

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.791.1

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ  
СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ  
ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ  
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

© 2016 А.М. Тупицын\* \*\*, Э.А. Гладков\*\*, А.В. Чернов\*\*\*

\* ООО «СВАРБИ», Москва, Россия

\*\* Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

\*\*\* Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В статье проведен анализ технологических возможностей современных способов автоматической сварки крупногабаритных тонкостенных изделий ответственного назначения из алюминиевых сплавов.

Рассмотрены виды, достоинства и недостатки, типы дефектов, которые появляются при использовании дуговых, фрикционных, лазерных и гибридных методов.

По результатам анализа выбран наиболее оптимальный и рациональный способ сварки.

*Ключевые слова:* автоматическая сварка, сварка алюминия, сварка крупногабаритных тонкостенных изделий, дуговая сварка, фрикционная сварка, лазерная сварка, гибридная сварка.

Поступила в редакцию 02.02.2016 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы относятся к трудносвариваемым материалам. Высокая теплопроводность, теплоемкость и скорость охлаждения, склонность к образованию пор и горячих трещин [1], наличие оксидной пленки усложняют процесс получения качественных соединений.

Тем не менее, алюминиевые сплавы применяются во многих отраслях промышленности: авиационной, авиакосмической, транспортной и др., так как имеют весьма малую плотность, практически сравнимы по удельной прочности с другими конструкционными сталями и сплавами, обладают высокой коррозионной стойкостью и жаропрочностью [2].

При изготовлении ответственных конструкций из алюминиевых сплавов (особенно крупногабаритных) важно уделить внимание к выбору оптимального способа сварки, способного компенсировать негативные свойства алюминиевых сплавов, а также обеспечить получение прочного бездефектного соединения с сохранением геометрии конструкции.

Помимо этого, необходимо оценить возможность и простоту механизации и автоматизации процесса, так как обеспечение высокой производительности в большинстве случаев является важным критерием при выборе способа, а снижение

влияния человеческого фактора в сварочном процессе позволит уменьшить вероятность появления дефектов.

Изучение литературных источников показало, что существует множество способов сварки алюминиевых сплавов: дуговые, фрикционные (трением), лазерные, гибридные, которые могут быть использованы при сварке различных конструкций из алюминиевых сплавов (Рис. 1).

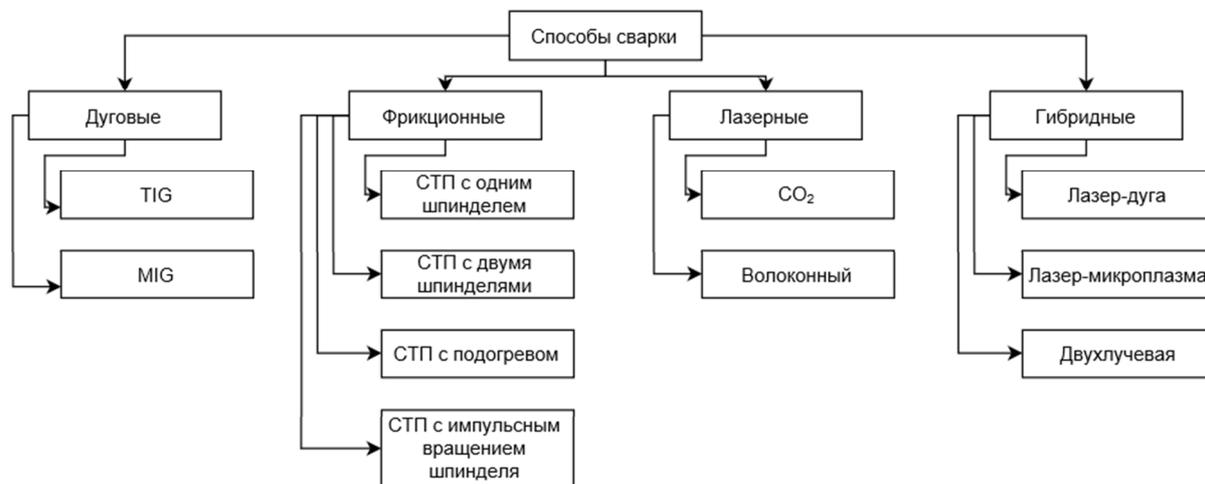


Рис. 1. – Способы сварки алюминия

## 1 ФРИКЦИОННЫЕ СПОСОБЫ

Фрикционная сварка – это сварка за счет выделения тепла при трении рабочего инструмента и детали.

