

УДК 378 (063)

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-46-53

## Разработка технологии роботизированной лазерной сварки тонкостенных изделий из жаропрочных сплавов

**С. Е. Крылова**, доктор технических наук, доцент, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

**С. П. Оплеснин**, соискатель, ООО «Технология», Оренбург, Россия

**А. П. Фот**, доктор технических наук, профессор, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

**А. У. Ибрагимов**, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**В. А. Завьялов**, ООО «Технология», Оренбург, Россия

*Рассмотрены результаты разработки режимов роботизированной лазерной сварки пространственных сварных соединений тонкостенных изделий из жаропрочных сталей. Обоснована актуальность применения данного способа получения неразъемных соединений для крупногабаритных тонкостенных конструкций авиационной промышленности. Оговорены технологические сложности и условия модернизации роботизированного лазерного комплекса на базе непрерывного твердотельного лазера ЛС-2 для реализации технологии сварки пространственных элементов из жаропрочных сплавов. На основе структурных и дюротметрических исследований подтверждены преимущества контактной лазерной сварки без присадочной проволоки. Указаны оптимизированные параметры режима лазерной роботизированной сварки для сплава ХН50ВМКТЮР. Показана возможность управления свойствами сварного соединения посредством увеличения вкладываемой мощности лазерного излучения в пределах 0,7...1,8 кВт и скорости сварки в пределах 150...200 м/ч. Приведены сравнительные исследования влияния параметров различных способов производственной сварки на металлографию сварного шва и технологическую прочность сварного соединения.*

*Анализ микроструктуры показал, что литая структура сварного шва, полученного лазерной сваркой, отличается от структуры, полученной классическими способами сварки, характерным мелкочаеистым дисперсным строением дендритных кристаллов и значительно меньшей по протяженности зоной термического влияния до 2...2,2 мм. Сварное соединение при этом обладает прочностью, не уступающей основному металлу, и пластичностью, отвечающей всем эксплуатационным требованиям к изделию. Установлено, что по границам ячеисто-дендритной структуры при охлаждении в интервале 650...850 °С интенсивно выделяются карбидные и интерметаллидные включения сложного химического состава, что формирует эффект упрочнения металла шва.*

*Выполнена оценка стойкости сварных соединений против образования кристаллизационных (горячих) трещин. Показано, что лазерная сварка сталей с большими скоростями охлаждения металла шва на уровне 2000 °С/сек. в температурном интервале хрупкости благоприятно сказывается на стойкости сварных соединений против образования кристаллизационных горячих трещин. Данному факту способствует минимизация выделения в металле шва нежелательной  $\gamma'$ -фазы при охлаждении.*

**Ключевые слова:** лазерная сварка, пространственные сварные соединения, дендритное строение, зона термического влияния, температурный интервал хрупкости, кристаллизационные (горячие) трещины.

### Введение

**В** настоящее время лазерные технологии в современном производстве закономерно пользуются большим спросом как у крупных производителей, так и в малых фирмах, поскольку они обеспечивают целый ряд преимуществ, непосредственно влияющих на потребительские характеристики продукции: позволяют повысить качество, производительность, снизить себестоимость, обеспечить экологическую чистоту производства.

С появлением мощных оптоволоконных лазеров возникли новые возможности использова-

ния лазерных технологий в машиностроении. За счет целого ряда факторов лазерная сварка эффективно применяется в области производства деталей авиационной промышленности, позволяя создавать компоненты нового поколения, а также эффективно заменять традиционные методы сварки, обеспечивая ряд технологических преимуществ процесса: характерные скорости сварки могут достигать до 2000 м/ч; зона термического влияния ограничена площадью лазерного пятна, что обеспечивает высокую технологическую прочность и пластичность сварных соединений, минимальные деформации

и остаточные напряжения; широкий спектр свариваемых материалов – от высоколегированных высокоуглеродистых марок стали до сплавов меди и титана, керамики и стекла; возможность сварки разнородных материалов; хорошая управляемость и гибкость процесса; перемещение луча по поверхности детали любой траектории; возможность полной автоматизации.

