
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.791.14

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СПЛАВА ВЖ178П ПОСЛЕ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

© 2023 г. Т. Т. Фозилов^{1,2,*}, М. Г. Яковлев^{2,3,**}, А. В. Бабайцев^{1,***}¹Московский авиационный институт, Москва, Россия²Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей,
Москва, Россия³Московский государственный технологический университет “Станкин”, Москва, Россия

*e-mail: fozbourne@yandex.ru

**e-mail: maxx81@list.ru

***e-mail: ar77eny@gmail.com

Поступила в редакцию 10.11.2022 г.

После доработки 05.02.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2023 г.

В настоящей статье приведены структурные металлографические исследования жаропрочного сплава на основе никеля марки ВЖ178П после ротационной сварки трением на уникальной установке российского производства ПСТИ-400. В ходе проведенного исследования проанализировано воздействие отдельно взятых параметров режимов сварки по отдельности и в совокупности, как на микроструктуру сварного соединения, околошовной зоны и основного материала, так и на показатели микротвердости по Виккерсу в этих областях. После подготовки, сварки и вырезки образцов проведена термическая обработка, результаты которой представлены в настоящей статье соответственно.

Ключевые слова: ротационная сварка трением, микротвердость, кубоиды, зона термомеханического влияния

DOI: 10.31857/S0235711923030045, **EDN:** PQEWWB

В современном авиадвигателестроении постоянно возрастают требования к комплексу эксплуатационных характеристик перспективных двигателей, их деталям и материалам. Сейчас в газотурбостроении широко применяются жаропрочные гранулируемые сплавы на основе никеля. Такие сплавы отличаются высокой плотностью ($\geq 8300 \text{ кг/м}^3$), что говорит о большом весе любых конструкций, также применение резьбовых соединений в деталях ГТД не является актуальным в виду увеличения массы узлов и двигателей в целом и зоны крепления будут служить концентраторами напряжений, а значит, актуальным становится вопрос о неразъемных сварных соединениях.

Но подобного рода сплавы имеют большой недостаток. Даже применение электронно-лучевой сварки не является оптимальным, поскольку гранулируемые сплавы на основе никеля склонны к трещинообразованию при плавлении [1].

Сварка трением (ротационная и инерционная) при соответствующих параметрах процесса может производить более прочные и бездефектные соединения с более низкими пиковыми температурами и меньшими зонами термического влияния (ЗТВ), чем при сварке плавлением. Поэтому для изготовления валов, роторов и турбин ГТД

из современных материалов перспективно использовать ротационную и инерционную сварку трением [2–9].

Рассматривая проблему более детально, можно сказать, что ротационная сварка трением жаропрочных никелевых сплавов, в сравнении со способами сварки плавлением обладает рядом преимуществ. Основными ее достоинствами являются: низкие значения остаточных напряжений; возможность получения разнородных сварных соединений и материалов, которые отсутствуют при использовании сварки плавлением.

В перспективных газотурбинных двигателях к жаропрочным сплавам на основе никеля предъявляются очень высокие требования, одним из которых является новый сплав ВЖ178П из-за его высоких механических свойств, по заявлениям ВИАМ (σ_B свыше 1400 МПа). Поскольку полуфабрикаты данного сплава получают металлургией гранул, и он склонен к трещинообразованию, был выбран способ сварки заготовок в твердой фазе [10–12].

Также необходимо принять во внимание, что из-за сложнолегированного химического состава жаропрочных сплавов на основе никеля ключевую роль при достижении требуемых физико-механических свойств играет термическая обработка. При ее проведении не только релаксируются временные напряжения и убираются остаточные напряжения, а также улучшается микроструктура и возрастают эксплуатационные и механические свойства [13].

Результаты исследований. В настоящей статье основной целью термической обработки служит получение упрочняющей γ' -фазы. Благодаря ее распределению и правильному формообразованию (кубоидному) в структуре сплава значительно возрастают механические свойства при высоких температурах.

В ходе исследования был выполнен сравнительный анализ образцов без термической обработки и в результате ее воздействия на новый жаропрочный гранулируемый сплав ВЖ178П после ротационной сварки трением (РСТ) на установке ПСТИ-400.

В рамках исследования были сварены кольца из заготовок ВЖ178П диаметром 200 мм, с толщиной стыкового бурта 10 мм.

