

На правах рукописи



Баранов Дмитрий Александрович

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО ДИСПЕРСИОННО-
ТВЕРДЕЮЩЕГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ХН68ВМТЮК ПРИ ЛАЗЕРНОЙ
СВАРКЕ ДЕТАЛЕЙ ГТД**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2021

Работа выполнена на кафедре «Литейные и высокоэффективные технологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Никитин Константин Владимирович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Беленький Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство, метрология и технологии материалов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Пересторонин Александр Владимирович, кандидат технических наук, инженер НОЦ ЦАТ, ассистент кафедры МТ12 «Лазерные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Ведущая организация:

Федеральное государственной бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Защита диссертации состоится «17» декабря 2021 г. в 13:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 (Д999.122.02) при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», с авторефератом – на сайте: http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/baranov_dis.pdf

Отзывы на реферат просим выслать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, учёному секретарю диссертационного совета 99.2.039.02 (Д999.122.02).

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н, доцент

А.Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Газотурбинные двигатели (ГТД) на сегодняшний день являются одним из самых технически сложных изделий современного машиностроения. Ключевыми показателями эффективности работы ГТД являются коэффициент полезного действия (КПД), экономичность и надежность. КПД возможно повысить за счет увеличения рабочей температуры турбины двигателя. С повышением температуры рабочих газов, уменьшается удельный расход топлива и воздуха на единицу мощности. В связи с этим, одной из наиболее актуальных проблем научно-технического прогресса двигателестроения, является стремление материаловедов повысить жаропрочность и снизить ползучесть жаропрочных сплавов. В производстве узлов двигателя, все больше находят применение жаропрочные сплавы и стали на основе никеля. Более 50% конструкции современных газотурбинных двигателей состоит из жаропрочных сплавов. Из них около 50% являются сварными деталями.

В современном производстве одним из эффективных методов снижения себестоимости является создание неразъемных соединений путем сплавления заготовок при изготовлении деталей сборочных единиц (ДСЕ).

К жаропрочным сплавам предъявляют особые требования по созданию качественных сварных соединений, что является сложной задачей, поскольку с повышением жаропрочности сплавов снижаются такие показатели свариваемости, как сопротивляемость образованию трещин при сварке и последующей термообработке. Согласно определению (ГОСТ 29273-92) свариваемость должна обеспечивать металлическую целостность изделия при соответствующем технологическом процессе так, чтобы свариваемые детали отвечали техническим требованиям, как в отношении их собственных качеств, так и в отношении их влияния на конструкцию, которую они образуют. Учитывая сложность ГТД, к сварным соединениям предъявляется комплекс повышенных требований по обеспечению параметров структуры и гарантированного запаса физико-механических свойств деталей изделия.

Известно, что жаропрочные никелевые сплавы характеризуются наличием нескольких температурных интервалов хрупкости, что обуславливает повышенную вероятность образования горячих трещин при сварке, возникающих в результате высоких напряжений, которые образуются в околошовной зоне (ОШЗ).

В настоящий момент времени решением данной проблемы является применение сложнотермически обработанных присадочных материалов или сварка с подогревом при аргонодуговой сварке (АрДС), а при электроннолучевой (ЭЛС) - увеличением погонной энергии. Сравнительные исследования сварных соединений жаропрочных сплавов показали, что при ЭЛС склонность к образованию трещин ниже, чем при АрДС погруженной дугой за один проход. Данный факт объясняется большей концентрацией энергии и меньшим тепловложением при ЭЛС с «кинжальным» проплавлением по сравнению с АрДС. Применение ЭЛС с «кинжальным» проплавлением при изготовлении ДСЕ из тонколистового проката не целесообразно, по причине сложности соблюдения отношения глубины проплавления к ширине шва.

Другим инновационным современным способом повышения сопротивляемости к трещинообразованию является лазерная сварка (ЛС) за счет высокой концентрации энергии и меньшего тепловложения. Особенностью ЛС является вариативность

режимов в широком диапазоне, что обеспечивает не только возможность сварки различных материалов толщиной от десятых долей до десятков миллиметров, но и осуществление принципиально различных механизмов проплавления. В отечественной промышленности ЛС получила широкое, но еще не вполне достаточное для современного уровня машиностроения распространение. Причинами этого являются, как высокая стоимость необходимого оборудования, так и недостаточный опыт применения данной технологии.

