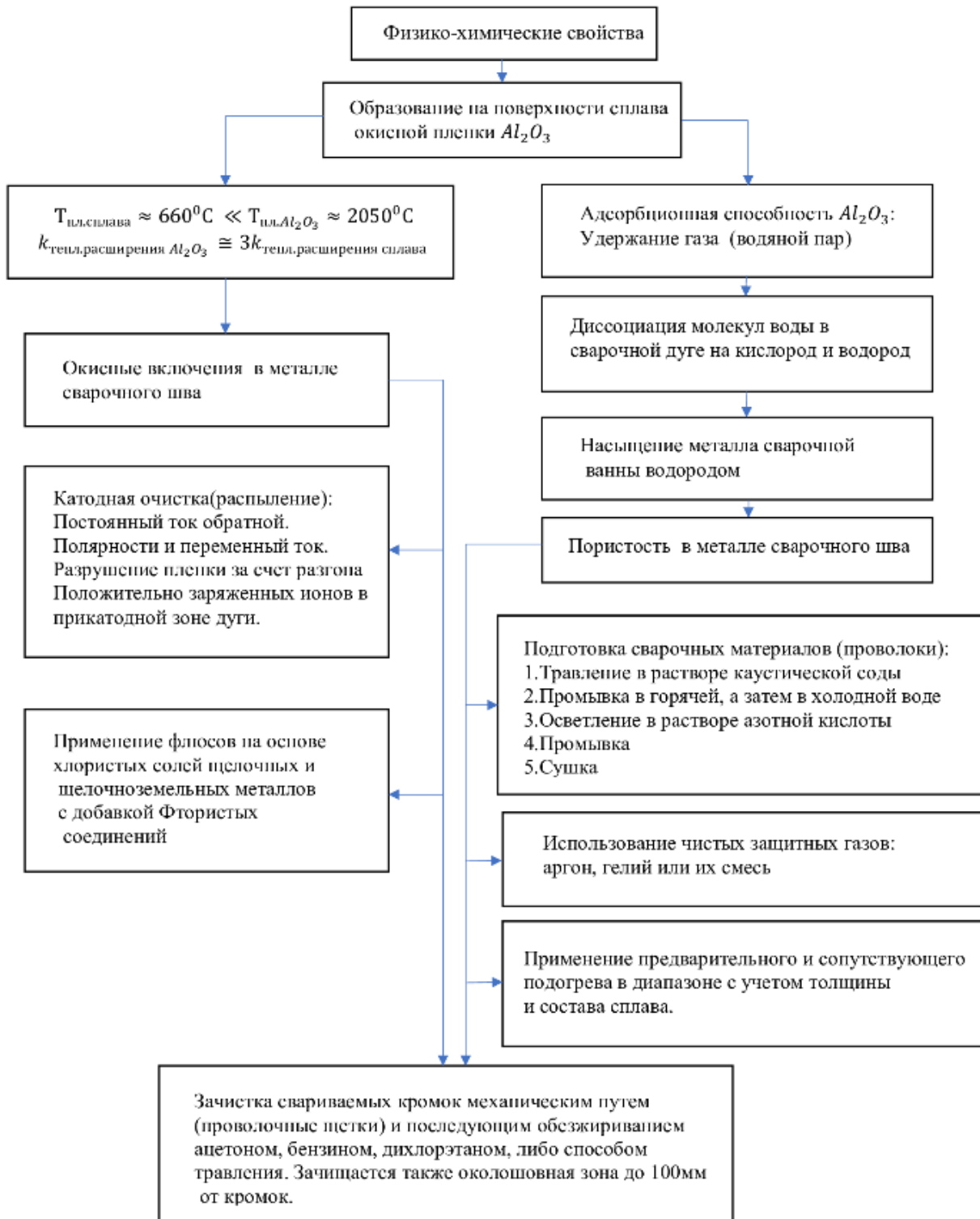
