

Научная статья
УДК 621.791.14
DOI: 10.34759/vst-2022-2-211-219

СТРУКТУРНЫЕ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЗОНАМ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБРАЗЦОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИНЕРЦИОННОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

Тимур Тохирович Фозилов¹ ✉, София Андреевна Шумская², Евгений Александрович Кудрявцев³,
Арсений Владимирович Бабайцев⁴

^{1,2,4}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,
Москва, Россия

^{1,3}Научно-исследовательский институт двигателей («НИИД»),
Москва, Россия

¹fozbourne@yandex.ru ✉

Аннотация. Представлены результаты исследования сварки инерционным трением никелевого жаропрочного сплава ЭП741НП. Проведено экспериментальное исследование механических свойств образцов. Проанализирована микроструктура сварных швов и околошовных зон. В ходе исследования было установлено, что данный процесс сварки позволяет получать соединения, которые нельзя получить методами сварки плавлением. Сварка выполнялась на установке ПСТИ-120SW, испытания механических свойств проводились на универсальной разрывной машине Instron, анализ микроструктуры — с помощью металлографического микроскопа.

Ключевые слова: околошовные зоны, субкубоиды, ротационная сварка трением, инерционная сварка трением

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ SFF-2020-0017

Для цитирования: Фозилов Т.Т., Шумская С.А., Кудрявцев Е.А., Бабайцев А.В. Структурные металлографические исследования по зонам сварных соединений образцов, полученных инерционной сваркой трением // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 211-219. DOI: 10.34759/vst-2022-2-211-219

Original article

STRUCTURAL METALLOGRAPHIC STUDIES ON THE WELDED JOINTS ZONES OF THE SAMPLES OBTAINED BY INERTIAL FRICTION WELDING

Timur T. Fozilov¹ ✉, Sofiya A. Shumskaya², Evgenii A. Kudryavtsev³, Arsenii V. Babaitsev⁴^{1,2,4}Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,
Moscow, Russia^{1,3}Research Institute of Engines (“NIID”),
Moscow, Russia¹fozbourne@yandex.ru ✉

Abstract

The article presents the results of the study of inertial friction welding of the EP741NP nickel heat-resistant alloy. Since not all metal materials can be welded by melting methods, there are alternatives, for example, mechanical welding, namely friction welding. A literature review oriented to studying the preceding similar experience on optimal welding modes selection, which was the prime task was accomplished. Due to the friction welding optimal parameters selection more strong and qualitative joints are being produced at the lower temperatures and less heat-affected zones (HAZ) than while fusion-welding methods employing. The major part of works was being conducted on the foundry alloys, since their grain structure is more pliable for these kind of impacts, while our work studied the alloy, being obtained by the metallurgy of granules method. The task is being aggravated by the fact that the alloy itself is liable to the great risk of crack formation while moulding methods employing in view of utterly complex chemical composition. Based on the above said we come to the conclusion that the purpose of the presented work consists in achieving stable, high level of strength, no less than that adduced in the said review. It was established in the course of the study that this welding process allows obtaining the joints, which are not being obtained by the melting welding methods. Welding was being performed on the PSTI-120SW installation. Afterwards, rods were cut out for the samples production and templates for the obtained joint structure studying. Further, experimental study of the samples' mechanical properties was conducted. The experiments were being performed with the Instron universal breaking machine. The samples were being subjected to the tests on the short-time strength at the room temperature, and the long-time strength (for 100 hours) under the load of 900 Mpa at 650°C. As the result of the test, the samples demonstrated rather high qualities as it was predicted. This fact allows our alloys and equipment competing with their foreign counterparts. In the course of this research, the authors studied the microstructure of the weld seams and weld-affected zones. Transverse metallographic samples containing welded joint were prepared for the research. The microstructure analysis was being performed with metallographic microscope. The structure of the samples from the EP741NP alloy is granular. Three types of the strengthening γ -phase are being observed, and it is noted that no defects on the macrostructure are detected in both joint and weld-affected zones. The study of the weld workblanks from the EP741NP alloy revealed the absence of porosity and cracks in the basic material and thermally affected zone. The welded joint up to 200 microns, irrespective of the final material shortening. Transition zone (a zone of the thermal affect) of 500 microns to 1000 microns is being observed. The heat treatment conducting after the welding contributes to the strengthening phase exudation in both seam and weld-affected zone. As the result, the welded joints become equal in strength to the basic material, which will be the next stage of materials treatment in the further research.