### 1.1 Виды

Разновидностью фрикционных способов является сварка трением с перемешиванием СТП (Friction Stir Welding). Сварка происходит за счет нагрева быстро вращающегося шпинделя со штырем в центре, который погружается в стык двух деталей и движется вдоль линии стыка.

Помимо стандартной СТП существуют модернизированные способы [3,4], которые позволяют компенсировать некоторые недостатки:

*СТП с двумя шпинделями (Self-reacting или SR-FSW).* Это способ, в котором вместо жестко фиксированной подкладки используется еще один шпиндель, находящийся на противоположной стороне от рабочего шпинделя. Способ позволяет получить более симметричный шов [4], а осевое усилие, возникающее в обычной СТП, отсутствует, что позволяет уменьшить размер и сложность приспособлений.

*СТП с подогревом (Assisted FCW).* В данном способе осуществляется прогрев изделия с помощью TIG сварки, лазерной сварки или системы индукционного нагрева [3]. Происходит снижение напряжения в шпинделе, что приводит к уменьшению износа инструмента.

*СТП с импульсным вращением шпинделя (Pulsed FCW).* В данном способе используется импульсно изменяющаяся скорость вращения и/или перемещения. Шпиндель вращается в режиме полного реверса. Эксперименты позволили получить симметричную микроструктуру в зоне сварочного шва. При этом швы имели более высокий предел прочности и относительное удлинение [3].

## 1.2 Достоинства и недостатки

СТП легко автоматизировать, тепловложение минимально, так как отсутствует расплавление сварочной ванны, нет выгорания легирующих элементов, не требуется дополнительная термическая обработка шва, способ позволяет обеспечить высокую производительность сварки, что особенно актуально при сварке крупногабаритных конструкций.

Процесс не требует использования проволок, прутков, флюсов, защитных газов, что значительно снижает себестоимость конструкции.

При использовании СТП возникает необходимость двухсторонней жесткой фиксации изделий, что приводит к невозможности использования способа для сварки сложных пространственных конструкций. Недостатком способа также является высокая стоимость оборудования.

СТП является относительно новым способом, поэтому еще одной проблемой является недостаточная «изученность» процесса, трудно найти в открытых источниках технологию и режимы сварки.

## 1.3 Дефектность

Отсутствие сварочной ванны решает основные проблемы при сварке алюминия: образование пористости, кристаллизационных трещин, выгорание легирующих элементов [5].

Основным дефектом при сварке трением с перемешиванием является несплавление в корне шва. При выполнении СТП в месте выхода рабочего инструмента из стыка в конце шва остается отверстие. Характерными дефектами является вогнутость, возможность появления твердых включений: осколки рабочего инструмента, остатки грязи, масла, жира [6].

## 1.4 Чувствительность к аномалиям сборки и сварки

С помощью СТП возможно сваривать в любом пространственном положении. Для обеспечения качественного сварного соединения требуется обеспечить высокую точность сборки конструкции.

# 2 ЛАЗЕРНЫЕ СПОСОБЫ

Лазерная сварка – это сварка соединений высококонцентрированным источником нагрева.

## 2.1 Виды

Лазерная сварка алюминиевых сплавов выполняется либо традиционными CO<sub>2</sub>-лазерами, либо более современными и прогрессивными волоконными лазерами.

Лазеры бывают как периодического (импульсного), так и непрерывного действия [7].

В качестве источника излучения рекомендуется применять волоконные лазеры, так как уровень мощности, который необходим для начала проплавления в 2 раза меньше, чем у CO<sub>2</sub>-лазера [8], а КПД в 1,5-2 раза выше КПД CO<sub>2</sub>-лазера (30% против 15-20%) [9]. При этом соединения, полученные излучением CO<sub>2</sub> и волоконного лазера, практически не отличаются по внешнему виду и макроструктуре [8].

## 2.2 Достоинства и недостатки

Достоинствами лазерной сварки являются минимальные тепловложения, высокая концентрация нагрева: объем сварочной ванны в несколько раз меньше, чем при дуговой сварке [8,9], минимальная деформация: в 3-5 раз ниже, чем при дуговой сварке [7], высокая производительность за счет скорости сварки: 50-200 м/ч и более [7,9], низкая степень коробления и деформации деталей [8].