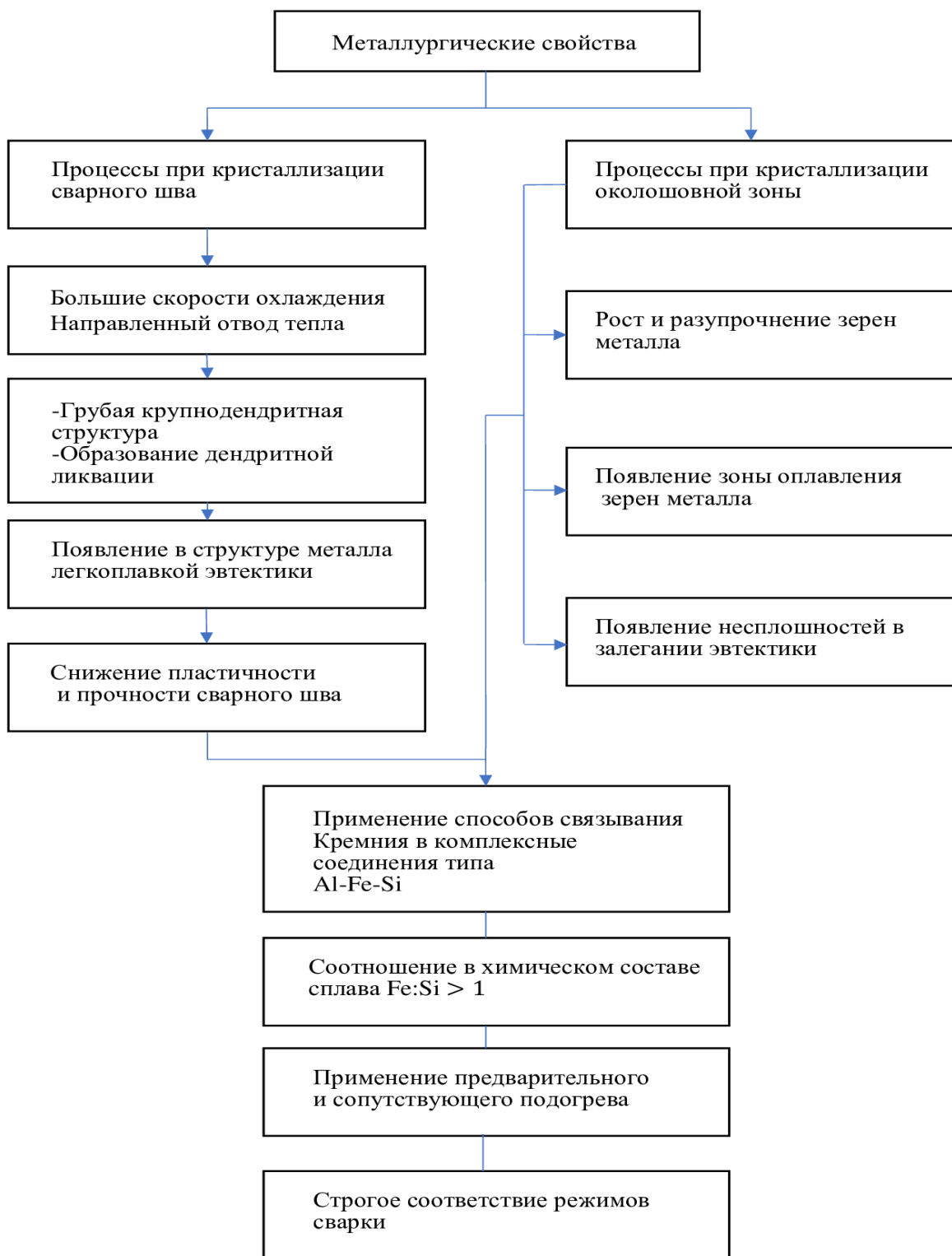