Keywords: weld-affected zone, sub-cuboid, rotational friction welding, inertial friction welding

Funding: the work was performed with financial support of the State Project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation SFF-2020-0017

For citation: Fozilov T.T., Shumskaya S.A., Kudryavtsev E.A., Babaitsev A.V. Structural Metallographic Studies on Welded Joints Zones of the Samples Obtained by Inertial Friction Welding. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 211-219. DOI: 10.34759/vst-2022-2-211-219

Введение

В современном мире широко применяются жаропрочные гранулируемые сплавы на основе никеля, в частности в области газо-турбостроения, что, в свою очередь, играет очень важную роль в авиа- и аэростроении. В данный момент разрабатываются новые жаропрочные сплавы на основе никеля с потенциалом роста свойств путем оптимизации режимов термической обработки [1].

Для изготовления деталей ГТД применяются жаропрочные сплавы на никелевой основе. Поскольку многие детали двигателей нужно соединять, а изготовление литой детали с большими степенями подвижности невозможно, актуальным становится вопрос о неразъемных соединениях, выполненных сваркой. Перед болтовыми соединениями неразъемные имеют преимущество в качестве облегчения массы конструкции и как более надежные.

Сварка плавлением жаропрочных сплавов на основе никеля затрудняется появлением микротрещин, которое обусловлено изменением размеров зерен и наличием концентрации вредных фаз на их границах [2, 3]. Сварка трением жаропрочных никелевых сплавов, в сравнении со способами сварки плавлением, обладает рядом преимуществ. Основные её достоинства: низкие значения остаточных напряжений и возможность получения разнородных сварных соединений и материалов, отсутствующая при использовании методов сварки плавлением [4-6]. Также отмечается, что при сварках трением благодаря тому, что заготовки не расплавляются, можно соединять множество различных, в том числе разнородных, сплавов [7].

Авторами работы [8] был поднят вопрос о повышении качества и стабильности эксплуатационных характеристик получаемых материалов, но лишь на этапе производства гранул.

В [9, 10] утверждается, что сильное влияние оказывают выбранные режимы сварки. Большое значение имеет качество подготовки поверхностей, особенно, если они плохо подготовлены. В инерционной сварке трением одна заготовка вращается относительно другой, а затем вращающаяся заготовка вдавливается в другую во время вращения, что создает трение. Это приводит к деформации поверхностей заготовок и, как итог, получается неразъемное сварное соединение [11]. Благодаря подбору оптимальных параметров сваркой трением производятся более прочные и

качественные соединения при более низких температурах и меньших зонах термического влияния (ЗТВ), чем при использовании методов сварки плавлением [12, 13].

В статье [14] представлен подробный металлографический анализ, в частности связь профилей твердости сплавов и морфологических изменений присутствующих выделений в двух никелевых, но разных по химическому составу сплавах. Работа демонстрирует, что инерционная сварка трением сплавов 720Li и IN718 приводит к образованию шва без микропор и микротрещин.