Недостатками способа являются высокая стоимость оборудования, снижение прочностных характеристик соединения из-за провисания сварочной ванны [9], для сварки в автоматизированном режиме требуется тщательно выстроить весь производственный цикл.

## 2.3 Дефектность

При лазерной сварке, из-за быстрого охлаждения расплава, алюминиевые сплавы склоны к образованию трещин, наблюдается возникновение чешуйчатости сварного шва [8], при использовании CO<sub>2</sub> лазера возникает большое количество пор [10].

## 2.4 Чувствительность к аномалиям сборки и сварки

Данным способом возможно проводить работы в различных пространственных положениях.

Лазерные способы чувствительны к величине зазора между кромками, что существенно увеличивает трудоемкость сборки конструкций, так как возникает необходимость обеспечения высокой точности сборки (Таблица 1) [7,11].

**Таблица 1.** – Зависимость величины зазора от скорости сварки и толщины металла

Толщина металла, мм	Скорость сварки, мм/сек	Максимально допустимая величина зазора (b), мм
0,8 – 1,5	5,5-22,2	0,12
	22,2-33,3	0,10
1,5 – 3,0	5,5-22,2	0,15
	22,2-33,3	0,12

## 3 ДУГОВЫЕ СПОСОБЫ

Дуговая сварка – это сварка соединений, в которой используется электрическая дуга для нагрева и расплавления металла.

### 3.1 Виды

Дуговые способы сварки алюминия разделяются на две большие группы: с использованием неплавящегося вольфрамового электрода (TIG) и с использованием плавящегося электрода-проволоки (MIG).

*TIG.* Наиболее популярными технологиями TIG сварки являются способы с применением динамических дуг, например, coldArc от компании EWM [12], позволяющий регулировать параметры сварки так, чтобы при изменении расстояния между электродом и изделием, подаваемая энергия сохраняла постоянную составляющую [12].

Для увеличения расплавленного металла и скорости сварки применяют дополнительную присадочную проволоку: холодную или горячую (рис. 2).

*MIG.* Способы MIG сварки алюминиевых сплавов, в основном, подразделяются на импульсные и «холодные» процессы.

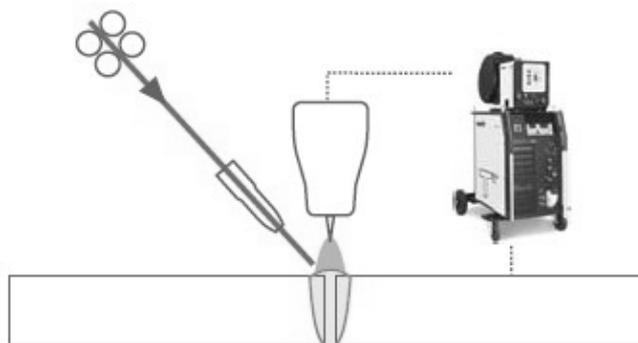


Рис. 2. – Схема TIG сварки с присадкой

«Холодные» способы позволяют уменьшить количество введенного тепла в основной металл за счет резкого снижения сварочного тока при коротком замыкании. Отрыв капли происходит за счет гравитационных сил. В процессе СМТ компании Fronius, отрыв капли происходит еще и с помощью обратного движения сварочной проволоки [13]. Подобные технологии разработаны и другими производителями: ColdArc (EWM), ColdMIG (Merkle), WiseThin (Kemppi), PrecisionPulse (Lincoln Electric).

Импульсные способы позволяют увеличить скорость сварки за счет импульсного увеличения тока.

Сварку алюминиевых изделий с применением импульсной технологии можно производить с помощью процессов Syncro Pulse, PMC (Fronius), Pulse-On-Pulse (Lincoln Electric), SpeedPulse (Lorch) и др.

В процессах Pulse-On-Pulse и SpeedPulse используются высоко- и маломощные импульсы. Данное решение позволило облегчить процесс выполнения сварочных соединений, улучшить внешний вид швов, увеличить глубину проплавления и скорость сварки [14].

Процесс PMC (Pulse MultiControl) за счет высокочастотной составляющей позволяет оценивать положение капли с последующим изменением сварочных параметров, добиться плавного перетекания капли в ванну. Процесс позволяет автоматически поддерживать минимальную дугу, что приводит к уменьшению разбрызгивания (рис. 3).

