

УДК 621.791.12; 621.791.4;  
669.017.3; 669.017.3:620.18

## **ПОЛУЧЕНИЕ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

**Б.М. НЕМЕНЁНОК**, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет,

**А.А. РАДЧЕНКО**, канд. техн. наук, **Д.В. БУБЕН**

ОХП «Институт сварки и защитных покрытий» ГНУ «ИПМ НАН Беларуси»,

**И.В. РАФАЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук, **П.Е. ЛУЩИК**, канд. техн. наук,  
РИУП «НТП БНТУ «Политехник»

*Представлены результаты исследований сварки трением с перемешиванием (СТП) для получения неразъемных соединений сплавов на основе алюминия и титана. Отмечается, что отсутствие правильной оценки реакционной способности сплавов, подлежащих соединению, в том числе повышенная способность титана к окислению при высоких температурах, и конструктивных особенностей соединений может приводить к ряду проблем, связанных с изменением структуры материалов и дефектами в зоне сварки, что приводит к неизбежному ухудшению механических характеристик готовых соединений. Несмотря на различный диапазон температур проведения СТП для сплавов на основе алюминия (400–500 °С) и титана (700–950 °С), возможно получение качественного сварного соединения между этими материалами. Представлены основные границы свариваемости при СТП листовых материалов на основе алюминия и титана, необходимые для разработки модели процесса СТП и обеспечивающие получение качественных стыковых и нахлесточных соединений из разнородных материалов на основе алюминия и титана. Установлено, что качество сварки определяется в наибольшей степени частотой вращения инструмента и скоростью сварки, которые могут изменяться в широком диапазоне значений: частота вращения инструмент от 300 до 900 об/мин; скорость сварки от 25 до 120 мм/мин. При этом частота вращения инструмента оказывает большее влияние на эффективность формирования сварного соединения по сравнению со скоростью сварки.*

**Ключевые слова:** *алюминиевые сплавы, титановые сплавы, неразъемные соединения, сварка трением с перемешиванием, стыковые и нахлесточные соединения, разнородные материалы.*

# FRICION STIR WELDING OF ALUMINUM AND TITANIUM ALLOYS FOR PRODUCING PERMANENT JOINTS

**B.M. NEMENENOK**, Dr. of Engineering Sciences  
Belarusian National Technical University,

**A.A. RADCHENKO**, Ph. D in Technical Sciences, **D.V. BUBEN**  
Welding and Protective Coatings Institute of Powder Metallurgy Institute  
of National Academy of Science of Belarus,

**I.V. RAFALSKI**, Ph. D in Technical Sciences, **P.E. LUSHCHIK**,  
Ph. D in Technical Sciences  
Science and Technology Park of BNTU «Polytechnic»

*The results of studies of friction stir welding (FSW) are presented to obtain permanent joints of aluminum and titanium alloys. It is noted that the lack of a correct assessment of the reactivity of the alloys to be joined, including the increased titanium oxidation ability at high temperatures, and the structural features of the compounds can lead to a number of problems associated with a change in the structure of materials and defects in the welding zone, decreasing the mechanical characteristics of the permanent joints. Despite the different temperature range of the FSW for aluminum (400–450 °C) and titanium (700–950 °C) alloys, it is possible to obtain a high-quality welded joint between these materials. The paper presents the main weldability boundaries in the case of FSW of aluminum and titanium sheet materials, which are necessary for the development of the FSW process and provide high-quality butt and lap joints of friction welding with mixing dissimilar materials based on aluminum and titanium. It has been established that the quality of welding is determined to the greatest extent by the frequency of rotation of the tool and the speed of welding, which can vary over a wide range of values: frequency of rotation of the tool from 300 to 900 rpm; welding speed from 25 to 120 mm/min. In this case, the rotational speed of the tool has a greater effect on the efficiency of the formation of the welded joint compared to the welding speed.*

**Keywords:** *aluminum alloys, titanium alloys, permanent joints, friction stir welding, butt and lap joints, dissimilar materials.*

**Введение.** Применение комбинированных металлоконструкций и изделий из легких сплавов на основе алюминия и титана является востребованным для производства инновационной продукции в различных отраслях промышленности, таких как авиационная, космическая, автомобильная, судостроительная, благодаря сочетанию

удовлетворительной прочности, хорошей пластичности и низкому удельному весу. Однако получение неразъемных соединений этих материалов сопряжено с рядом технических трудностей, и в большинстве случаев традиционная сварка сплавов на основе алюминия и титана обычными методами плавления затруднительна или невозможна [1].