После этого из сваренных колец были вырезаны темплеты для металлографических исследований и замеров микротвердости в зонах основного материала, в зоне термомеханического влияния и сварном шве. Затем образец КО-2 был термообработан по режиму закалки.

Образец КО-1 термообработке не подвергался. При исследовании микроструктуры образца установлено следующее: 1) в микроструктуре основного материала (ОМ) γ' -фаза имеет правильную кубоидную форму (рис. 1а).

В виду термического воздействия инерционной сварки трением наблюдается полное, либо частичное растворение упрочняющей фазы в стыковой зоне (ЗТМВ + шов), однако после закалки образца КО-2, были выявлены следующие результаты: 1) микроструктура основного материала однородная и типична относительно предыдущих сварок, в тонкой структуре (рис. 2а) γ' -фаза правильной формы, в остальном (по границам и на стыке с ЗТМВ) аналогична структуре самой ЗТМВ; 2) в зоне термомеханического влияния наблюдается однородность, она достаточно узка (0,8–0,85 мм) и состоит из полиэдрических зерен. В тонкой структуре (рис. 2б) есть частичное растворение γ' -фазы в γ -основе, по границам зерен γ' -фаза сосредоточена крупными и избыточными кусками неправильной формы. Границы между сварным швом и ЗТМВ не выражены, структура между ними бездефектна, а также схожа по форме и выделениям γ' -фазы.

Далее была измерена микротвердость образцов, результаты указаны в табл. 1.

Анализ результатов. Полученные результаты непосредственно связаны с параметрами режимов сварки, поскольку окружная скорость, давление сварки, усилие и удельная энергия в случае с образцом КО-1 значительно выше, чем при сварке КО-2. Сам металл был подвержен более высокому давлению и, вследствие этого, микротвердость

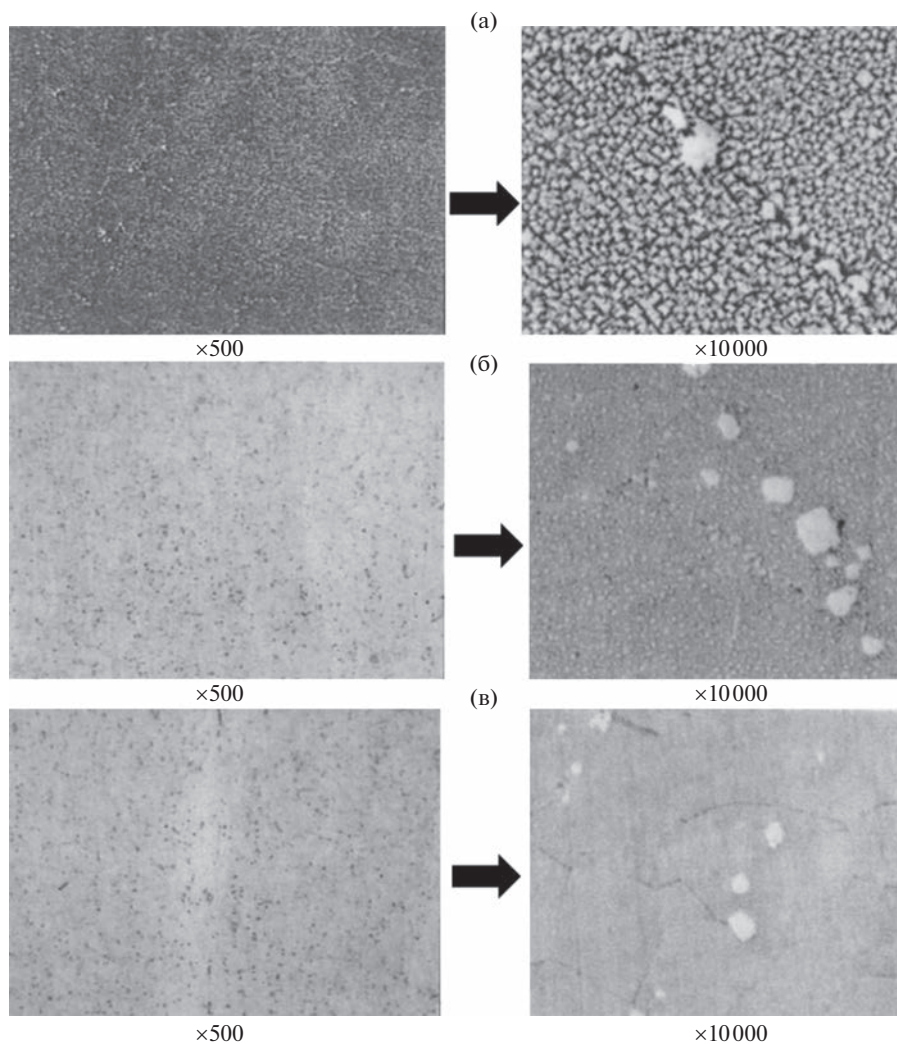


Рис. 1. Микроструктура образца КО-1 из сплава ВЖ178П без ТО после сварки: (а) — зона основного материала; (б) — зона термомеханического влияния—сварной шов; (в) — середина сварного шва.