Кроме того, в настоящее время широкое применение лазерной сварки в промышленности ограничено в связи с отсутствием сертификации этих технологий и нормативно-технологической документации, определяющей их использование в различных отраслях производства ответственных изделий.

В связи с этим, актуальными становятся задачи по разработке технологии ЛС жаропрочных сплавов из тонколистового проката, применяемых при производстве ДСЕ типа обечаек опоры и статора турбины ГТД, обеспечивающей повышенные требования к параметрам структуры и гарантированному запасу физико-механических свойств деталей изделий.

Работа выполнена в рамках: реализации Федерального целевого проекта «Технического перевооружения механосборочного производства ОАО «Кузнецов» г. Самара, ОАО «Объединенная промышленная корпорация «Оборонпром» г. Москва»; программы №2014-УГС-09 «Отработка технологических процессов сварки на лазерном комплексе TruLaserCell», согласованной с 682 ВП Минобороны России и АО «Газпром»; программы №2015-УГС-03 «Замена аргонодуговой сварки на лазерную сварку при изготовлении ДСЕ изд. НК-14СТ, НК-14СТ-10, НК-36СТ», согласованной с АО «Газпром».

Основная часть исследований и экспериментов выполнена на базе кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии» ФГБОУ ВО СамГТУ и ПАО «КУЗНЕЦОВ».

Основная цель работы: является исследование структуры и свойств сварного шва и околошовной зоны (ОШЗ) для повышения показателей свариваемости в сварных соединениях из жаропрочных дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов за счет применения лазерной сварки с обеспечением необходимых эксплуатационных характеристик.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **основные задачи**:

1. Исследовать процессы дефектообразования в сварных соединениях из жаропрочных сплавов ХН45ВМТЮБР, ХН68ВМТЮК при воздействии лазерного излучения;
2. Исследовать структуру и свойства сварного соединения из жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК, выполненного лазерной сваркой, при воздействии термической обработки;
3. Определить предел выносливости σ_{-1} (при долговечности 10^6 циклов) стыковых сварных соединений из тонколистового проката жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава ХН68ВМТЮК, выполненных лазерной сваркой;

4. Разработать маршрутную технологию лазерной сварки жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК корпуса внутреннего 1-ого соплового аппарата статора турбины ГТД применимой для наземной (НК-12СТ, НК-14СТ, НК-14СТ-10, НК-36СТ) и авиационной (НК-25 сер.01, НК-25 сер.02, НК-32 сер.01, НК-32 сер.02) тематики.

Соответствие паспорту заявленной специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) по пунктам: 1. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий; 2. Установление закономерностей физико-химических и физико-механических процессов, происходящих на границах раздела в гетерогенных структурах; 3. Разработка научных основ выбора материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации изделий и конструкций.

Методы исследования и достоверность научных результатов. Методология исследования построена на основе классических методов материаловедения и машиностроения. Для реализации поставленной цели применяли современные методы электронно-микроскопического и элементного анализов, стандартные методики измерения микротвердости, капиллярных методов контроля (ЛЮМ-1ОВ), рентгеновской просвечивающей дефектоскопии и проведения стендовых испытаний на циклическую усталость сварных соединений. Достоверность результатов работы подтверждается использованием известных положений фундаментальных наук, хорошей согласованностью полученных результатов с результатами экспериментальных данных, а также результатами исследований других авторов.

Научная новизна: связана с исследованием особенностей формирования структуры и свойств сварных соединений из тонколистового проката жаропрочных дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов при воздействии лазерного излучения

1. Установлена взаимосвязь между количеством и размером микродефектов в структуре ОШЗ и погонной энергией при лазерной сварке для сварных соединений из сплава ХН45ВМТЮБР, которая выражается прямопропорциональной зависимостью: снижение погонной энергии лазерного излучения с 0,24 до 0,12 кДж/мм приводит к снижению в 2 раза количества и размера микротрещин.

2. Экспериментально установлено, что повышение кратковременной прочности σ_{ϵ} при повышенных температурах обеспечивается лазерной сваркой при формировании шва из сплава ХН68ВМТЮК. Полученные данные σ_{ϵ} при лазерной сварке на 13% выше прочности сварных соединений, выполненных традиционной аргонодуговой сваркой.