Получение неразъемных соединений из сплавов на основе алюминия и титана представляет собой сложную задачу в связи с существенными различиями физико-химических, теплофизических и механических свойств этих материалов [2]. Для получения неразъемных соединений разнородных материалов в зависимости от эксплуатационных требований и функционального назначения изделий и металлоконструкций могут использоваться различные варианты решения поставленной задачи: применение механических креплений (например, муфтовые, заклепочные, винтовые, болтовые), использование методов пайки, склеивания или сварки [3]. Каждый тип соединения имеет свои преимущества и недостатки, и наиболее подходящий способ будет определяться функциональным назначением и предъявляемыми требованиями к эксплуатационным характеристикам изделий или конструкций [4].

В связи с тем, что инновационные способы получения высокопрочных соединений являются ключевым фактором для расширения областей применения комбинаций разнородных сплавов, в последние годы активно разрабатываются и совершенствуются процессы твердофазной сварки – сварки трением с перемешиванием (СТП), обеспечивающие повышенные требования механической прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости неразъемных соединений различных сплавов при определенных условиях эксплуатации [5–9].

Среди основных преимуществ СТП при получении неразъемных соединений различных сплавов исследователями указываются: низкие остаточные напряжения; мелкий размер зерна сварного шва; малый расход энергии; отсутствие пористости, отсутствие особых требований к процессу сварки [5]. Отмечается, что достоинствами процесса СТП является отсутствие или ограниченное количество интерметаллических соединений в структуре шва, снижающих механические свойства сварного шва, а также, как правило, отсутствие трещин, характерных для традиционных видов сварки [6].

Однако, несмотря на достаточно большой объем экспериментальных данных о процессах СТП, получение качественного неразъемного соединения с заданной структурой и свойствами представляет собой сложную задачу, поскольку требует учета различных факторов и параметров одновременно протекающих процессов тепло- и массопереноса, пластической деформации, контактных явлений и трения [6, 7]. Кроме того, необходимо свести к минимуму образование хрупких интерметаллидов, снижающих механические свойства сварного шва. Обеспечить получение качественных работоспособных соединений из разнородных сплавов на основе алюминия и титана можно при условии правильного выбора параметров процесса СТП [8, 9].

Цель настоящего исследования состояла в установлении основных параметров СТП, обеспечивающих получение сварных соединений разнородных сплавов на основе алюминия и титана без дефектов сварки, путем проведения сравнительного анализа экспериментальных и теоретических данных.

**Основные параметры процесса СТП материалов на основе алюминия и титана.** Получение сварного соединения при СТП основано на нагреве металла в зоне соединения до пластического состояния в результате сил трения, перемешивания и пластического деформирования его в закрытом объеме, ограниченном рабочими поверхностями инструмента и подкладкой. Основными параметрами процесса СТП являются: скорость вращения инструмента, скорость сварки, наклон инструмента, глубина погружения инструмента, осевое усилие, размер и конфигурация рабочих поверхностей бурта и пина, а также величина смещения оси инструмента относительно стыка свариваемых кромок при стыковых швах. Кроме того, для получения качественных соединений большое значение имеет точность сборки стыка и постоянство контакта свариваемых кромок с подкладкой.

Сварка титана с титаном и алюминия с алюминием выполняются на разных режимах, так как у них разные физико-механические свойства.

Согласно [10–13] сварка титана и его сплавов выполняется с использованием следующих значений параметров режимов:

- скорость сварки от 25 до 120 мм/мин;
- частота вращения инструмента от 100 до 300 об/мин;

- угол наклона инструмента от 2 до 3 градусов.

Сварка сплавов на основе алюминия [10–13], в основном, производится при скоростях сварки от 25 до 300 и более мм/мин и частоте вращения инструмента от 200 до 1000 об/мин при углах наклона инструмента от 2 до 3 градусов.

**Методика экспериментальных исследований.** Для проведения экспериментальных исследований использовались листовые материалы из алюминиевых сплавов марок АД0 толщиной 4 и 5 мм и технически чистый титан толщиной 2 мм. Сварка производилась с использованием лабораторной установки, созданной на базе фрезерного станка марки 6Р80 (параметры сварки задаются автоматизированной управляющей системой станка), на плоской стальной подкладке из стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632). При сварке использовался твердосплавный инструмент ВК6, общий вид которого изображен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общий вид инструмента, установленного в оправку, для СТП

Сварка листовых материалов осуществлялась встык на подкладке из листа коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т для уменьшения стока тепла из области формирования шва. Заготовки фиксировались прижимами к столу фрезерного станка (рисунок 2).