В работе [15] было проведено исследование фазового состава сварного соединения, показавшее, что в материале, помимо наличия крупных частиц вторых фаз с $d_{cp} \approx 10$ мкм, существуют и мелкие частицы γ' -фазы с $d_{cp} \approx 0,6$ мкм. Микрорентгеноспектральный анализ крупных частиц позволил установить, что это карбиды титана и ниобия. Исследование полированной поверхности образцов выявило значительное количество мелких пор в зоне термомеханического влияния (ЗТМВ) и рекристаллизованной зоне (РЗ). Более детальный анализ подтвердил наличие множества пор, расположенных по границам зерен и в тройных стыках. Предполагается, что пористость снижает прочность сплава в рекристаллизованной зоне, а также является следствием образования шейки и разрушения образцов при статическом растяжении у сварного шва. Пластическая деформация при линейной сварке трением приводит к перераспределению карбидов в РЗ. Частицы вытянуты в цепочки в направлении течения материала. Эти цепочки грубых вторых фаз могут выступать в роли концентраторов напряжений и приводить к трещинообразованию в сварном соединении.

В работе [16] была исследована свариваемость жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 с последующей термообработкой полученных соединений методом ротационной сварки трением, осуществляемой на установке ПСТ-50-2М, с осевым усилием 50 тс, а также проведены металлографические исследования сварных образцов без упрочняющей термической обработки после сварки. В результате удалось установить, что структура литого полуфабриката более крупнозернистая, чем структура деформированного полуфабриката, величина зерна которого не превышает 4 балла.

Были определены механические характеристики; установлено, что используемые режимы сварки позволили получить сварные соединения с уровнем прочности не менее 0,9 от уровня прочности основного материала.

Согласно структурным исследованиям, дефектов в сварном шве и околошовной зоне не выявлено. В данной работе также были представлены исследования микроструктуры, микротвердости и ударной вязкости в области сварного шва.

Исследование структуры околошовной зоны и зоны сварного шва показало, что в околошовной зоне наблюдается характерное для ротационной сварки трением термомодеформационное изменение материала, выражающееся в «закручивании» материала в направлении его выхода в грат при сварке. Дефекты в структуре сварного шва и околошовной зоны не обнаружены. Зона шва – узкая, ширина составляет около 1 мм, ширина околошовной зоны со стороны литого полуфабриката – около 3 мм, со стороны деформированного полуфабриката – варьируется в пределах от 1,5 до 2,0 мм. Структура сварного шва – мелкозернистая, что является следствием термомодеформационного воздействия в процессе сварки [17].

Утверждается, что наблюдаемые пики твердости обусловлены рядом факторов: уменьшением размера зерна, упрочнением твердого раствора и измельчением составляющих частиц [18, 19].

В статье [20] проводились исследования влияния технологии ротационной сварки трением сплава ВЖ175 на структуру и прочностные характеристики, а также определялись оптимальные режимы сварки для двух технологических схем: 1) полная термическая обработка + сварка; 2) сварка + полная термическая обработка. В результате выбраны два режима, которые можно

отнести к режимам средней жесткости. На следующем этапе оценивались прочностные и структурные свойства сварных соединений. Результаты механических свойств приведены в табл. 1.

В работе продемонстрировано исследование структуры и прочностных свойств сварных соединений сплава ВЖ175, полученных по двум схемам термической обработки и сварки. Анализ прочностных характеристик показывает, что соединения с полной термической обработкой после сварки обладают свойствами, уровень которых сопоставим с уровнем свойств основного материала при температурах +20 и +650 °С.

Прочностные характеристики соединений, полученных в термоупрочненном состоянии без последующей термической обработки, составляют 0,80–0,87 от значений параметров соответствующих характеристик основного материала. Это обусловлено практически полным отсутствием упрочняющей γ' -фазы в шве и околошовной зоне данных сварных соединений и подтверждается структурными исследованиями.

Проведение термической обработки после сварки способствует выделению упрочняющей фазы в шве и околошовной зоне. В результате сварные соединения становятся равнопрочными основному материалу.