3. Впервые определен интервал предела выносливости σ_{-1} (при долговечности 10^6 циклов) от 215 до 243 МПа при лазерной сварке для стыковых сварных соединений из сплава ХН68ВМТЮК, гарантирующий обеспечение необходимых норм прочности для конструкций, работающих с максимальными напряжениями на сварные швы до 120 МПа.

4. Установлено, что обеспечение благоприятной структуры сварного шва и ОШЗ достигается за счет повышения легированности указанных зон Мо, увеличением доли интремаллидной γ' -фазы в сочетании с оптимальными режимами термической

обработки (закалка + старение). Это обуславливает гарантированное повышение кратковременной прочности при повышенных температурах до 10%.

Практическая значимость работы:

1. Уменьшение образования микротрещин в шве и ОШЗ для сварных соединений из сплава ХН45ВМТЮБР обеспечивается лазерной сваркой при пониженных значениях погонной энергией (0,12 кДж/мм).

2. Определены оптимальные режимы лазерной сварки ($P_{ли}=4$ кВт, $v_{св}=33,3$ мм/с, $v_{п.}=33,3$ мм/с) сплава ХН68ВМТЮК обеспечивающие увеличение кратковременной прочности при повышенных температурах до 787 МПа.

3. Оптимальные режимы лазерной обеспечивают наибольший предел выносливости σ^{-1} (при долговечности 2×10^6 циклов) для сварных соединений из тонколистового (1,8 мм) проката сплава ХН68ВМТЮК.

4. Предложенные оптимальные режимы лазерной сварки в сочетании с классической термической обработкой для сплава ХН68ВМТЮК обеспечивают необходимый запас норм прочности для обечаек опоры и статора турбины ГТД, работающих с максимальными напряжениями на сварные швы до 120 МПа.

5. Разработан и внедрен маршрутный технологический процесс лазерной сварки ДСЕ «Корпус внутренний» 1-ого соплового аппарата из жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК для газотурбинного двигателя наземной тематики.

Реализация результатов работы

Результаты работы апробированы в производственном процессе ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара) и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара) при подготовке бакалавров по направлению 15.03.01 — «Машиностроение», по профилю «Машины и технология высокоэффективных процессов обработки материалов».

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования влияния режимов лазерной сварки (воздействия) на структуру сварного соединения сплава ХН68ВМТЮК.

2. Результаты исследований влияния структуры сварного соединения на предел кратковременной прочности и выносливости сварного соединения сплава ХН68ВМТЮК.

3. Технологические рекомендации лазерной сварки при изготовлении ДСЕ «Корпус внутренний» 1-ого соплового аппарата из сплава ХН68ВМТЮК.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических мероприятиях: VIII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы машиностроения» (г. Самара, 2016г.); Международной конференции «Материалы и технологии новых поколений современного материаловедения», (г. Томск, 2016г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», (г. Самара, 2016г.); III Всероссийской научно-практической конференции «Проектирование и перспективные технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение», (г. Чебоксары, 2017г.); Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», (г. Москва, 2018г.); VIII Всероссийской научно-

технической конференции с международным участием «Наследственность в литейно-металлургических процессах», (г. Самара, 2108г.); Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», (г. Москва, 2021г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе: 3 (три) работы, опубликованная в изданиях, входящих в базу международного цитирования Scopus; 5 работ, опубликованных в изданиях, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК РФ; 4 работ, опубликованные в прочих изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, общих выводов и приложений. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков, 16 таблиц, а также список литературы из 89 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение обоснована актуальность получения сварных соединений из жаропрочных сплавов, обозначена новизна исследования, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы, посвященной проблемам создания сварных соединений путем плавления дисперсионно-твердеющих железохромоникелевых и никелевых сплавов, выполнен анализ современного состояния технологий сварки дисперсионно-твердеющих железохромоникелевых и никелевых сплавов, а также анализ управления качеством сварных соединений данных сплавов.

На основании данного обзора, ключевой проблемой получения сварных соединений из жаропрочных сплавов является плохая свариваемость, а именно трещинообразование в процессе сварки и последующей термической обработки. Одним из способов уменьшения напряжения, возникающего в процессе сварки, которое ведет к образованию трещин, является применение источников с высокой концентрацией энергии. Электронный луч, используемый в настоящее время для сварки, также обеспечивает достаточно высокую концентрацию энергии. Однако, электронно-лучевая сварка осуществляется в вакуумных камерах, что необходимо для устойчивого проведения процесса. Лазерная сварка принципиально отличается от электронно-лучевой тем, что не требует вакуумных камер.