В процессе экспериментальных исследований сварка образцов осуществлялась вращающимся инструментом, имеющим угол наклона от 2 до 3 градусов от вертикальной оси в сторону, обратную от направления сварки. Инструмент, вращающийся с заданной частотой, ось вращения которого смещена относительно линии соединения кромок в сторону алюминия на 1–1,5 мм, вертикальным усилием внедрялся в свариваемые кромки до погружения задней кромки бурта в материал кромок на величину 0,2–0,3 мм. После погружения инструмента в свариваемые кромки осуществляется

нагрев рабочей поверхностью инструмента металла свариваемых кромок в результате трения до температуры его пластификации и возникновения вокруг инструмента области устойчивого перемешивания, из которой впоследствии сформируется сварной шов. Для получения линейного шва, после образования вращающегося объема пластифицированного металла свариваемых кромок вокруг рабочей поверхности инструмента, начинается движение инструмента вдоль стыка свариваемых кромок со скоростью сварки. В конце шва инструмент извлекался вверх, оставляя углубление по форме его внешней рабочей поверхности.



Рисунок 2 – Технологическая схема сварки образцов (вдоль) из листовых материалов на столе фрезерного станка

Подготовка и травление образцов производилась в соответствии с СТБ CR 12361 «Разрушающие испытания сварных швов металлических материалов. Реактивы для травления при макроскопическом и микроскопическом исследовании». Для выявления макроструктуры применяли химическое травление шлифов во французском реактиве при 70 °С (ортофосфорная кислота – 75 мл, серная кислота – 15 мл, азотная кислота – 10 мл).

Металлографические (макроскопические) исследования сварных соединений проводились на металлографическом микроскопе ММУ-3 при увеличении  $\times 50$ .

Для мониторинга процесса для сварки трением с перемешиванием использовалась исследовательская система регистрации параметров (далее Система). Система имеет в своем составе датчик че-

тырехкомпонентный вращающийся М34, программное обеспечение, USB-адаптер для подключения к компьютеру. Система обеспечивает измерение сил  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  по трем ортогональным осям координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , крутящего момента  $M_z$  и частоты вращения, которые указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Номинальный диапазон измеряемых сил

Измеряемая сила, момент	Тип хвостовика Тип датчика	Номинальное значение	Номинальный диапазон измерения
$F_x$	Хвостовик – 40 ГОСТ 25827-93 М34-10к-40к-100	10000 Н	$\pm 10000$ Н
$F_y$		10000 Н	$\pm 10000$ Н
$F_z$		40000 Н	$\pm 40000$ Н
$M_z$		100 Нм	$\pm 100$ Нм
$F_x$	Хвостовик – 45 ГОСТ 25827-93 М34-25к-50к-200	25000 Н	$\pm 25000$ Н
$F_y$		25000 Н	$\pm 25000$ Н
$F_z$		50000 Н	$\pm 50000$ Н
$M_z$		200 Нм	$\pm 200$ Нм

Программное обеспечение (ПРОФИ) обеспечивает визуализацию и регистрацию измеряемых данных на персональном компьютере под управлением ОС Windows. Связь с компьютером осуществляется посредством интерфейса USB 2.0.

Главный компонент исследовательской системы регистрации параметров процесса для сварки трением с перемешиванием – датчик четырехкомпонентный вращающийся М34. Датчик предназначен для измерения трех сил  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  по трем ортогональным осям координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и крутящего момента силы  $M_z$ , в процессе вращения. Датчик имеет в своем составе вращающуюся часть – ротор, и неподвижную часть – статор. Общий вид составных частей системы представлен на рисунке 3.

Механические параметры и эксплуатационные ограничения системы:

- а) допускаемая перегрузка относительно номинального значения  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  – 120 %;
- б) допускаемый изгибающий момент силы  $M_x$ ,  $M_y$  – 1500 Нм;
- в) допускаемый крутящий момент силы  $M_z$  – 500 Нм.