Рисунок 2 - Металлургические свойства.



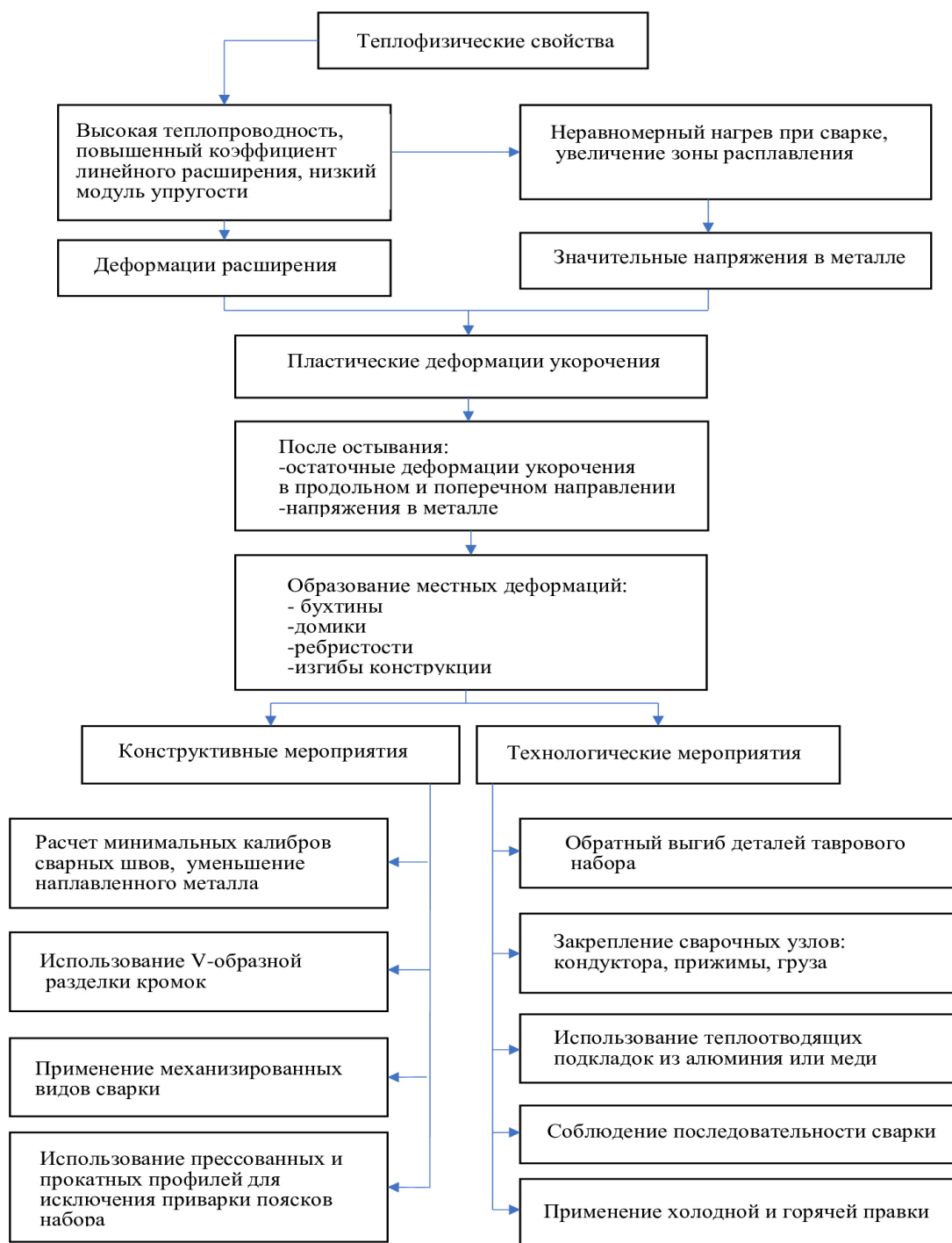


Рисунок 3 - Теплофизические свойства и технологические приемы. Сварка трением с перемешиванием.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – это новый и перспективный вид создания сварных соединений, применяемый в различных отраслях промышленности. Появившийся относительно недавно, метод СТП стал активно применяться в судостроении дополняя технологию сварки алюминиевых сплавов новыми возможностями. Основа метода СТП – получение высокотехнологичных и высококачественных соединений металла без его расплавления, т.е. в твердой фазе путем рекристаллизации. Суть метода заключается в получении сварного соединения с помощью вращения специального инструмента в виде стержня с разными рельефами поверхности, погружаемого в стык, плотно примыкающих друг к другу листов металла и дальнейшим перемещением инструмента вдоль стыка. В следствие этого, механическая энергия переходит в тепловую нагревая металл до

температуры, не превышающей температуры плавления и происходит смещение и перемешивание приповерхностных слоев металла. При сварке данным методом происходит упрочнение металла из-за пластической деформации и шов приобретает мелкозернистую структуру. Схема СТП приведена на рисунке 4.

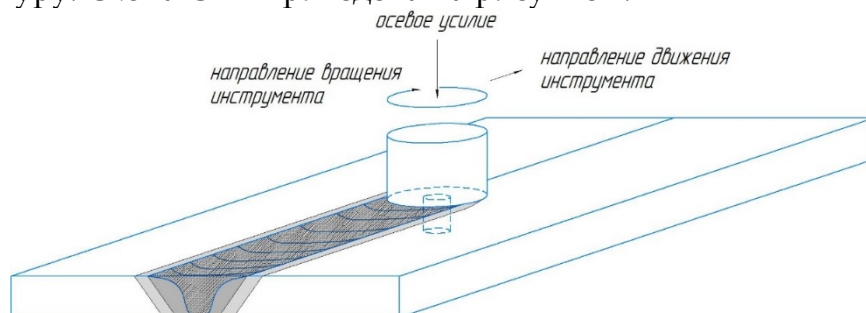


Рисунок 4 - Схема сварки методом СТП.