Также в работе проанализирован опыт научных и практических изысканий отечественных авторов: А.Г. Григорьянца, Н.П. Алешкина, А.Г. Грезева, Г.А. Туричина, В.Г. Смелова, зарубежных авторов: U. Dyuley, S. Katayama и др. В данных работах изучение плазменных процессов, сопровождающих лазерную сварку и формирование сварочного соединения, проводилось для условий неполного проплавления металла.

Однако, в данных работах не были установлены и не выявлены условия применения процесса лазерной сварки в промышленности. Уделено ограниченное внимание на формирование структур со сквозным проплавлением металла при лазерной сварке и не определён весь спектр его особенностей. Также не установлены в

полной мере характерные для структуры связи с технологической прочностью, механическими свойствами сварных соединений при лазерной сварке.

Во второй главе дано описание объектов исследований, их физико-механических свойств, методики проведения исследований. Описана установка, на которой проводилась сварка образцов и технологические параметры лазерной сварки.

Образцы для исследования размером 100x200 мм были изготовлены из листового проката жаропрочного дисперсионно-твердеющего железоникелевого ХН45ВМТЮБР и никелевого ХН68ВМТЮК сплава толщиной 6,0 и 1,8 мм соответственно, прошедшего в состоянии поставки термическую обработку в виде закалки. Химический состав сплавов и присадочной проволоки представлен в таблице 1.

Сварка производилась на лазерном комплексе *TruLaserCELL 7020* в защитном газе: *He*, с непрерывной подачей присадочной проволоки Св. 08Х15Н60М15 диаметром 0,8 мм в ванну расплава и без нее (см. таблицу 1) по следующим режимам: мощность лазерного излучения изменялась от 2,5 до 4 кВт, скорость сварки - от 16,6 до 41,7 мм/с, скорость подачи присадочной проволоки - от 8,3 до 33,3 мм. Диаметр луча в фокусе составлял 0,7 мм при фокусном расстоянии 280 мм.

Часть образцов проходили термическую обработку в элеваторной печи НКС-1200 в виде закалки с последующим старением, по режимам (закалка при $T = 1000 \pm 50$ °С, $t = 4$ ч с последующим старением при $T = 700 \pm 50$ °С, $t = 16$ ч), рекомендованным в производственной инструкции АО «НИАТ» ПИ 1.4.75-2000.

Приводятся ссылки на нормативную документацию по методам определения механических свойств и описание используемых в процессе исследования образцов для определения кратковременной прочности и угла загиба сварных соединений. Кроме того, в данной главе дана информация о разработанных образцах для определения предела выносливости.