Методика проведения исследования

Сварка заготовок была выполнена на установке ПСТИ-120SW. Макроструктура образцов исследовалась на металлографическом комплексе фирмы «Leica» при увеличении $\times 12,5$. Съемка изображений осуществлялась при помощи цифровой камеры XIMEA (3 мегапикселя) и VEC-335 (3 мегапикселя), подготовка изображений к количественному анализу и их математическая обработка выполнены при помощи компьютерной

Таблица 1

Механические свойства сварных соединений сплава ВЖ175 [4]

Вариант технологии	σ_B^{20} , МПа	σ_B^{650} , МПа	σ_{100}^{650} , МПа	KCU ²⁰ , кДж/м ²
Термообработка + сварка	$\frac{1226 - 1236}{1232}$	1295	638	$\frac{263 - 297}{280}$
Сварка + термообработка	1560	$\frac{1491 - 1530}{1510}$	844	$\frac{230 - 293}{260}$
В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.				

программы Image Expert Pro 3x. Исследование проводилось на образцах из КПЭ диаметром 80 мм из сплава ЭП741НП по технологическим режимам 1—7, сварка которых произведена в полностью термообработанном состоянии. Для исследования микроструктуры подготовлены поперечные шлифы, содержащие сварное соединение и в дальнейшем рассматриваемые на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA10. Для определения механических свойств использовалась универсальная машина Instron 5989.

Анализ исследования

Согласно литературным источникам, выбранный сплав ЭП741НП (хим. состав по ГОСТ Р 52802-2007) относится к категории исследуемых, заготовки из которого для сварки были изготовлены в АО «СМК» с последующей термической обработкой. Филиалом АО «ОДК» «НИИД» была проведена сварка образцов на установке ПСТИ-120SW.

В результате испытаний установлены следующие механические свойства образцов, см. табл. 2.

Основной материал заготовок имеет достаточно мелкозернистое состояние (6—8 баллов зерна по ГОСТ 5639-82). Исследование сварных заготовок из сплава ЭП741НП показало отсутствие пористости и трещин в основном материале и в зоне термического влияния. Зона сварного соединения составляет до 200 мкм, независимо от окончательной осадки материала. Наблюдается переходная зона (зона термического влияния) от 500 до 1000 мкм. В образце 5 наблюдается клиновидная форма сварного соединения.

На рис. 1 представлены изображения макро-структуры исследуемых образцов.

Микроструктура сварных соединений была исследована в зоне соединения на расстоянии 1 мм от переходной зоны и на расстоянии 5 мм от зоны основного материала. На рис. 2 представлена микроструктура наиболее «прочного» из образцов (обр. 3).

Анализ результатов испытания показал:

— разброс прочностных характеристик сварных соединений, полученных при использовании всех режимов, составил приблизительно 2,5%, что свидетельствует о достаточно равномерном гранулометрическом составе свариваемого материала;

— прочность сварного соединения на всех режимах сварки трением составляет от 0,85—1,0 от прочности самого сплава ЭП741НП. Это объясняется образованием разрыва в околошовной зоне;

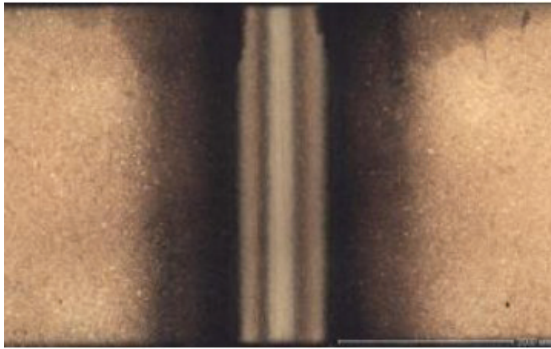
— в ходе исследования макро-структуры установлено, что все сварные соединения имеют практически идентичную структуру, изменение технологических параметров сварки не влияет на размеры зёрен γ -твёрдого раствора в зоне сварного соединения и ЗТВ;

— проведенные металлографические исследования околошовной зоны и зоны сварного шва показали, что в околошовной зоне есть присущее сварке трением термомодеформационное изменение материала, выражающееся в «скручивании» металла в направлении грата при сварке. Зона шва узкая, не более 0,8—1 мм, и имеет неравномерную дендритную структуру. Данный характер