Развитие современной робототехники в совокупности с лазерной технологией сварки позволило минимизировать влияние человеческого фактора при выполнении операций сварки, расширить спектр модифицируемых и контролируемых в процессе работы параметров (вид и длину сварного шва, расположение шва в пространстве, определение последовательности выполнения операций, время подачи защитного газа до начала и после окончания сварки, данные для автоматического высвобождения проволоки при приварке, скорость подачи и оттягивания проволоки, геометрию шва) [1].

Таким образом, появилась возможность перевести сварку крупногабаритных тонкостенных конструкций на новый уровень качества. Учитывая, что перспективные летательные аппараты должны обладать скоростью примерно от 6000 км/ч, а условия работы на таких скоростных режимах связаны с жесткими требованиями к аэродинамике, высокой рабочей температурой (от 700 °С) и вибрационными нагрузками, отработка режимов роботизированной лазерной сварки пространственных сварных соединений тонкостенных изделий из жаропрочных сталей становится все более востребованной и актуальной, требующей применения новых конструктивно-технологических решений и материалов.

**Цель исследования** – разработка технологии роботизированной лазерной сварки пространственных сварных соединений тонкостенных конструктивных элементов изделий авиационного комплекса из жаропрочных сталей.

Несмотря на ряд вышеуказанных преимуществ технологий лазерной сварки, оптимизации и отработке данных процессов на практике сопутствует ряд технологических сложностей: наукоемкое и дорогостоящее оборудование, требуемая высокая квалификация персонала, а также высокие требования к материалам, качеству сборки соединения (зазор не более 0,1...0,25 мм) и технологическому оснащению для сварки пространственных соединений сложной формы (подача сварочной проволоки в зону сварки с точностью 0,1...0,4 мм; ограниченная масса оснащения; подача защитного газа

в зону сварки; жесткость и прочность конструкции для исключения эффекта раскачивания) [2].

### Условия модернизации оборудования

С учетом вышеуказанных требований, предпочтений и ограничений для реализации поставленной цели принято решение модернизировать существующий в условиях ООО «Технология» (г. Оренбург) роботизированный комплекс лазерной наплавки для реализации технологии сварки тонкостенных пространственных элементов из жаропрочных сплавов. Спроектировано необходимое оснащение для монтажа на манипуляторе автомата подачи сварочной проволоки и оптической головки промышленного непрерывного оптоволоконного лазера ИРЭ-Полус мощностью 2 кВт [3, 4]. Разработка оснащения выполнена в CAD/CAM-системе «КОМПАС-3D» (рис. 1).

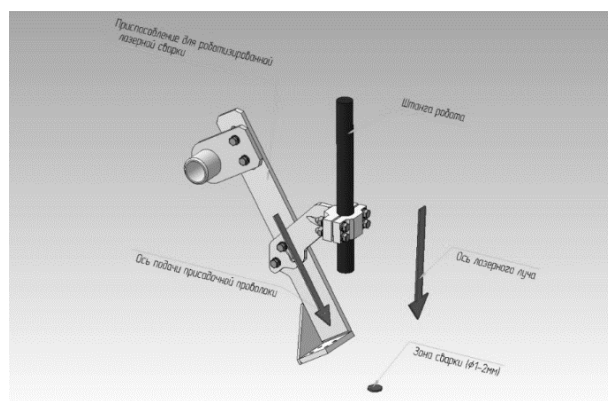


Рис. 1. Компоновка приспособления

Fig. 1. Arrangement of accessory

Всё необходимое оснащение для выполнения операций лазерной сварки на роботизированном комплексе было изготовлено с учетом снижения массы конструкции из материалов АМг6 и Л60. В связи с тем, что выбранный для отработки технологии лазерной сварки сплав ХН50ВМКТИОР является сложным высоколегированным материалом [5], появилась необходимость в защите корня сварного соединения аргоном при его охлаждении, для чего была изготовлена шина с охлаждением и возможностью поддува защитного газа. Основные комплектующие на стадии исполнения и компоновки представлены на рис. 2.