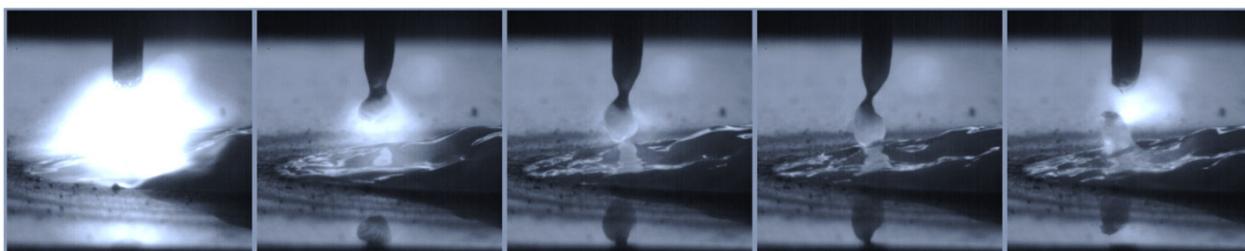


Рис. 3. – Процесс "перетекания" капли в сварочную ванну

Для увеличения скорости сварки используются тандемы (сварка ведется сразу двумя и более проволоками). Например, две проволоки используются в процессе Tandem MIG от компании Lincoln Electric.

### 3.2 Достоинства и недостатки

Основным достоинством дуговых способов является экономичность процесса по сравнению с другими перечисленными способами, легкость автоматизации, отсутствие специализированной оснастки.

Недостатками способа являются более низкая производительность сварочного,

необходимость применять большое количество материалов, относительно низкая концентрация энергии в дуге, неустойчивость горения дуги при высоких скоростях [11].

### 3.3 Дефектность

Большое количество тепла, вводимое во время сварки, может привести к деформации изделия. Применение рациональной конструкции и импульсных или холодных процессов позволит снизить тепловложение, следовательно, деформацию конструкции.

При сварке алюминиевых сплавов есть вероятность появления пор и подрезов. Тщательная подготовка поверхности перед сваркой и соблюдение технологии позволит избежать образования пор, а правильный подбор режима сварки предотвратит образование подрезов.

### 3.4 Чувствительность к аномалиям сборки и сварки

Данным способом можно выполнять качественные сварные соединения во всех пространственных положениях.

Среди перечисленных в статье способов, дуговая сварка является наименее чувствительными к аномалиям изделия и сборки: неравномерной ширине стыка, возможности сварки больших воздушных зазоров.

### 3.5 Гибридные способы

Данные способы сочетают в себе два и более процесса, что позволяет использовать преимущества каждого и нивелировать их недостатки.

*Гибридный способ лазер-дуга.* Сварка алюминия осуществляется лазером в сочетании с неплавящимся или плавящимся электродом [11].

Способ используют в том случае, когда необходимо сварить листы в автоматическом режиме с большой скоростью, низким тепловложением и высоким качеством сварных соединений.

Достоинствами является снижение требований к точности сборки деталей [11], высокая стабильность при высоких скоростях сварки (свыше 60 м/ч [15]), снижение мощности луча, снижение потребления энергии, увеличение эффективности оборудования (в 1.5-2 раза по сравнению с лазерной [11]), снижение затрат на расходные материалы (в 2 раза [16]).

Недостатками являются склонность к формированию подрезов, эрозия неплавящегося электрода [10], высокая стоимость оборудования.

*Гибридная лазерно-плазменная сварка.* Важным преимуществом плазменной сварки является катодная очистка поверхности изделия [11,17].

Микроплазменная составляющая позволяет значительно снизить себестоимость оборудования и увеличить стабильность горения дуги [11].

Недостатком метода является провисание швов, образование подрезов и внутренних пор [15], невозможность достичь стабильного процесса при высоких скоростях сварки [11].

Соединив микроплазменную и лазерную сварку, можно получить высокопроизводительный процесс с повышенным качеством сварных соединений [18], стабилизировать процесс при высоких скоростях, снизить зависимость процесса от оптических свойств поверхности. При сварке происходит очистка поверхности от оксидной пленки [11].

*Двухлучевая лазерная сварка.* Это способ, в котором сварочная ванна формируется за счет воздействия двух лучей лазера.

В настоящее время данная технология недостаточно изучена, поэтому практически не применяется в промышленности [19].

Достоинствами данного способа является устранение прожогов, уменьшение порообразования [11], возможность сварки разнотолщинных деталей и удаления оксидной пленки одним из лазеров.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены различные способы сварки крупногабаритных тонкостенных конструкций ответственного назначения из алюминиевых сплавов.