Таблица 2

Результаты исследования сплава ЭП741НП в зависимости от режимов сварки

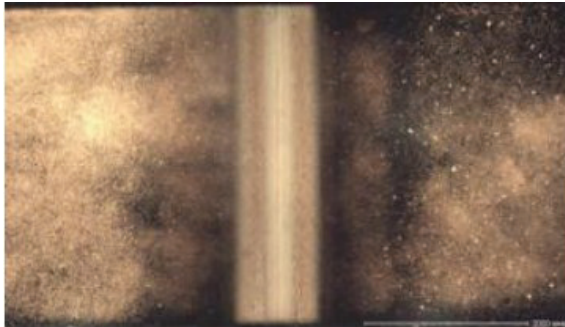
№ п/п	Режимы проведения сварок				Осадка, мм	Исследования сварных образцов из КПЭ			
	Уд. энергия, Дж/мм ²	Нач. частота вращения, об/мин	Окр. скор. внутр. и внешн. радиусов, м/с	Давление в стыке, МПа		при T=20°C		при T=650°C	
						σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %
1	135	477	1,5—2,0	414	3,4	1364	36,2	1144	11,7
2				2,9	1341	19	1150	3,7	
3				2,2	1373	21,7	1150	3,1	
4	73	350	1,1—1,5	357	0,0	1328	33,1	1018	5,3
5	214	600	1,9—2,5	414	11,0	1363	39,9	1177	19,0
6	148	500	1,6—2,1	456	6,1	1311	31,9	1128	8,2
7	142	490	1,5—2,1		5,3	1349	37,4	1192	12,2



а)



б)



в)

Рис. 1. Макроструктура исследуемых образцов (увеличение $\times 12,5$): а – образец 2; б – образец 4; в – образец 5

микроструктуры типичен для сварных соединений сплава ЭП741НП [21]. Микроструктура материала в переходной зоне (ЗТВ) на расстоянии до 1 мм от сварного соединения (рис. 2, б, д, з) и основного материала (рис. 2, в, е, и) представляет