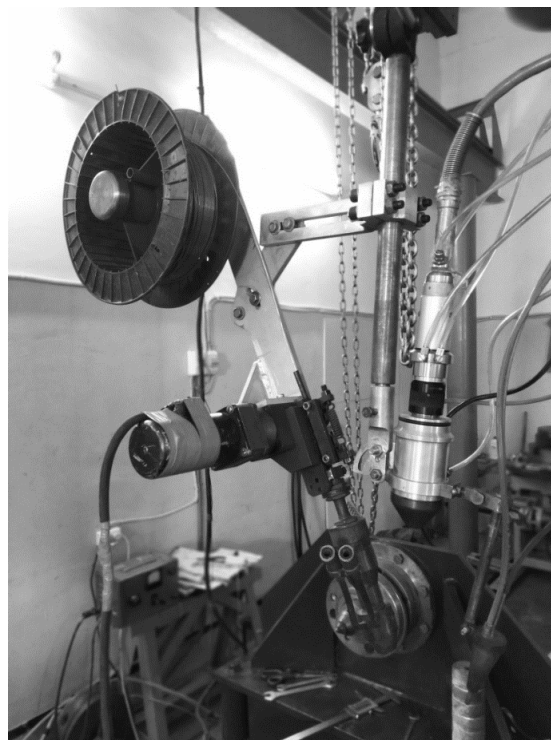
Процесс сборки осуществлялся с учетом необходимости регулировки фокусного расстояния оптической лазерной головки, угла закрутки и вылета подающего устройства [6]. Для отработки режимов лазерной сварки варьировались основные технологические параметры: мощность

излучения лазера в пределах 0,7...1,8 кВт; скорость подачи проволоки – 1,2...1,8 м/мин [7]; скорость перемещения заготовки – 2,5...4 м/мин; подача защитного газа – 5...10 л/мин. Режимы лазерной сварки обрабатывались как с использованием присадочного материала, так и без него. Оптимизированные параметры режима лазерной роботизированной сварки для сплава ХН50ВМКТЮР представлены в табл. 1.

При реализации режима сварки, представленного в табл. 1, удалось добиться синхронизации работы всех комплектующих лазерного комплекса, что обеспечило как равномерное сплавление присадочной проволоки и основного материала заготовки, так и формирование неразъемных соединений без присадочного материала.

Анализ лазерной сварки показал, что, варьируя основными параметрами технологического процесса (скорость сварки, мощность лазерного излучения), можно добиться изменения свойств сварного соединения в нужном направлении. Так, увеличение мощности лазерного луча сопровождалось уменьшением площади сварочной ванны, что, с одной стороны, привело к уменьшению геометрических параметров сварного соединения (уменьшение ширины металла шва и зоны термического влияния), с другой – обеспечило прирост твердости и прочности металла шва и зоны термического влияния, при снижении уровня ударной вязкости.

Изменение скорости лазерной сварки в сторону уменьшения выявило обратную зависимость – длина и ширина сварочной ванны пропорционально увеличивались, и, как следствие, наблюдалось увеличение геометрии сварного шва и зоны термического влияния, формирование разветвленной дендритной структуры металла шва и крупнокристаллической структуры околосшовной зоны, что сопровождалось заметным снижением твердости при сохранении прочности и ударной вязкости на уровне основного металла.



a



b

Рис. 2. Разработанные приспособления и их компоновка на манипуляторе робота: *a* – смонтированное сварочное приспособление к роботу-манипулятору; *b* – закрепленный на шине образец 2,0 мм перед лазерной сваркой

Fig. 2. The developed devices and their arrangement on the robot manipulator: *a* – mounted welding device to the robot manipulator; *b* – 2.0 mm sample fixed on the tire before laser welding

Таблица 1. Оптимизированные параметры режима лазерной сварки для сплава ХН50ВМКТЮР

Table 1. Optimized laser welding mode for alloy ХН50ВМКТЮР

Мощность излучения, кВт	Скорость перемещения, м/мин	Скорость вращения заготовки, об/мин	Скорость подачи проволоки, м/мин	Подача защитного газа, л/мин
1,2	3,5	5	1,5	5

### Материалы и методы анализа

Для объективной оценки полученных результатов были исследованы образцы после лазерной сварки по описанной выше технологии. В качестве методов исследования применяли

оптическую и растровую электронную микроскопию, микрорентгеноспектральный анализ, ультразвуковой контроль и механические испытания. Металлографические исследования выполняли при помощи металлографического

микроскопа Nikon Eclipse LV150N, микротвердомера Dura Scan-20 Gs, электронного растрового микроскопа JEOLJCM-6000 Neoscope с волновым и энергодисперсионным анализатором.