Наряду с преимуществами данного метода, такими как: получение сварного соединения, равнопрочного основному металлу; нет горячих трещин, пористости, окисных включений; несущественные остаточные напряжения; не применяется защитный газ и флюса; нет необходимости в применении технологических операций, связанных с подготовкой свариваемых деталей, сварочных материалов и устранению деформаций, возникающих в процессе сварки плавлением; возможность соединения разнородных сталей, сплавов и их композиций; существуют проблемы, связанные с промышленным применением, регламентированием дефектов, характерных для ТСП и разработкой инструмента для различных сплавов [7, 8].

Основными параметрами режима сварки методом СТП являются скорость движения и частота вращения инструмента. Параметры сварки подбираются экспериментально для каждого сплава или композиции сплавов, т.к. физические аспекты образования сварного соединения находятся в стадии исследования. Уже накоплен значительный опыт изучения данной проблематики. Существует множество научных исследований по влиянию режимов сварки на качества сварного шва различных сплавов и образованию дефектов, характерных для данного метода.

Металлографические исследования полученных образцов сварных соединений сплавов системы Al-Mg (AMg5,6,61), полученных при разных режимах сварки, показывают образование основных дефектов: появление микропустот различной периодичности появления и глубине залегания в кольцеобразной структуре шва (в зависимости от режимов сварки), и линия не сплавления в корневой части шва из-за микро включений оксидной пленки. В отличие от сварки плавлением, устранение дефектов при сварке СТП возможно повторным прохождением инструмента, что не сказывается на качестве соединения [9].

Еще одной специфической особенностью метода является необходимость применения выводных планок для ввода и вывода инструмента.

Для наглядности, представим особенности сварки плавлением и метода ТСП, термически не упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg, в виде таблицы 4.

Таблица 4 - Сравнение особенностей сварки плавлением и методом ТСП.

Особенности	Сварка плавлением	Метод СТП
Физико-химические	-Насыщение сварочной ванны водородом -Макровключения остатков окисной пленки	Остаточные микровключения окисной пленки
Металлургические	-Грубая крупнодендритная структура -Оплавление зерен в околошовной зоне	-Мелкозернистая, дезориентированная структура шва

	-Наличие дендритной ликвации -Образование легкосплавной эвтектики -Несплошности в залегании эвтектики	-Упрочнение соединения в процессе деформации
Теплофизические	-Увеличение зоны плавления металла -Остаточные деформации укорочения -Значительные остаточные напряжения -Образование местных деформаций	-Небольшая зона термического влияния -Незначительные остаточные напряжения -Отсутствие деформаций
Технологические	-Предварительная очистка свариваемых деталей -Предварительная очистка сварочных материалов -Конструктивные мероприятия -Технологические мероприятия	-Тщательная очистка не требуется -Использование специального инструмента -Использование специальных станков -Ограничение габаритов и толщин свариваемых деталей
Пространственные положения сварки	Все положения	В основном в нижнем положении
Виды соединений	-Стыковые -Тавровые -Угловые -Нахлесточные	-Стыковые -Тавровые -Угловые -Нахлесточные
Коэффициент прочности соединения (от прочности основного металла)	0,8-0,9	0,9-1

Применение метода СТП позволяет получать высокопрочные и высокотехнологичные сварные соединения не только алюминиевых сплавов и их композиций, но и в сочетании со сталями. Развитие технологий в области применения автоматизированных комплексов позволит применение СТП в условиях работы на стапеле. Однако, на настоящий момент, применение метода СТП невозможно при сварке монтажных стыков и мелких деталей и здесь сварка плавлением дополняет СТП. Рассмотренные в данной статье особенности сварки алюминиевых сплавов системы Al-Mg позволяют сделать вывод о предпочтительности метода СТП для создания крупных конструкций с протяженными сварными швами различных направлений[10]. Развитие данного метода позволит значительно уменьшить объем сварки плавлением в промышленном цикле и увеличить, тем самым, качество изделий. Обладая своими достоинствами и недостатками, оба метода сварки дополняют друг друга и позволяют создавать высокотехнологичные изделия.