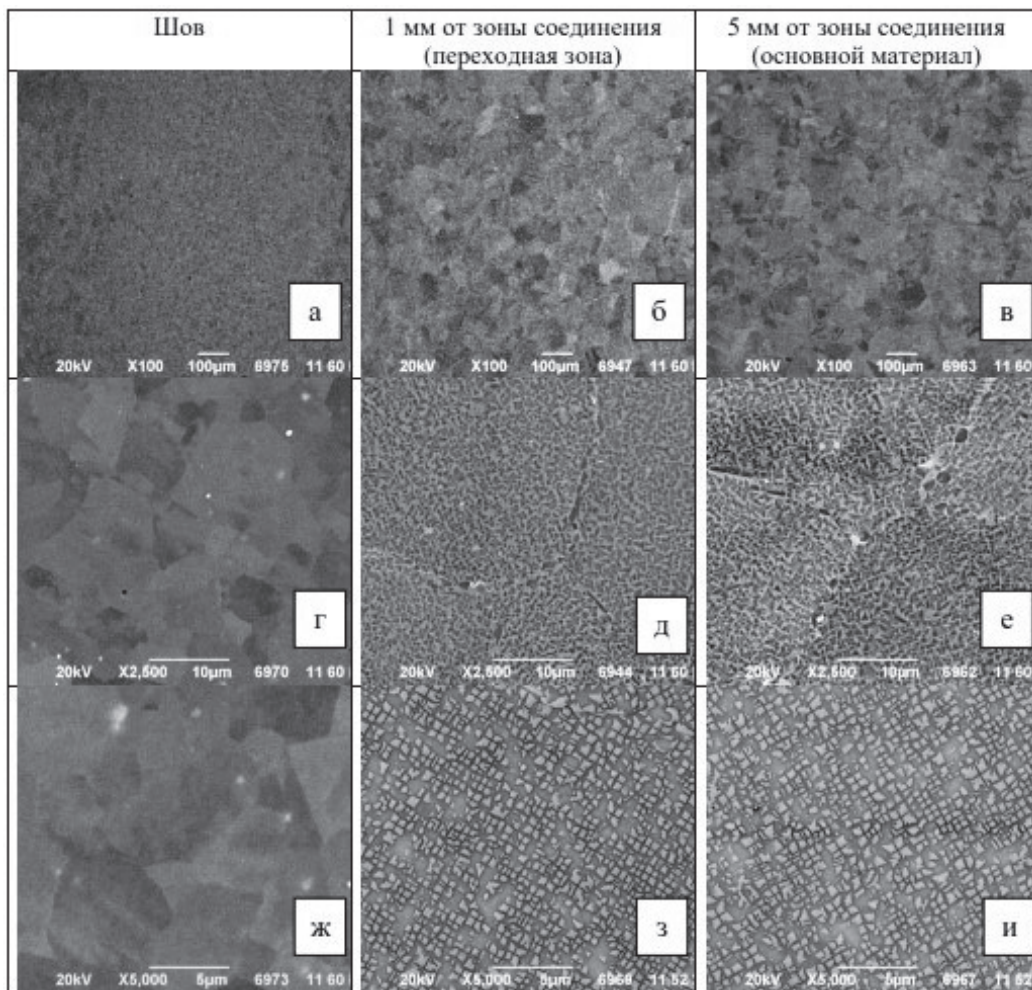


Рис. 2. Микроструктура образца 3 (осадка 3,6 мм): а, б, в – зеренная структура; г, д, е – границы зерен; ж, з, и – морфология частиц γ' -фазы

собой исходные зерна γ -твёрдого раствора 6–8 баллов, внутри которых наблюдаются дисперсные частицы γ' -фазы. Границы зерен упрочнены частицами зернограничной γ' -фазы и карбидов. Структура околошовной зоны идентична структуре основного материала. Зона сварного соединения мелкозернистая (12–13 баллов), состоящая из рекристаллизованных γ зерен размером 2–5 мкм. Исходная γ' -фаза в зоне сварного соединения имеет размер существенно меньше исходного значения вследствие частичного растворения при сварке.

Выводы

В ходе испытаний на кратковременную прочность (при 20 °С) предел прочности не претерпевает существенных изменений, однако при долговременных испытаниях (100 часов при 650 °С) предел прочности и пластичность менялись скачкообразно. Предположительно это связано с термическим воздействием процесса сварки.

Структура образцов из сплава ЭП741НП зернистая, наблюдается три типа упрочняющей γ' -фазы: субкубоиды γ' -фазы, наноразмерные частицы, по форме близкие к кубоидам до 100 нм и сферические частицы наноразмерной фазы размером 10–15 нм. Также наблюдаются двойники и отдельные частицы карбоборидов ниобия. На границах зерен наблюдаются выделения относительно крупных частиц γ' -фазы, вытянутых вдоль границ.

Исследование макроструктуры показало, что значительных дефектов в околошовной зоне и зоне шва нет, однако при рассмотрении микроструктуры несущественные дефекты были выявлены, а значит эти зоны можно охарактеризовать как мелкозернистые. Согласно результатам механических испытаний, прочность зоны шва и околошовной зоны составляет $\geq 0,9$ значений прочности основного материала. Это позволяет утверждать, что инерционная сварка трением является перспективным методом соединения гранулируемых жаропрочных сплавов на основе Ni, в которых не представляется возможным использовать методы плавления.