Сравнительный анализ микроструктуры сварных соединений показал, что литая структура

сварного шва, полученного лазерной сваркой, отличается от структуры, полученной классическими способами сварки TIG и MIG/MAG, не только характерным строением дендритных кристаллов (рис. 3), но и значительно меньшей по протяженности зоной термического влияния.

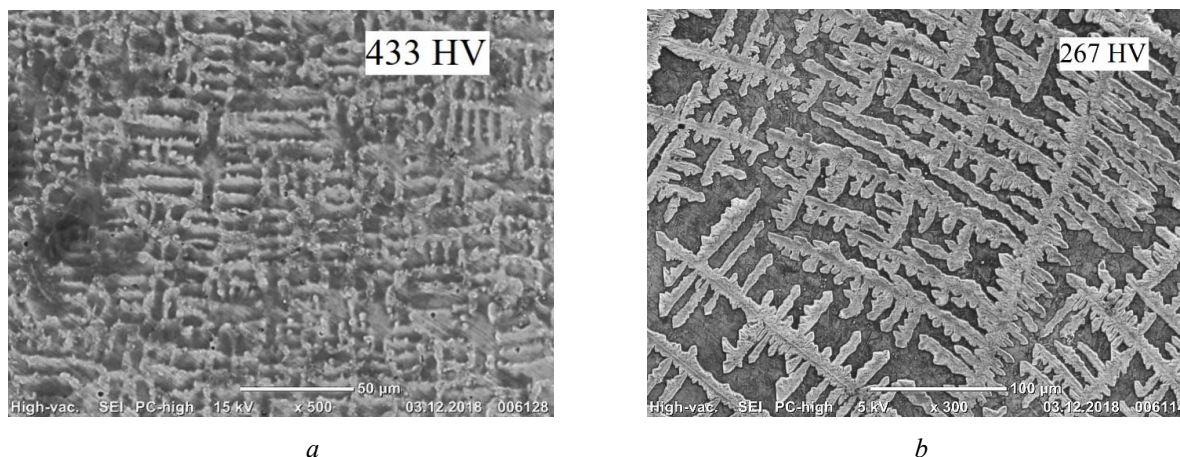


Рис. 3. Микроструктура сварного шва: *a* – лазерная роботизированная сварка; *b* – механизированная аргонодуговая сварка

Fig. 3. Weld microstructure: *a* - laser robotic welding; *b* - mechanized argon arc welding

Контроль твердости по Виккерсу показал, что при лазерной сварке формируется сварочный шов, значения твердости которого выше на 130...180 HV по сравнению с механизированной аргонодуговой сваркой, уровень значений прочности и пластичности сварного соединения при этом соответствует основному металлу, что полностью отвечает эксплуатационным требованиям, предъявляемым к изделию.

Сплав марки ХН50ВМКТИОР-ИД – сложный по химическому составу материал (табл. 2), обладающий повышенной жаропрочностью, жаростойкостью, способностью к противостоянию

агрессивным средам, рассчитан на эксплуатацию деталей турбо- и авиастроения при температуре около 950...1050 °С, имеющий в своем составе помимо 50 % никеля также хром, углерод, фосфор, серу, медь, алюминий, титан, церий, ниобий и ряд других компонентов, что предопределяет стойкость к образованию трещин в шве и частично в околосшовной зоне и обеспечивает получение композиций металла шва с высокой технологической прочностью. С этой целью в состав сплава введено дополнительное легирование молибденом, вольфрамом, ниобием, хромом, селеном и кобальтом.

Таблица 2. Химический состав сплава ХН50ВМКТИОР-ИД, % по массе

Table 2. Chemical composition of ХН50ВМКТИОР-ИД alloy, wt%

C	S	P	Mn	Cr	Si	Ni	Fe	Cu	Al	B	Ti	Mo	Nb	W	Ce	Co
≤ 0,1	≤ 0,015	≤ 0,015	≤ 0,4	20	≤ 0,5	Основа	≤ 5	≤ 0,07	3,2	≤ 0,005	1,5	3,5	≤ 1,5	7	≤ 0,02	8

Никелевый сплав марки ХН50ВМКТИОР-ИД с карбидным упрочнением принято считать хорошо свариваемым, так как он обладает незначительной склонностью к образованию горячих трещин и не образует трещин при термической обработке сварных узлов и деталей [8].