Таблица 1 – Химический состав сплавов и присадочной проволоки, %

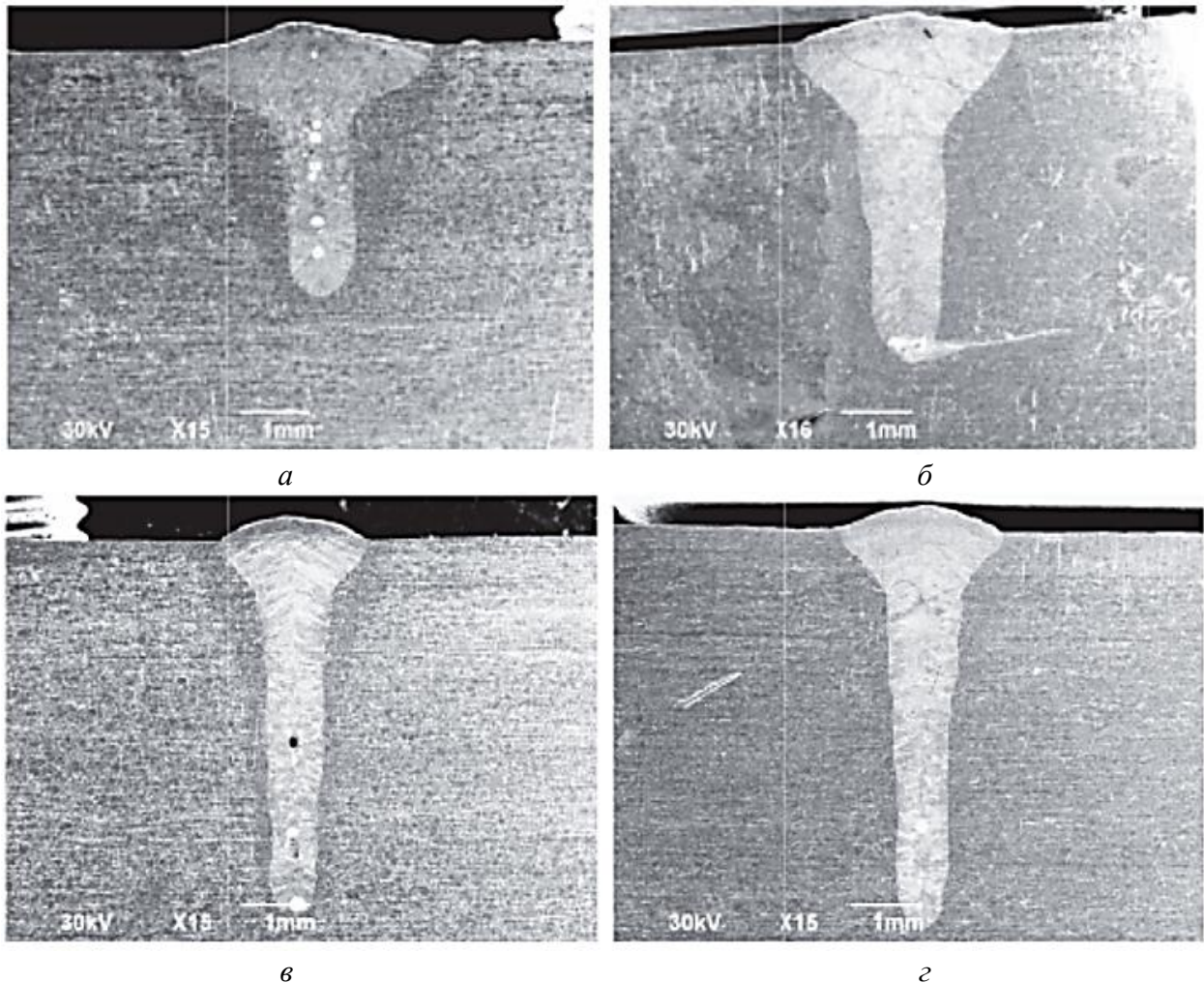
Марка материала	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	W	Mo	Nb	Co	Al	Ti	Fe	Zr	B	Ce
ХН68ВМТЮК	0,10	0,50	0,40	0,15	0,015	17,0 - 20,0	Основа	5,0 - 7,0	3,0 - 5,0	-	5,0 - 8,0	1,6 - 2,3	1,1 - 1,6	Не более			
ХН45ВМТЮБР		0,30	0,60	0,010		14,0 - 16,0		2,5 - 3,5	4,0 - 5,2	0,8 - 1,5	-	0,9 - 1,4	1,9 - 2,4	Остальное	0,02	0,008	0,10
Св. 08Х15Н60М15		0,50	1,0 - 2,0	0,015		14,0 - 16,0		-	14,0 - 16,0	-	-	-	-	4,0	-	-	-

Дана информация о методах исследования структуры, свойств и особенностях пробоподготовки. Для металлографических исследований материалов использовали электронный микроскоп Tescan VEGA3. Определение прочности производилось на разрывных машинах АМСЛЕР-Р5.

В третьей главе приводятся исследования по влиянию энергетических и технологических параметров лазерной сварки на формирование сварного шва.

Особенностью лазерной сварки является определенное сочетание энергетических параметров - плотности мощности (q) и длительности воздействия (τ). Каждый из этих параметров оказывает сильное воздействие на процесс формирования сварочной ванны при кристаллизации металла.

На рисунке 1 представлены формы сварного шва в начале и в конце дорожки шва при различных мощностях и скоростях движения лазерного пучка.