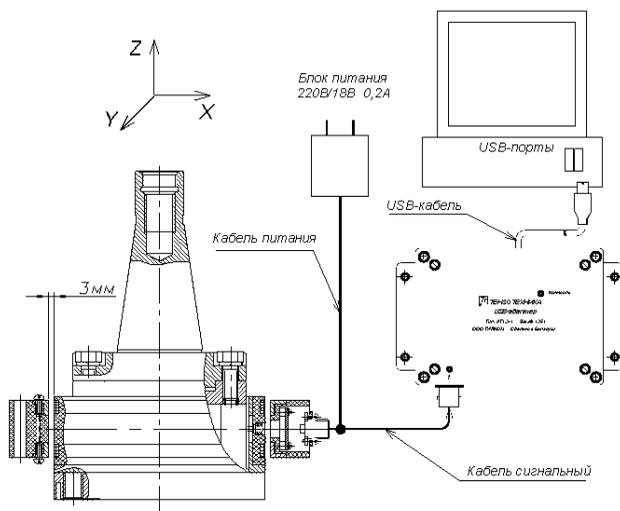


Рисунок 3 – Общий вид и схема подключения датчика М34-10к-40к-100 к компьютеру

**Результаты исследования и их обсуждение.** Как показал анализ источников информации, содержащих результаты экспериментов СТП, несмотря на различный диапазон температур выполнения сварки алюминия (400–450 °С) и титана (700–950 °С), возможно получение качественного сварного соединения между этими материалами. Экспериментально были выполнены исследования по определению границ свариваемости титана и алюминия путем сварки стыковых швов. Металлографический анализ поперечного шлифа стыкового сварного соединения толщиной 4 мм, выполненного при скорости сварки 25 мм/мин, частоте вращения инструмента 560 об/мин и угле наклона инструмента 2 градуса, показал, что видимые дефекты структуры сварного шва отсутствуют.

Также экспериментально проверены граничные параметры для окна свариваемости в точках: 1000 об/мин и скорости сварки 100 мм/мин; 500 об/мин и скорости сварки 120 мм/мин; 200 об/мин и скорости сварки 50 мм/мин; 600 об/мин и скорости сварки 25 мм/мин. Как показал анализ характеристик структуры сварного

шва поперечных шлифов, качество сварки на данных режимах удовлетворительное.

Таким образом, сравнительный анализ экспериментальных измерений и достоверных экспериментальных данных научных публикаций позволил установить основные границы свариваемости при СТП листовых материалов на основе алюминия и титана (рисунок 4).

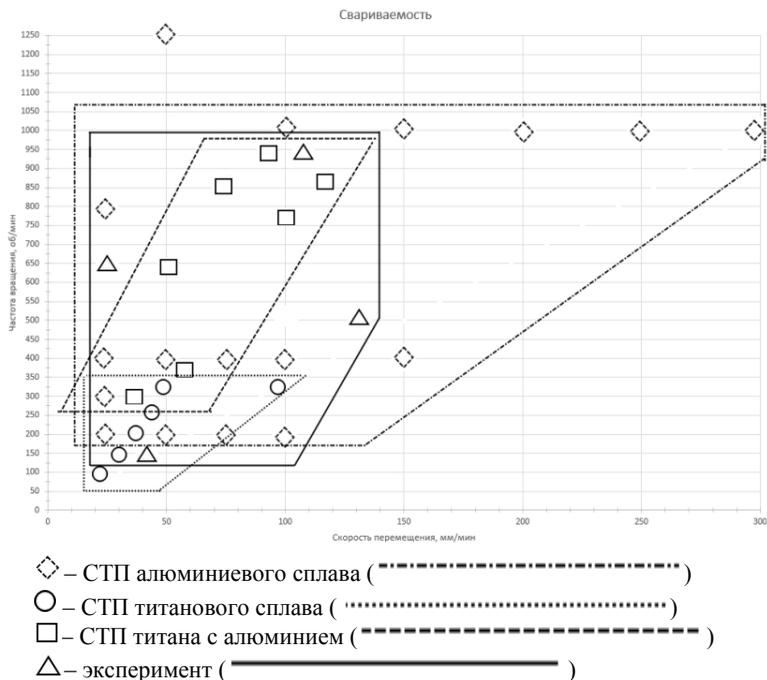


Рисунок 4 – Окна свариваемости для сплавов титана, алюминия и титана с алюминием, по данным работ [10–13] и результатам экспериментальных исследований