### Полученные результаты

Металлографический анализ показал, что структура металла шва сплава ХН50ВМКТИОР-ИД после лазерной сварки имеет равномерное дендритное строение, зона термического влия-

ния и прилегающая к ней область основного металла сохраняют аустенитную структуру различной степени дисперсности (рис. 4).

Так как при лазерной роботизированной сварке скорость распада аустенита находится в интервале 450...550 °С/сек, этот факт способствует минимизации выделения в металле шва нежелательной  $\gamma'$ -фазы при охлаждении. Установлено, что по границам дендритной структуры при охлаждении в интервале 650...850 °С интенсивно выделяются карбидные и интерметаллидные

включения сложного химического состава, что вызывает местные напряжения по границам зерен вследствие разницы объемов с  $\gamma$ -фазой и формирует эффект упрочнения металла шва [9].

Механические испытания (табл. 3) показали, что уровень свойств сварных соединений, полученных лазерной сваркой, близок к характеристикам металла основы.

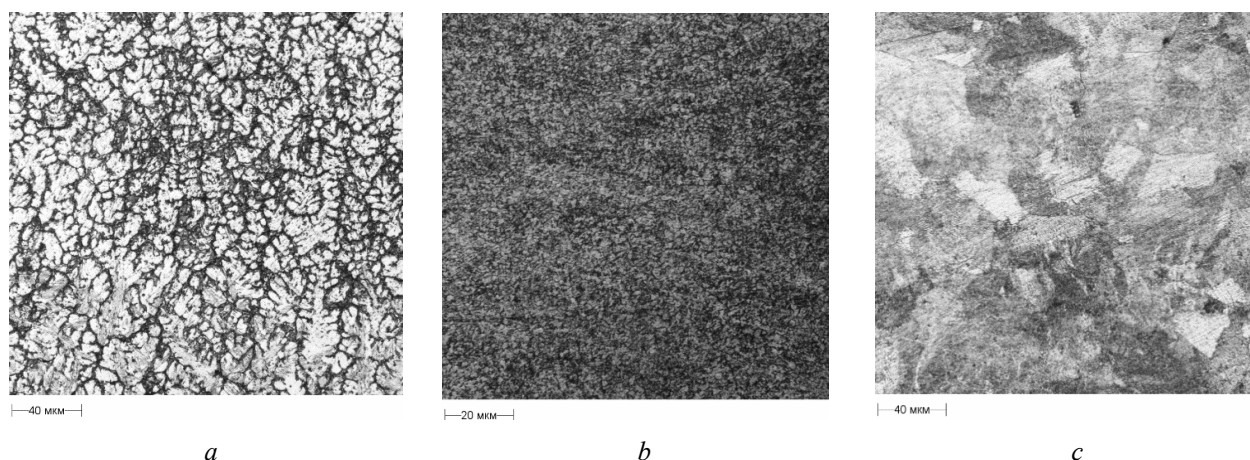


Рис. 4. Металлография сварного соединения сплава ХН50ВМКТЮР-ИД: а – сварной шов; б – зона термического влияния; с – металлическая основа сплава

Fig. 4. Metallography of weld joint of alloy XH50BMKTЮP-ID: a - weld; b - zone of thermal influence; c - metal base of alloy

Таблица 3. Сравнительные данные механических свойств сварных соединений и основного металла

Table 3. Comparative data of mechanical properties of welded joints and base metal

Основной металл	Фактические значения	Требуемые значения
Предел прочности, Н/мм <sup>2</sup>	510...520	490...588
Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>		
КСУ <sup>-60</sup>	147...169	29,4
КСУ <sup>-20</sup>	144...151	39,2
Сварное соединение	Фактические значения	Требуемые значения
Предел прочности, Н/мм <sup>2</sup>	608...628	≥ 588
Ударная вязкость с надрезом по центру шва, Дж/см <sup>2</sup>		
КСУ <sup>-20</sup>	147...169	≥ 39,2
КСУ <sup>-30</sup>	144...151	
КСУ <sup>-40</sup>	144...151	
КСУ <sup>-60</sup>	144...151	

В работах ряда авторов описано положительное влияние увеличения скорости сварки на стойкость сварного соединения к образованию горячих трещин [10]. В данной работе полученные результаты согласуются с общепринятыми утверждениями и подтверждают, что реализация больших скоростей охлаждения сварного шва (на уровне 2000 °С/с) в температурном интервале хрупкости оказала благоприятное влияние на стойкость неразъемных соединений к образованию кристаллизационных трещин по причине формирования дисперсной первичной структуры, устойчивой к трещинообразованию.