а - начало шва, *б* - конец шва при $P = 3$ кВт, $q = 0,8 \cdot 10^5$ Вт/см², $V_{св} = 25$ мм/с;
в - начало шва; *г* - конец шва при $P = 4$ кВт, $q = 1 \cdot 10^5$ Вт/см², $V_{св} = 41,6$ мм/с

Рисунок 1 – Форма сварного шва при мощности

В сварном шве, сформированном при мощности лазерного излучения 3 кВт (см. рис.1, *а*), строго по оси сварного шва наблюдаются поры сферической формы, в целом увеличивающиеся по размеру с приближением к корню шва. Данные дефекты, расположенные по оси сварного шва, уменьшают его прочность, особенно при динамических нагрузках. В околошовной зоне ниже «грибовидной» зоны наблюдается образование микротрещин, прорастающие от края сварного шва, что может быть связано с высоким уровнем напряжений, возникающих под действием значительных градиентов температур.

С увеличением плотности мощности и уменьшением длительности воздействия лазерного излучения, наблюдается уменьшение пористости и микрорастрескивание

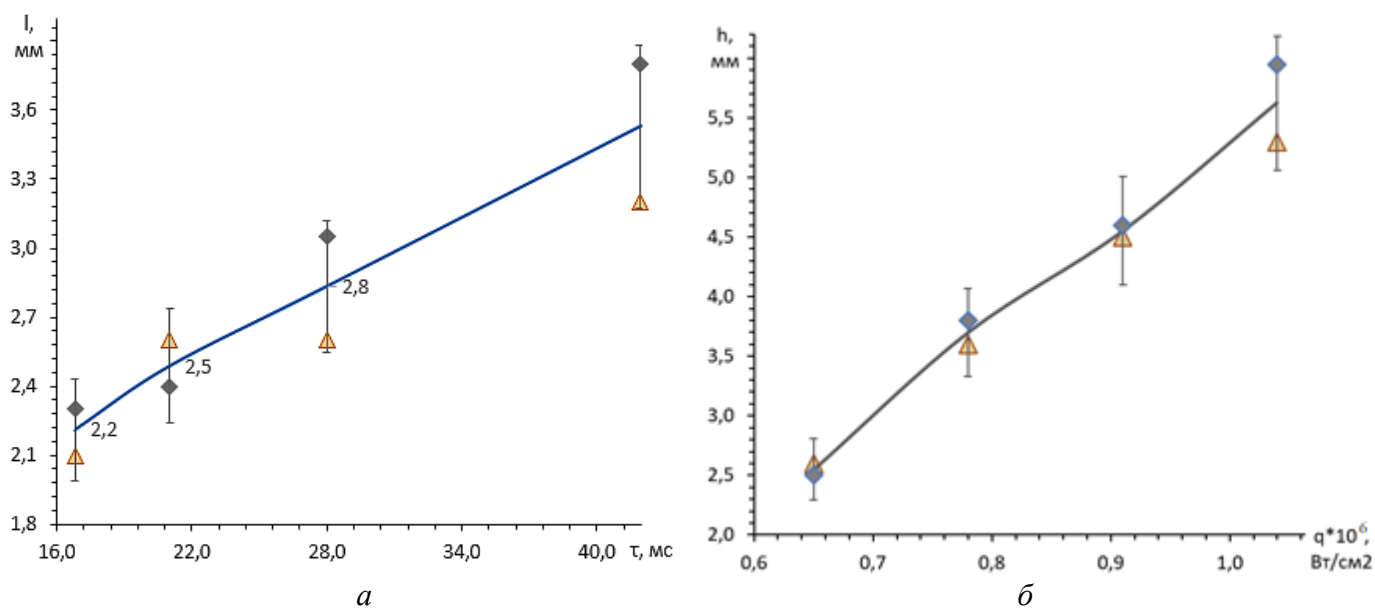
под «грибовидной» зоной сварного шва (см. рис. 1, *в* и *г*). Это обусловлено формированием более правильной формы «кинжального» проплавления, а, следовательно, уменьшения «грибовидности» сварного шва и уменьшения соотношения ширины парового канала $г$ глубине сварного шва, что снижает, тем самым, растягивающие напряжения на границе твердых областей. Уменьшение возникающих напряжений позволяет сократить количество последующих термических обработок для снятия внутренних напряжений в сварном соединении, тем самым, уменьшая количество высокотемпературного воздействия на детали, а также позволяет сократить трудоемкость технологии сварки.

На основании математической нелинейной регрессии (1):

$$h = 22,79 * x^3 - 59,24 * x^2 + 58,11 * x - 16,4 \quad (1)$$

$$l = 1,15 * 10^{-4} * x^3 - 0,1 * x^2 + 0,22 * x - 1,045 \quad (2)$$

по полученным данным, применив метод наименьших квадратов построены графики зависимости влияния плотности мощности (см. рис. 2, *а*) и длительности воздействия (см. рис. 2, *б*) на геометрические параметры: ширину сварного шва (l) и глубину проплава (h) соответственно.