Несмотря на высокую производительность и возможность сварки с малым вводом тепла, лазерные способы проблематично использовать при сварке, так как необходимо обеспечить высокую точность сборки и максимальную («аптечную») чистоту производства. Из-за высокой стоимости оборудования, применение данных способов целесообразно только при массовом производстве конструкций.

Сварку трением с перемешиванием также затруднительно применять в данных конструкциях, так как способ актуален только для соединения простых по форме изделий, при сварке которых возможно обеспечить жесткое двухстороннее закрепление.

Актуально применение гибридных способов сварки, но, из-за малого количества информации в открытых источниках, возникает проблема подбора режима сварки и оценка этих процессов по критерию – «цена-качество». Высокая стоимость оборудования также сужает область применения данных способов.

Способ дуговой сварки MIG, за счет применения импульсных или «холодных» процессов, позволит решить проблему высокого тепловложения при сварке алюминиевых сплавов. Пониженная чувствительность способа к аномалиям сборки стыкового соединения, по сравнению с лазерной сваркой, значительно снижает трудоемкость изготовления сложной пространственной конструкции, а применение адаптивных алгоритмов управления процессом позволит расширить технологические возможности процесса и перейти от ручной и механизированной сварки к автоматизированной с сохранением высокого показателя по критерию «цена – качество».

Помимо этого, за счет автоматизации и механизации процесса возможно значительное увеличение производительности сварки и повышение стабильности процесса. Относительно низкая стоимость оборудования и простота реализации технологического процесса сварки на базе быстродействующих инверторных источников питания, также является серьезным преимуществом при выборе данного способа [20].

На основе идентификации процесса сварки как объекта управления, авторами запланированы работы по разработке и внедрению автоматизированного комплекса для автоматической сварки упомянутых в статье ответственных изделий из алюминиевых сплавов с решением задач геометрической и технологической адаптации процесса сварки к технологическим возмущениям различной физической природы.

Проведя анализ технологических возможностей рассмотренных выше современных способов сварки, авторы пришли к выводу, что для поставленных задач наиболее рациональными и оптимальными способами являются MIG/TIG способы сварки с применением импульсных технологий. В своих дальнейших исследованиях авторы уделяют внимание совершенствованию этих способов на базе разработки и внедрения автоматизированного оборудования с использованием средств цифрового контроля и управления процессом, а также применения автоматизированных головок с быстродействующими источниками питания и адаптивных роботов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mathers G. The Welding of Aluminium and its Alloys. Cambridge: Pub. Woodhead Publishing, Ltd, 2002, 242 p.
2. Макаров, Э.Л. и др. Теория свариваемости сталей и сплавов [Текст] / Э.Л. Макаров, Б.Ф. Якушин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 487 с.
3. Dawes C.J. Friction stir welding. TALAT. 1999, p. 13. Available at: [http://mitpublications.org/yellow\\_images/1361513532\\_logo\\_File%204.pdf](http://mitpublications.org/yellow_images/1361513532_logo_File%204.pdf)
4. Thomas W.M., Norris I.M., Staines D.G., Watts E.R. Friction stir welding – process developments and variant techniques. SME Summit. Oconomowoc, 3-4 August 2005, Milwaukee, USA. pp. 1–21. Available at: [http://hegesztesportal.hu/tudastar/wt\\_fsw.pdf](http://hegesztesportal.hu/tudastar/wt_fsw.pdf)
5. Threadgill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J. Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews. 2009, Vol. 54, Issue 2, ISSN 0950-6608, DOI: 10.1179/174328009X411136, pp. 49–93.
6. Gibson B.T., Lammlein D.H., Prater T.J., Longhurst W.R., Coxa C.D., Balluna M.C., Dharmaraja K.J., Cooka G.E., Strauss A.M. Friction stir welding: Process, automation, and control. Journal of Manufacturing Processes. 2014, Vol. 16, Issue 1, ISSN 1526-6125, DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.04.002, pp. 56–73.
7. Игнатов, А. Лазерная сварка сталей мощными СО2-лазерами. Часть 1 [Текст] / А. Игнатов // Фотоника. – 2008. – №6. – С. 8.
8. Шиганов, И.Н. и др. Лазерная сварка алюминиевых сплавов [Текст] / И.Н. Шиганов, А.А. Холопов // Фотоника. – 2010. – №3. – С. 6–10.
9. Шиганов, И.Н. и др. Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения [Текст] / И.Н. Шиганов, С.В. Шахов, А.А. Холопов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №6(6). – С. 34–50.
10. Bagger C., Olsen F.O. Review of laser hybrid welding. Journal of Laser Applications. 2005, Vol. 17, №1, DOI 10.2351/1.1848532, p. 13.
11. Григорьянц, А.Г. и др. Гибридные технологии лазерной сварки [Текст] / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.М. Чирков. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 49 с.
12. Инновационные процессы сварки TIG/плазменной сварки от компании EWM [Текст]. – [Б.м.], 2014. – С. 24.
13. Гладков, Э.А. и др. Автоматизация сварочных процессов [Текст] / Э.А. Гладков, В.Н. Бродягин, Р.А. Перковский. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 421 с.
14. Lincoln Electric. Pulse-On-Pulse GMAW (MIG). 2006, p. 4.
15. Шелягин, В.А. и др. Технологические особенности лазерной, микроплазменной и гибридной лазерной-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов [Текст] / В.А. Шелягин, А.М. Оришич и др. // Автоматическая сварка. – 2014. – Т. №5(734). – С. 35–42.
16. Пауль, К. и др. Гибридная лазерная сварка [Текст] / К. Пауль, Ф. Ридель // Фотоника. – 2009. – №1. – С. 2–5.
17. Патон, Б.Е. и др. Микроплазменная сварка [Текст] / Б.Е. Патон и др. – Киев: Наукова думка, 1979. – 248 с.
18. Патон, Б.Е. и др. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин [Текст] / Б.Е. Патон и др. // Автоматическая сварка. – 2002. – №3. – С. 5–9.
19. Грязев, Н.В. Разработка способа двухлучевой лазерной сварки конструкционных низколегированных трубных сталей : автореф. дисс. канд. техн. наук [Текст] / Н.В. Грязев. – М., 2010. – 18 с.
20. Гладков, Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке [Текст] Э.А. Гладков – М: Центр «Академия», 2006. – 432 с.