Список источников

1. Хрящев И.И., Данилов Д.В., Логунов А.В. Разработка экономнолегированного никелевого жаропрочного сплава для рабочих лопаток газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 205-218.
2. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Ч.2 // Сварочное производство. 2004. №9. С. 3-7.
3. Симс Ч.Т., Феликс П.К., Уиттл Д.П. и др. Жаропрочные сплавы для газовых турбин / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1981. — 480 с.
4. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Сварка и безопасность: Сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции (Якутск, 11–12 октября 2012). — Якутск: РИЦ “Офсет”, 2012. С. 21-30.
5. Вилль В.И. Сварка металлов трением. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, 1970. — 176 с.
6. Бабайцев А.В., Бурцев А.Ю., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О. Методика приближенной оценки напряжений в толстостенной осесимметричной композитной конструкции // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=107879>
7. Kimura M., Nakashima K., Kusaka M. et al. Joining phenomena and tensile strength of joint between Ni-based super-alloy and heat-resistant steel by friction welding // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 103, pp. 1297–1308. DOI: 10.1007/s00170-019-03611-7
8. Береснев А.Г., Логунов А.В., Логачева А.И. Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 3. С. 83-89.
9. Bell R.A., Lippold J.C., Adolphson D.R. Evaluation of copper stainless steel inertia friction welds // Welding Journal. 1984. Vol. 63. No. 11, pp. 325-332. URL: https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1984_11_s325.pdf
10. Workman G.M., Nicholas E.D. Friction welding of aluminum and its alloys to various metals // Metals and Materials. 1986. Vol. 2. No. 3, pp. 138–140.
11. Taysom B.S., Sorensen C.D., Nelson T.W. Strength in Rotary Friction Welding of Five Dissimilar Nickel-Based Superalloys // Welding Journal. 2021. Vol. 100, pp. 302-308. DOI: 10.29391/2021.100.027
12. Bouarroudj E.-O., Chikh S., Abdi, S., Miroud D. Thermal analysis during a rotational friction welding // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 110, pp. 1543–1553. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.067
13. Li P., Li J., Dong H. Analytical description of heat generation and temperature field during the initial stage of rotary friction welding // Journal of Manufacturing Processes. 2017. Vol. 25, pp. 181–184. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.12.003

14. Huang Z.W., Li H.Y., Preuss M. et al. Inertia Friction Welding Dissimilar Nickel-Based Superalloys Alloy 720Li to IN718 // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2007. Vol. 38, pp. 1608–1620. DOI: 10.1007/S11661-007-9194-6
15. Бычков В.М., Селиванов А.С., Медведев А.Ю. Исследование свариваемости жаропрочного никелевого сплава ЭП742 методом линейной сварки трением // *Вестник УГАТУ*. 2012. Т. 16. № 7(52). С. 112–116.
16. Саморуков М.Л., Свиридов А.В., Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н. Ротационная сварка трением литых и деформируемых полуфабрикатов жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1(85). С. 15–23. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-15-23
17. Аунг Ч.Т., Бабайцев А.В. Исследование влияния геометрических параметров цилиндрической оболочки под давлением зажатой между абсолютно жесткими пластинами на ширину зоны контакта // *Труды МАИ*. 2020. № 113. DOI: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118135>
18. Leonard A.J. Microstructure and ageing behaviour of FSWs in aluminium alloys 2014A-T651 and 7075-T651 // 2nd International Symposium on Friction Stir Welding (Gothenburg, Sweden 27–28 June 2000).
19. Strangwood M., Berry J.E., Cleugh D.P. et al. Characterisation of the thermo-mechanical effects on microstructural development in friction stir welded age hardening aluminium-based alloys // *1st International Symposium on Friction Stir Welding (Thousand Oaks, California, USA, 14–16 June 1999)*.
20. Лукин В.И., Ковальчук В.Г., Саморуков М.Л., Груднев Ю.М. Исследование влияния технологии ротационной сварки трением деформируемого жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 на структуру и прочностные характеристики сварных соединений // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 114–121.
21. Бабайцев А.В., Рабинский Л.Н., Ян Н.М. Методика оценки остаточных напряжений в образцах из сплава AlSi10Mg, полученных по технологии SLM // *Труды МАИ*. 2021. № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159788>