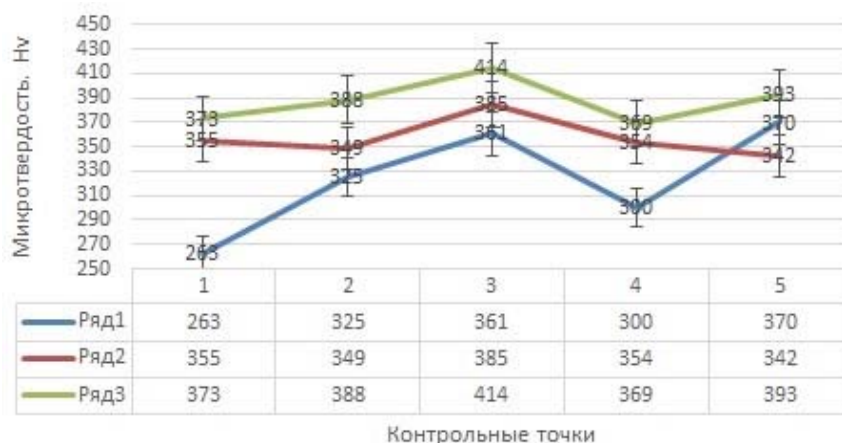
В целях подтверждения заключений по результатам металлографии был произведен контроль распределения микротвердости в сварных

соединениях, полученных лазерной сваркой на мощности 1,2 кВт с использованием присадочной проволоки и контактным способом (рис. 5).

По полученным данным видно, что сварка с присадочной проволокой обеспечивает более высокую твердость металла шва 361-414 НВ, чем в случае использования контактной сварки 254-313НВ. С точки зрения уменьшения напряжений в области сварного шва преимущество за контактным способом лазерной сварки без присадочной проволоки, так как размеры сварочной ванны в зоне лазерного воздействия, не превышающие 1 мм при мощности 1,2 кВт, позволяют минимизировать градиент температур между зоной сварки и основным металлом, что является фактором, способствующим устранению гру-

бой литой структуры, состоящей из разветвленных дендритных кристаллов (см. рис. 3, б),

обеспечивающих разность значений твердости по осям и в междендритном пространстве [12].



a



b

Рис. 5. Сравнительные значения распределения микротвердости сварного шва, зоны термического влияния и основного металла для различных способов лазерной сварки на мощности 1,2 кВт: a – лазерная сварка с использованием присадочной проволоки; b – контактная сварка

Fig. 5. Comparative values of distribution of microhardness of weld, heat-affected zones and base metal for different methods of laser welding at power 1.2 kW: a - laser welding using filler wire; b - contact welding

**Заключение**

1. Разработана технология роботизированной лазерной сварки пространственных неразъемных соединений тонкостенных изделий авиационного комплекса из жаропрочных сталей. Указаны оптимизированные параметры режима лазерной роботизированной сварки для сплава ХН50ВМКТЮР-ИД.

2. На основании установленных требований по массогабаритным и прочностным параметрам, предъявляемым к тонкостенным конструкциям авиационной промышленности, модернизирован роботизированный лазерный комплекс на базе твердотельного лазера ЛС-2, синхронизированы режимы работы сварочного оборудования.

3. Исследована микроструктура и механические свойства образцов сварных соединений, полученных на различных режимах и параметрах лазерной сварки. Результаты металлографии, контроль распределения микротвердости и технологической прочности показали, что лазерная сварка жаропрочных сплавов на никелевой основе со скоростью охлаждения в пределах 2000 °С/сек, оказывает положительное влияние на устойчивость сварных соединений к образованию кристаллизационных трещин по причине образования дисперсной ячеисто-дендритной структуры сварного соединения.

4. С точки зрения равномерного распределения упрочнения и минимизации напряжений

в зоне сварного соединения оптимальным является контактный способ лазерной сварки без присадочной проволоки, так как он обеспечивает формирование показателей твердости, прочности и ударной вязкости сварного соединения и околошовной зоны на уровне металлической основы сплава.