## Заключение

1. В настоящее время накоплен обширный опыт применения различных способов получения неразъемных соединений алюминиевых и титановых сплавов, в том числе, твердофазных методов сварки трением с перемешиванием. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что отсутствие правильной оценки

реакционной способности сплавов, подлежащих соединению, в том числе повышенная способность титана к окислению при высоких температурах, и конструктивных особенностей соединений может приводить к ряду проблем, связанных с изменением структуры материалов и дефектами в зоне сварки, что приводит к неизбежному ухудшению механических характеристик готовых соединений. С целью преодоления вышеупомянутых дефектов, несмотря на различный диапазон температур выполнения СТП алюминия 400–450 °С и титана 700–950 °С, возможно получение качественного сварного соединения между этими материалами.

2. Установлено, что при сварке трением с перемешиванием листовых материалов на основе алюминия и титана качество сварки определяется в наибольшей степени частотой вращения инструмента и скоростью сварки, которые могут изменяться в широком диапазоне значений: частота вращения инструмент от 300 до 900 об/мин; скорость сварки от 25 до 120 мм/мин.

3. Комплексный анализ экспериментальных измерений и достоверных экспериментальных данных научных публикаций позволил выявить влияние вращения инструмента и скорости сварки на качество получаемых сварных соединений. Установлено, что частота вращения инструмента оказывает большее влияние на эффективность формирования сварного соединения по сравнению со скоростью сварки.

4. Установлены основные границы свариваемости при СТП листовых материалов на основе алюминия и титана, необходимые для разработки модели процесса СТП и обеспечивающие получение качественных стыковых и нахлесточных соединений сварки трением с перемешиванием разнородных материалов на основе алюминия и титана.

*Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Т19ИНДГ-007 «Исследование межфазного взаимодействия и формирования структуры зерна в швах, полученных сваркой трением, для различных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов с титановыми сплавами».*

## Список литературы

**1. Friction Stir Welding as an effective alternative technique for light structural alloys mixed joints / Fabrizio Micari [et al] // 11-th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19–24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. – Procedia Engineering 81 (2014). – PP. 74–83.**

**2. Winiowski, A.** Brazing of titanium with aluminium alloys / A. Winiowski, D. Majewski // Arch. Metall. Mater. – 2017, Vol. 62 (2). – PP. 763–770.

**3. Способы** получения неразъемных соединений сплавов на основе алюминия и титана / Б.М. Неменёнок [и др.] // Литье и металлургия. – 2020. – № 1. – С. 56–64.

**4. Techniques** for joining dissimilar materials: metals and polymers / Paul Kah [et al] // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2014. – Vol. 36. – PP. 152–164.

**5. Карманов, В.В.** Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва / В.В. Карманов, А.Л. Каменева, В.В. Карманов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2012. – № 32. – С. 67–80.

**6. Liming, Liu.** A Review of Dissimilar Welding Techniques for Magnesium Alloys to Aluminum Alloys / Liming Liu, Daxin Ren, Fei Liu // Materials. – 2014. – Vol. 7. – PP. 3735–3757.

**7. Моделирование** тепловых процессов для улучшения структуры металлов и сплавов методом трения с перемешиванием / А.Л. Майстренко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015, № 1. – С. 5–14.

**8. Recent** Developments and Research Progress on Friction Stir Welding of Titanium Alloys: An Overview / Sivaji Karna [et al] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018, Issue 330. – 16 p.

**9. Aravindkumar, D.** A review on friction stir welding of dissimilar materials between aluminium alloys to copper / D. Aravindkumar, A. Balamurugan // International Journal of Latest Research in Engineering and Technology (IJLRET). – 2016. – Vol. 2, Issue 2. – PP. 9–15.

**10. Mishra, R.S.** Friction stir welding/processing studies of aluminium alloy & titanium 64 / R.S. Mishra, Preeti Rani // International Journal

of Research in Engineering and Innovation. – 2017. – Vol.1, Issue 3. – PP. 209–217.

**11. Friction** stir welding of pure titanium lap joint / H. Liu [et al] // Science and Technology of Welding and Joining. – 2010. – Vol. 15, No. 5. – PP. 428–432.

**12. Edwards, P.D.** Investigation of microstructure, surface and sub-surface characteristics in titanium alloy friction stir welds of varied thicknesses / P. D. Edwards, M. Ramulu // Science and Technology of Welding and Joining. – 2009. – Vol. 14, No. 5. – PP. 476–483.

