

---

---

**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<sup>1,2,\*</sup>, М. Г. Яковлев<sup>2,3,\*\*</sup>, А. В. Бабайцев<sup>1,\*\*\*</sup><sup>1</sup>*Московский авиационный институт, Москва, Россия*<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей,  
Москва, Россия*<sup>3</sup>*Московский 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 ( $\sigma_B$  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 сложного легированного 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  $\gamma'$ -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.

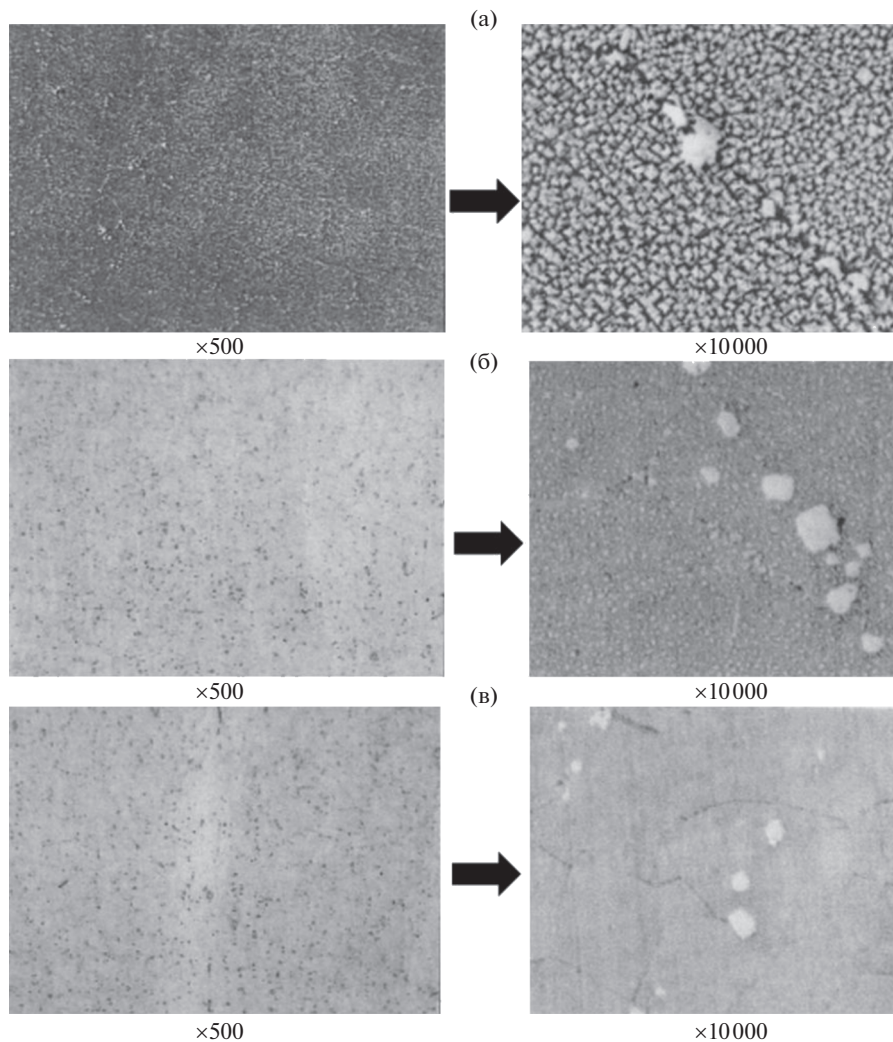
После этого из сваренных колец были вырезаны темплеты для металлографических исследований и замеров микротвердости в зонах основного материала, в зоне термомеханического влияния и сварном шве. Затем образец КО-2 был термообработан по режиму закалки.

Образец КО-1 термообработке не подвергался. При исследовании микроструктуры образца установлено следующее: 1) в микроструктуре основного материала (ОМ)  $\gamma'$ -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)  $\gamma'$ -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  $\gamma'$ -фазы в  $\gamma$ -основе, по границам зерен  $\gamma'$ -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  $\gamma'$ -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

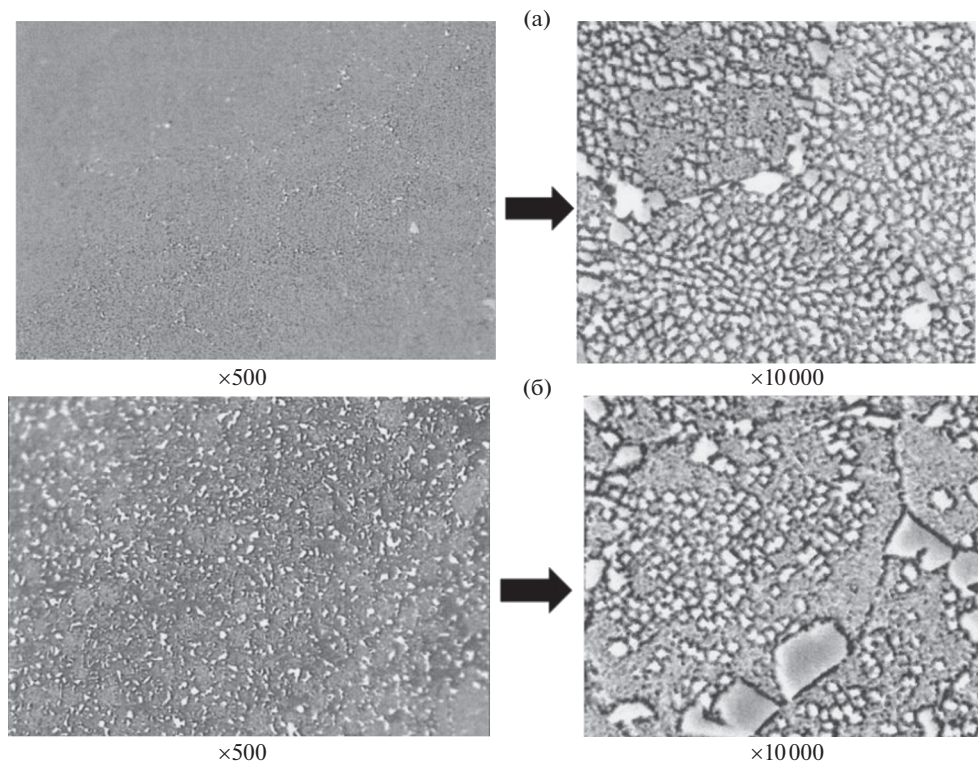


**Рис. 1.** Микроструктура образца КО-1 из сплава ВЖ178П без ТО после сварки: (а) – зона основного материала; (б) – зона термомеханического влияния–сварной шов; (в) – середина сварного шва.

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  $\gamma$ -фазы в ЗТМВ и сварном шве до послесварочной термической обработки, а при наличии в этих зонах  $\gamma$ -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  $\gamma$ -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 <sup>2</sup>		
		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  $\gamma'$ -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  $\gamma'$ -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. № 5. 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](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.