возросла, поэтому показания между зонами сварного соединения и основного материала так сильно различаются.

В процессе сварки образца КО-2 параметры давления и удельной энергии были на среднем уровне, однако момент инерции почти в 2 раза выше, чем при сварке образца КО-1, за счет чего, предположительно, осадка вышла на 1.2 мм больше. Вероятно, такой характер носит воздействие концентрации момента инерции в зоне контакта и резкой остановки сварочного процесса. Этим также объясняется, что влияние на ЗТМВ не так значительно.

Оборудование. Предсварочная подготовка образцов выполнена на токарном (ТВ-7) и фрезерном (Millstar ВМН2200) станках. Сварка проведена на отечественной установке ПСТИ-400, вырезка образцов выполнена на электроэрозионном станке

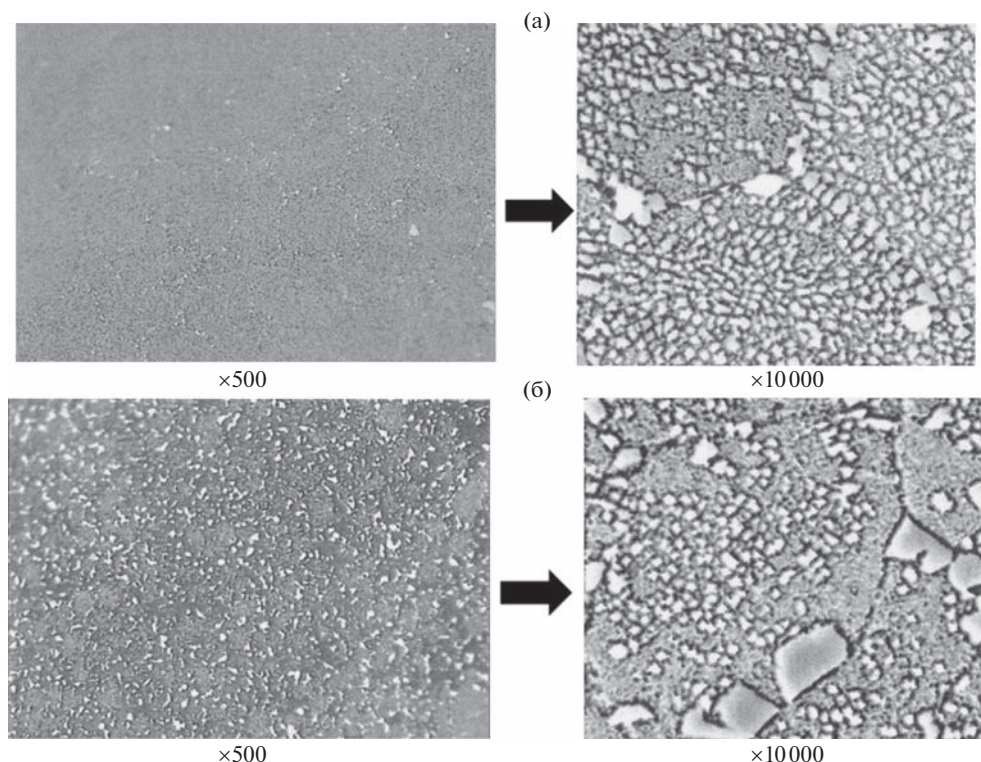


Рис. 2. Микроструктура образца КО-2 из сплава ВЖ178П после сварки и закалки: (а) — зона основного материала; (б) — зона термомеханического влияния (ЗТМВ)—сварной шов.

AMStech CHMER AW. Термическая обработка проводилась в печи с воздушной атмосферой ПКЭ-10. Металлографические исследования проводились на растровом электронном микроскопе FE-SEM Zeiss SUPRA 25.