**13. Effects** on the Surface Texture, Superplastic Forming, and Fatigue Performance of Titanium 6AL-4V Friction Stir Welds / D.G. Sanders [et al] // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2010. – Vol. 19. – PP. 503–509.

## References

**1. Fabrizio Micari.** Friction Stir Welding as an effective alternative technique for light structural alloys mixed joints / Fabrizio Micari, Gianluca Buffa, S. Pellegrino, Livan Fratini // 11<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. – Procedia Engineering 81 (2014). – P. 74–83.

**2. Winiowski, A.** Brazing of titanium with aluminium alloys / A. Winiowski, D.Majewski // Arch. Metall. Mater. – 2017, Vol. 62 (2). – P. 763–770.

**3. Nemenenok, B.M.** *Sposoby polucheniya neraz'emnyh soedinenij splavov na osnove alyuminiya i titana* [Methods for obtaining permanent joints of alloys based on aluminum and titanium] / B.M. Nemenenok, Rafalski I. V., Lushchik P. E., Radchenko A. A. // *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*. – 2020. – No. 1. – P. 56–64.

**4. Paul Kah.** Techniques for joining dissimilar materials: metals and polymers / Paul Kah, Raimo Suoranta, Jukka Martikainen, Carl Magnus // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2014. – Vol. 36. – P. 152–164.

**5. Karmanov, V.V.** *Svarka treniem s peremeshivaniem alyuminiyevyh splavov: sushchnost' i specificheskie osobennosti processa, osobennosti struktury svarnogo shva* [Friction stir welding of aluminum alloys: the essence and specific features of the process, features of the structure of the weld] / Vestnik PNIPU. *Aerokosmicheskaya tekhnika = PNRPU Bul-*

*letin. Aerospace engineering.* – Perm: Perm National Research Polytechnic University Publ., 2012. – No. 32. – P. 67–80.

6. **Liming, Liu.** A Review of Dissimilar Welding Techniques for Magnesium Alloys to Aluminum Alloys / Liming Liu, Daxin Ren, Fei Liu // *Materials.* – 2014. – Vol. 7. – P. 3735–3757.

7. **Majstrenko, A.L.** *Modelirovanie teplovykh processov dlya uluchsheniya struktury metallov i splavov metodom treniya s peremeshivaniem* [Modeling thermal processes to improve the structure of metals and alloys by the method of friction with stirring] / A.L.Majstrenko, V.M. Nesterenkov, V.A. Dutka [et al.] // *Avtomaticheskaya svarka = Automatic welding.* – 2015, No. 1. – P. 5–14.

8. **Sivaji Karna.** Recent Developments and Research Progress on Friction Stir Welding of Titanium Alloys: An Overview / Sivaji Karna, Muralimohan Cheepu, D.Venkateswarulu, V. Srikanth // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2018, Issue 330. – 16 p.

9. **Aravindkumar, D.** A review on friction stir welding of dissimilar materials between aluminium alloys to copper / D. Aravindkumar, A. Balamurugan // *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology (IJLRET).* – 2016. – Vol. 2, Issue 2. – PP. 9–15.

10. **Mishra, R.S.** Friction stir welding/processing studies of aluminium alloy & titanium 64 / R.S. Mishra, Preeti Rani // *International Journal of Research in Engineering and Innovation.* – 2017. – Vol.1, Issue 3. – PP. 209–217.

11. **Liu, H.** Friction stir welding of pure titanium lap joint / H. Liu, K. Nakata, N. Yamamoto, J. Liao // *Science and Technology of Welding and Joining.* – 2010. – Vol. 15, No. 5. – PP. 428–432.

12. **Edwards, P.D.** Investigation of microstructure, surface and sub-surface characteristics in titanium alloy friction stir welds of varied thicknesses / P. D. Edwards, M. Ramulu // *Science and Technology of Welding and Joining.* – 2009. – Vol. 14, No. 5. – PP. 476–483.

13. **Sanders, D.G.** Effects on the Surface Texture, Superplastic Forming, and Fatigue Performance of Titanium 6AL-4V Friction Stir Welds / D.G. Sanders, M. Ramulu, P.D. Edwards, A. Cantrell // *Journal of Materials Engineering and Performance.* – 2010. – Vol. 19. – PP. 503–509.

*Послунута 05.08.2020*

*Received 05.08.2020*