Список литературы:

1. ГОСТ 4784-2019, ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», Москва, 01.09.2019г.
2. ГОСТ Р 56371 – 2015, ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», Москва, 25.03.2015 г.
3. С.Б. Андреев, В.С. Головченко, В.Д. Горбач, В.Л. Руссо «Основы сварки судовых конструкций», Санкт-Петербург, 2006г.
4. Е.А. Алифиренко, Н.Н. Барахтина, Е.В. Малов. Создание новых сварных крупногабаритных облегченных панелей повышенной прочности из алюминий-магниевого сплава для строительства скоростных судов нового типа, эксплуатируемых в условиях Заполярья, 2021. № 3. С. 263–272.
5. Машин В.С., Покляцкий А.Г., Федорчук В.Е. Механические свойства соединений алюминиевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом. Автомат. сварка; 2005г. – № 9. – с. 43–49.
6. А.М. Дриц, В.В. Овчинников-«Сварка алюминиевых сплавов», Москва, 2017г.
7. В.Н. Стаценко. Тепловые процессы при сварке трением с перемешиванием; монография; ДВФУ, Политехнический институт – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022г. ISBN 978-5-7444-5191-2. DOI <https://doi.org/10.24866/7444-5191-2>.
8. В. В. Кныш. Повышение сопротивления усталости нахлесточных соединений тонколистовых алюминиевых сплавов, выполненных сваркой плавлением / В. В. Кныш, И. Н. Клочков, И. В. Березин // Автоматическая сварка. – 2013. – № 3(719). – С. 53-55. – EDN TEAGIR.
9. В. В. Овчинников, Технологические особенности сварки трением с перемешиванием соединений алюминиевых сплавов системы Al-Mg / В. В. Овчинников, А. М. Дриц // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 3(93). – С. 7-20. – DOI 10.30987/article_5c7434ed5317f2.05345899. – EDN AIKNNQ.
10. Обеспечение технологичности конструкций при сварке трением с перемешиванием на стадии выбора материалов. Часть 2: свариваемость легких сплавов / Ю. А. Харламов, Н. А. Денисова, П. А. Петров, А. А. Орлов // Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве. – 2023. – № 2(76). – С. 63-76. – EDN ECLZHF.

References:

1. GOST 4784-2019, FSUE "STANDARTINFORM", Moscow, 09/01/2019.
2. GOST R 56371 – 2015, FSUE "STANDARTINFORM", Moscow, 03.25.2015
3. S.B. Andreev, V.S. Golovchenko, V.D. Gorbach, V.L. Russo "Fundamentals of welding of ship structures", St. Petersburg, 2006.
4. E.A. Alifirenko, N.N. Barakhtina, E.V. Malov. Creation of new welded large-sized lightweight panels of increased strength from aluminum-magnesium alloys for the construction of high-speed vessels of a new type operating in the Arctic, 2021. No. 3. P. 263–272.
5. Mashin V.S., Poklyatsky A.G., Fedorchuk V.E. Mechanical properties of aluminum alloy joints when welding with consumable and non-consumable electrodes. Machine. welding; 2005 – No. 9. – p. 43–49.

6. A.M. Drita, V.V. Ovchinnikov - "Welding of aluminum alloys", Moscow, 2017.
7. V.N. Statsenko. Thermal processes in friction stir welding; monograph; FEFU, Polytechnic Institute - Vladivostok: Dalnevost Publishing House. federal University, 2022 ISBN 978-5-7444-5191-2. DOI <https://doi.org/10.24866/7444-5191-2>.
8. V. V. Knysh. Increasing the fatigue resistance of lap joints of thin-sheet aluminum alloys made by fusion welding / V. V. Knysh, I. N. Klochkov, I. V. Berezin // Automatic welding. - 2013. - No. 3(719). - pp. 53-55. - EDN TEAGIR.
9. V. V. Ovchinnikov, Technological features of friction stir welding of compounds of aluminum alloys of the Al-Mg system / V. V. Ovchinnikov, A. M. Drita // Science-intensive technologies in mechanical engineering. - 2019. - No. 3(93). - P. 7-20. - DOI 10.30987/article_5c7434ed5317f2.05345899. - EDN AIKNNQ.
10. Ensuring the manufacturability of structures during friction stir welding at the stage of selecting materials. Part 2: weldability of light alloys / Yu. A. Kharlamov, N. A. Denisova, P. A. Petrov, A. A. Orlov // High-tech technologies and equipment in industry and construction. - 2023. - No. 2(76). - P. 63-76. - EDN ECLZHF.