#### Библиографические ссылки

1. *Terry Vander Vert*. Перспективы лазерной сварки в российской промышленности – обеспечение наиболее эффективного производственного процесса // Комплект: ИТО. Инструмент. Технология. Оборудование. 2013. № 3. С. 50–53.
2. Исследование кристаллографической текстуры в жаропрочном никелевом сплаве после селективного лазерного сплавления и термической обработки / И. А. Тренингов, Е. В. Филонова, П. Н. Медведев, Е. А. Лукина // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2019. № 2 (764). С. 65–68.
3. *Krylova S.E., Golyapin M.I., Oplesnin S.P.* Influence of gas-powder laser cladding's technological parameters on structural characteristics of corrosion-resistant steels' restored surface layer. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, 2018, pp. 042-058.
4. *Krylova S.E., Manakov N.A., Oplesnin S.P., Yaskov A.S., Strizhov A.O.* Effect of the parameters of gas-powder laser surfacing on the structural characteristics of reconditioned surface layer of corrosion-resistant steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 2018, vol. 59, no. 9-10, pp. 641-645.
5. *Крылова С. Е., Завьялов В. А., Оплеснин С. П.* Обеспечение эксплуатационных характеристик оборудования нефтегазодобывающей отрасли на основе совершенствования технологии газопорошковой лазерной наплавки. // *Вестник современных технологий*. 2019. № 1 (13). С. 19–25.
6. *Лукина Е. А., Зайцев Д. В., Заводов А. В.* Состав и строение фазовых образований в жаропрочном никелевом сплаве в зависимости от параметров синтеза при селективном лазерном сплавлении и режимов термообработки // *Вопросы материаловедения*. 2019. № 3 (99). С. 14–22.
7. *Dong W., Kokawa H., Tsukamoto S., Sato Y.S., Ogawa M.* Mechanism Governing Nitrogen Absorption by Steel Weld Metal during Laser Welding. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2004, vol. 35, no. 2.
8. *Курочко Р. С.* Сварка и пайка жаропрочных материалов горячего тракта ГТД /ВИАМ/1982-198570 // *Авиационная промышленность*. 1982. № 8.
9. *Segen Estefen, Tetyana Gurova, Daniel Werneck, Anatoli Leontiev.* Welding stress relaxation effect in butt-jointed steel plates. *Marine Structures*, 2012, 29, 211-225.
10. *Gannon L, Liu Y, Pegg N, Snith M.* Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates. *Mar Struct*, 2010, 23, 385-404.

11. *Deng D, Murakawa H.* Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint. *Comput Mater*, 2008, 43, 353-365.

12. Математическое описание и анализ сварочных высококонцентрированных тепловых источников / В. Я. Беленький, Д. Н. Трушников, Е. С. Саломатова, В. М. Язовских // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2012. № 3 (55). С. 46–50.

#### References

1. Terry Vander Vert. [Prospects of laser welding in the Russian industry - ensuring the most efficient production process]. *Komplekt: ITO. Instrument. Tekhnologiya. Oborudovanie*, 2013, no. 3, pp. 50-53 (in Russ.).
2. Training I.A., Filonov E.V., Medvedev P.N., Lukina E.A. [Study of crystallographic texture in heat-resistant nickel alloy after selective laser fusion and thermal treatment]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2019, no. 2, pp. 65-68 (in Russ.).
3. *Krylova S.E., Golyapin M.I., Oplesnin S.P.* Influence of gas-powder laser cladding's technological parameters on structural characteristics of corrosion-resistant steels' restored surface layer. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, 2018, pp. 042-058.
4. *Krylova S.E., Manakov N.A., Oplesnin S.P., Yaskov A.S., Strizhov A.O.* Effect of the parameters of gas-powder laser surfacing on the structural characteristics of reconditioned surface layer of corrosion-resistant steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 2018, vol. 59, no. 9-10, pp. 641-645.
5. *Krylova S.E., Zavyalov V.A., Oplesnin S.P.* [Providing operational characteristics of the oil and gas industry equipment on the basis of improvement of the technology of gas-powder laser build-up]. *Vestnik sovremennykh tekhnologii*, 2019, no. 1, pp. 19-25 (in Russ.).
6. *Lukina E.A., Zaitsev D.V., Zavadov A.V.* [The composition and structure of phase formation in a heat-resistant nickel alloy depending on the synthesis parameters during selective laser fusion and heat treatment modes]. *Voprosy materialovedeniya*, 2019, no. 3, pp. 14-22 (in Russ.).
7. *Dong W., Kokawa H., Tsukamoto S., Sato Y.S., Ogawa M.* Mechanism Governing Nitrogen Absorption by Steel Weld Metal during Laser Welding. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2004, vol. 35, no. 2.
8. *Kurochko R.S.* [Welding and soldering of heat-resistant materials of the GTD / VIAM hot path / 1982-198570]. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 1982, no. 8 (in Russ.).
9. *Segen Estefen, Tetyana Gurova, Daniel Werneck, Anatoli Leontiev.* Welding stress relaxation effect in butt-jointed steel plates. *Marine Structures*, 2012, 29, 211-225.
10. *Gannon L, Liu Y, Pegg N, Snith M.* Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates. *Mar Struct*, 2010, 23, 385-404.