Выводы. В ходе проведенной научно-исследовательской работы установлено, что возможно получение сварного соединения с отсутствием дефектов в виде непроваров во всех зонах, однако вместе с этим также происходит полное, либо частичное растворение γ' -фазы в ЗТМВ и сварном шве до послесварочной термической обработки, а при наличии в этих зонах γ' -фазы ее форма в основном сыпобразная и неправильная.

После проведенной термической обработки по режиму закалки получены следующие результаты: 1) структура сварного шва остается бездефектной; 2) выявлена более крупная фракция γ' -фазы, что предполагает возможность вторичной упроч-

Таблица 1. Величина осадки и микротвердость различных зон образцов

Шифр образца	Величина осадки, мм	Микротвердость (HV_{cp}), кгс/мм ²		
		сварной шов	ЗТМВ	основной материал
КО-1	4.4	465–479	465–479	383
КО-2	5.6	447–450	397–411	443–451

няющей γ' -фазы именно в сварном шве и ЗТМВ. Отмечается, что выделения упрочняющей фазы в сварном шве после термической обработки также неправильной формы.

Таким образом, благодаря влиянию закалки микроструктура сварного соединения улучшается, но следует провести дальнейшие исследования в данной области для получения правильной формы γ' -фазы и ее равномерного распределения по всей периферии сварного шва.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена с финансовой поддержкой гранта Президента Российской Федерации МК-398.2022.4.

БЛАГОДАРНОСТИ

Особая благодарность выражается директору филиала АО «ОДК» «НИИД» Сергею Петровичу Павлиничу, начальнику лаборатории «Электронно-лучевой сварки» филиала АО «ОДК» «НИИД» Евгению Александровичу Кудрявцеву и директору дирекции института № 9 МАИ (НИУ) Льву Наумовичу Рабинскому.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов сторон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тайсом Б.С., Соренсен С.Д., Нельсон Т.В. Прочность при ротационной сварке трением пяти разнородных суперсплавов на основе никеля // Сварочный журнал 100. 2021. № 9. С. 302. <https://doi.org/10.29391/2021.100.027>
2. Елисеев Ю.С., Масленков С.Б., Гейкин В.А., Поклад В.А. Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей. М.: Наука и технологии, 2001. 544 с.
3. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Ч. 2 // Сварочное производство. 2004. № 9. С. 3.
4. Сорокин Л.И. Образование горячих трещин при сварке жаропрочных никелевых сплавов // Сварочное производство. 2005. № 7. С. 29.
5. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // Крылья Родины. 2012. № 3–4. С. 34.
6. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 52.
7. Egorova O.V., Kurbatov A.S., Rabinskiy L.N., Zhavoronok S.I. Modeling of the dynamics of plane functionally graded waveguides based on the different formulations of the plate theory of I.N. Vekua type // Mechanics of Advanced and Structures. 2019. V. 28 (5). P. 506. <https://doi.org/10.1080/15376494.2019.1578008>
8. Lurie S., Rabinskiy L.N., Kriven G.I., Makovskii S.V. Effective dissipative properties of a whiskered layer in modified fibrous composites with whiskered fibres. December 2020 // Periódico Tchê Química. 2020. Vol. 17. № 36. P. 978. https://doi.org/10.52571/PTQ.v17.n36.2020.993_Periodico36_pgs_978_993.pdf
9. Babaytsev A.V., Prokofiev M.V., Rabinskiy L.N. Mechanical properties and microstructure of stainless steel manufactured by selective laser sintering // Nanoscience and Technology: An Int. J. 2017. V. 8. № 4. С. 359.

-
10. *Huang Z.W., Li H.Y., Preuss M., Karadge M., Bowen P., Bray S., Baxter G.* Inertia Friction Welding Dissimilar Nickel-Based Superalloys Alloy 720Li to IN718 // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2007. V. 38. P. 1608.
<https://doi.org/10.1007/S11661-007-9194-6>
 11. *Бычков В.М., Селиванов А.С., Медведев А.Ю., Супов В.А., Большаков Б.О., Гринь Р.Р., Мусин Ф.Ф.* Исследование свариваемости жаропрочного никелевого сплава ЭП742 методом линейной сварки трением // *Вестник УГАТУ*. 2012. Т. 16. № 7 (52). С. 112.
 12. *Сухоруков Р.Ю.* Моделирование технологических процессов изготовления осесимметричных деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов методом раскатки в сверхпластических условиях // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2020. № 2. С. 80.
 13. *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. С. 4.