## REFERENCES

- [1] Mathers G. The Welding of Aluminium and its Alloys. Cambridge. Woodhead Publishing Ltd, 2002, ISBN 1-85573-567-9, 242 p. (in English)
- [2] Makarov E.L., Jakushin B.F. Teorija svarivaemosti stalej i splavov [Theory of weldability of steels and alloys]. – М. Pub. MSTU N.E. Bauman, 2014, ISBN 978-5-7038-3938-6, 487 p. (in Russian)
- [3] Dawes C.J. Friction stir welding. TALAT, 1999, p. 13. Available at: [http://mitpublications.org/yellow\\_images/1361513532\\_logo\\_File%204.pdf](http://mitpublications.org/yellow_images/1361513532_logo_File%204.pdf) (in English)
- [4] Thomas W.M., Norris I.M., Staines D.G., Watts E.R. Friction stir welding – process developments

- and variant techniques. SME Summit. Oconomowoc, 3-4 August 2005, Milwaukee, USA. pp. 1–21. Available at: [http://hegesztesportal.hu/tudastar/wt\\_fsw.pdf](http://hegesztesportal.hu/tudastar/wt_fsw.pdf) (in English)
- [5] Threadgill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J. Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*. 2009, Vol. 54, Issue 2, ISSN 0950-6608, DOI 10.1179/174328009X411136, pp. 49–93. (in English)
- [6] Gibson B.T., Lammlein D.H., Prater T.J., Longhurst W.R., Coxa C.D., Balluna M.C., Dharmaraja K.J., Cooka G.E., Strauss A.M. Friction stir welding: Process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014, Vol. 16, Issue 1, ISSN 1526-6125, DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.04.002, pp. 56–73. (in English)
- [7] Ignatov A. Lazernaja svarka stalej moshhnyimi CO<sub>2</sub>-lazerami [Laser welding of steels by powerful Carbone dioxide lasers]. *Fotonika [Pfonika]*, 2008, №6, ISSN 1993-7296, p. 8. (in Russian)
- [8] Shiganov I., Holopov A. Lazernaja svarka aljuminievyh splavov [Laser welding of aluminum alloys]. *Fotonika [Photonika]*, 2010, №3, ISSN 1993-7296, pp. 6–10. (in Russian)
- [9] Shiganov I.N., Shahov S.V., Holopov A.A. Lazernaja svarka aljuminievyh splavov aviacionnogo naznachenija [Laser welding of aluminium alloys of aviation assignments] *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii [Engineering journal: science and innovations]*, 2012, №6(6), ISSN 2308-6033, p. 2. (in Russian)
- [10] Bagger C., Olsen F. Review of laser hybrid welding. *Journal of Laser Applications*, 2005, Vol. 17, №1, DOI 10.2351/1.1848532, p. 13. (in English)
- [11] Grigoryajanc A.G., Shiganov I.N., Chirkov A.M. Gibridnye tehnologii lazernoj svarki [Hybrid laser welding technology]. M. Pub. MSTU N.E. Bauman, 2004, ISBN 5-7038-2614-4, 49 p. (in Russian)
- [12] Innovacionnye processy svarki TIG/plazmennoj svarki ot kompanii EWM [Innovative welding processes of TIG/plasma welding from EWM company], 2014, pp. 1-24. (in Russian)