References

1. Khryashchev I.I., Danilov D.V., Logunov A.V. Developing a sparingly doped high-temperature nickel alloy for gas turbine blades. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 205–218.
2. Sorokin L.I. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, no. 9, pp. 3–7.
3. Sims Ch.T., Felix P.K., Whittle D.P. et al. *Zharoprochnyye splavy dlya gazovykh* (Superalloys for gas turbines), Moscow, Metallurgiya, 1981, 480 p.
4. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. *Svarka i bezopasnost': sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Yakutsk, 11–12 October 2012)*. Yakutsk, RITs “Ofset”, 2012, pp. 21–30.
5. Vill V.I. *Svarka metallov treniem* (Welding of metals by friction), Moscow, Leningrad, Mashinostroenie, 1970, 176 p.
6. Babaitsev A.V., Burtsev A.Yu., Rabinskii L.N., Solyaev Yu.O. *Trudy MAI*, 2019, no. 107. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=107879>
7. Kimura M., Nakashima K., Kusaka M. et al. Joining phenomena and tensile strength of joint between Ni-based super-alloy and heat-resistant steel by friction welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, pp. 1297–1308. DOI: 10.1007/s00170-019-03611-7
8. Beresnev A.G., Loghunov A.V., Loghachiova A.I. Some problems related to refinement of high-temperature alloys produced by means of granular metallurgy techniques. *Aerospace MAI Journal*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 83–89.
9. Bell R.A., Lippold J.C., Adolphson D.R. Evaluation of copper stainless steel inertia friction welds. *Welding Journal*, 1984, vol. 63, no. 11, pp. 325–332. URL: https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1984_11_s325.pdf
10. Workman G.M., Nicholas E.D. Friction welding of aluminum and its alloys to various metals. *Metals and Materials*, 1986, vol. 2, no. 3, pp. 138–140.
11. Taysom B.S., Sorensen C.D., Nelson T.W. Strength in Rotary Friction Welding of Five Dissimilar Nickel-Based Superalloys. *Welding Journal*, 2021, vol. 100, pp. 302–308. DOI: 10.29391/2021.100.027
12. Bouarroudj E.-O., Chikh S., Abdi, S., Miroud D. Thermal analysis during a rotational friction welding. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 110, pp. 1543–1553. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.067
13. Li P., Li J., Dong H. Analytical description of heat generation and temperature field during the initial stage of rotary friction welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 25, pp. 181–184. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.12.003
14. Huang Z.W., Li H.Y., Preuss M. et al. Inertia Friction Welding Dissimilar Nickel-Based Superalloys Alloy 720Li to IN718. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, vol. 38, pp. 1608–1620. DOI: 10.1007/S11661-007-9194-6
15. Bychkov V.M., Selivanov A.S., Medvedev A.Yu. *Vestnik UGATU*, 2012, vol. 16, no. 7(52), pp. 112–116.
16. Samorukov M.L., Sviridov A.V., Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1(85), pp. 15–23. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-15-23
17. Aung Ch.T., Babaitsev A.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. DOI: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118135>

18. Leonard A.J. Microstructure and ageing behaviour of FSWs in aluminium alloys 2014A-T651 and 7075-T651. *2nd International Symposium on Friction Stir Welding (Gothenburg, Sweden 27-28 June 2000)*.
19. Strangwood M., Berry J.E., Cleugh D.P. et al. Characterisation of the thermo-mechanical effects on microstructural development in friction stir welded age hardening aluminium-based alloys. *1st International Symposium on Friction Stir Welding (Thousand Oaks, California, USA, 14-16 June 1999)*.
20. Lukin V.I., Koval'chuk V.G., Samorukov M.L., Gridnev Yu.M. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie*, 2011, no. SP2, pp. 114-121.
21. Babaitsev A.V., Rabinskii L.N., Yan N.M. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159788>

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; одобрена после рецензирования 06.04.2022; принята к публикации 18.04.2022.

The article was submitted on 01.02.2022; approved after reviewing on 06.04.2022; accepted for publication on 18.04.2022.