11. Deng D, Murakawa H. Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint. *Comput Mater*, 2008, 43, 353-365.

12. Belenki V.J., Trushnikov D.N., Salomatov E.S., Yazovsky V.M. [Mathematical description and analysis of welding highly concentrated thermal sources]. *Vestnik IzhGTU imeni Kalashnikova*, 2012, vol. 55, no. 3, pp. 46-50 (in Russ.).

### Development of Technology for Robotic Laser Welding of Thin-Walled Products from Heat-Resistant Alloys

S.E. Krylova, DSc in Engineering, Associate Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia

S. P. Oplesnin, PhD Applicant, Orenburg State University, LLC "Technology", Orenburg, Russia

A.P. Fot, DSc in Engineering, Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia

A.U. Ibragimov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.A. Zavyalov, LLC "Technology", Orenburg, Russia

*The results of testing the modes of robotic laser welding of spatial welded joints of thin-walled products from heat-resistant steels are considered. The relevance of using this method of obtaining one-piece joints for large-sized thin-walled structures of the aviation industry is substantiated. Technological difficulties and conditions for the modernization of a robotic laser complex based on a solid-state laser LS 2 for the implementation of technology for welding spatial elements from heat-resistant alloys are discussed. Based on structural and durometric studies, the advantages of contact laser welding without filler wire are confirmed. Optimized parameters of the laser robotic welding mode for the KhN50VMKTYUR alloy are indicated. The possibility of controlling the properties of the welded joint by increasing the input power of laser radiation in the range of 0.7-1.8 kW and welding speed in the range of 150-200 m/h is shown. Comparative studies of the influence of the parameters of various methods of industrial welding on the metallography of the weld and the technological strength of the welded joint are presented.*

*An analysis of the microstructure showed that the cast structure of the weld obtained by laser welding differs from the structure obtained by classical welding methods, the characteristic finely meshed dispersed structure of dendritic crystals and a much shorter thermal influence zone up to 2-2.2 mm. At the same time, the welded joint has a strength that is not inferior to the base metal, and ductility meets all operational requirements for the product. It was found that carbide and intermetallic inclusions of complex chemical composition are intensively released along the boundaries of the cellular-dendritic structure during cooling in the range of 650 ... 850 °C, which forms the effect of hardening of the weld metal.*

*The resistance of welded joints against the formation of crystallization (hot) cracks is evaluated. It is shown that laser welding of steels with high cooling rates of the weld metal in the temperature range of brittleness has a favorable effect on the resistance of welded joints against the formation of crystallization hot cracks. This fact helps to minimize the release of undesirable  $\gamma'$ -phase in the weld metal during cooling.*

**Keywords:** laser welding, spatial welded joints, dendritic structure, heat-affected zone, temperature range of brittleness, crystallization (hot) cracks.

Получено 15.05.2020

#### Образец цитирования

Разработка технологии роботизированной лазерной сварки тонкостенных изделий из жаропрочных сплавов / С. Е. Крылова, С. П. Оплеснин, А. П. Фот, А. У. Ибрагимов, В. А. Завьялов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 2. С. 46–53. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-46-53.

#### For Citation

Krylova S.E., Oplesnin S.P., Fot A.P., Ibragimov A.U., Zavyalov V.A. [Development of Technology for Robotic Laser Welding of Thin-Walled Products from Heat-Resistant Alloys]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 46-53 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-46-53.