- [13] Gladkov Je.A., Brodjagin V.N., Perkovskij R.A. Avtomatizacija svarochnyh processov [Automation of welding processes]. M. Pub. MSTU N.E. Bauman, 2014, ISBN 978-5-7038-3861-7, 421 p. (in Russian)
- [14] Lincoln Electric. Pulse-On-Pulse GMAW (MIG), 2006, p. 1-4. (in English)
- [15] Sheljagin V.A., Orishich A.M. etc. Tehnologicheskie osobennosti lazernoj, mikroplazmennoj i gibridnoj lazernoj-mikroplazmennoj svarki aljuminievyh splavov [Technological features of laser, microplasma and hybrid laser-welding aluminum alloys] *Avtomaticeskaya svarka [Automatic welding]*, 2014, №5(734), ISSN 0005-111X, p. 35-42. (in Russian)
- [16] Paul K., Ridel F. Gibridnaja lazernaja svarka [Hybrid laser welding]. *Fotonika [Pfonika]*, 2009, №1, ISSN 1993-7296, pp. 2–5. (in Russian)
- [17] Paton B.E. etc. Mikroplazmennaja svarka [Microplasma welding]. Kiev. Pub. Naukova Dumka [Scientific thought], 1979, 249 p. (in Russian)
- [18] Paton B.E. etc. Gibridnaja lazerno-mikroplazmennaja svarka metallov malyh tolshhin [Hybrid laser-microplasma welding of thin metals]. *Avtomaticeskaya svarka [Automatic welding]*, 2002, №3, ISSN 0005-111X, p. 5-9. (in Russian)
- [19] Grezev N.V. Razrabotka sposoba dvuhluchevoj lazernoj svarki konstrukcionnyh nizkolegirovannyh trubnyh stalej [Method of dual beam laser welding of tube made from structural low-alloyed steel] : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Abstract of thesis, c.t.s], M. 2010, 18 p. (in Russian)
- [20] Gladkov Je.A. Upravlenie processami i oborudovaniem pri svarke [process and equipment control for welding]. M. Pub. Tsentr Academia [Center "Academy"], 2006, ISBN 5-7695-2301-8, 432 p. (in Russian)

## Modern Methods of Automatic Welding of Responsible Large Dimension Thin-walled Aluminum Workpieces: Analysis of the Technological Capability

A.M. Tupitsyn\* \*\*<sup>1</sup>, E.A. Gladkov\*\*<sup>2</sup>, A.V. Chernov\*\*\*<sup>3</sup>

\* LLC "SVARBI",

6 build, 6 Dorozhny proezd, Moscow, Russia 117545

\*\* Moscow State Technical University by N.E. Bauman,

1 build, 5 Second-Bauman St., Moscow, Russia 105005

\*\*\* Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

<sup>1</sup> e-mail: alexhao@ya.ru ; <sup>2</sup> e-mail: 123777@bk.ru ; <sup>3</sup> e-mail: viti@mephi.ru

**Abstract** – This article analyzes the technological capability of the modern methods of welding large dimension thin-walled aluminum workpieces.

Types, merits and demerits, types of defects which appear when using arc, frictional, laser and hybrid techniques are considered.

The most optimum and rational method of welding is selected according to analysis results.

*Keywords:* automatic welding methods, welding of aluminum alloys, welding of large workpieces, arc welding, friction welding, laser welding, hybrid welding.