а – длительности воздействия на ширину сварного шва, *б* – плотность мощности на глубину, Δ и $\diamond$ – экспериментальные значения глубины и ширины в начале (Δ) и в конце ($\diamond$) сварного шва

Рисунок 2 – Влияние параметров лазерного излучения на геометрические параметры сварного шва

Согласно анализу массива экспериментальных данных, мощность лазерного излучения почти не влияет на ширину сварного и парового канала шва, а также глубину формирования «грибовидности» сварного шва. Данная тенденция обусловлена фокусированием лазерного излучения в пятно (диаметром $\sim 0,7$ мм) на поверхности материала, при котором протекают два процесса: заглубление сварочной ванны в месте воздействия лазерного излучения высокой плотности мощности в виду образования парового канала и поверхностное плавление за счет теплопроводных свойств материала. Следовательно, изменение мощности лазерного излучения в

основном оказывает влияние на глубину формирования парового канала, то есть глубину сварного шва.

Установлено влияние длительности воздействия на ширину сварного шва. Увеличение скорости сварки позволяет формировать оптимальную форму «кинжального» проплавления и существенно уменьшить околошовную зону, снизить внутренние напряжения в сварном соединении, уменьшить пластические деформации в процессе сварки. Данный фактор оказывает положительное влияние на технологию создания неразъемных соединений.

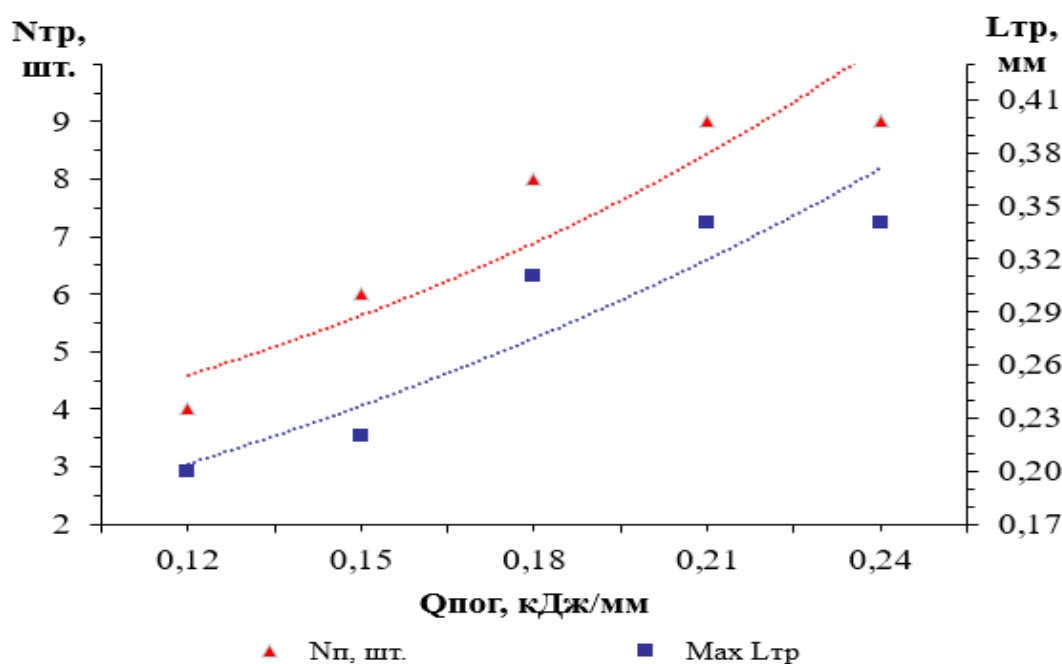


Рисунок 3 – Зависимость количества и длины микротрещин от погонной энергии

Проведен анализ влияния погонной энергии ($Q_{пог}$) на микрорастрескивание (см. рис. 3). Установлено, что повышение ее приводит к росту количества ($N_{тр}$) и длины ($L_{тр}$) микротрещин, за счет увеличения соотношения ширины парового канала к глубине сварного шва, тем самым повышая растягивающие напряжения на границе твердых областей.

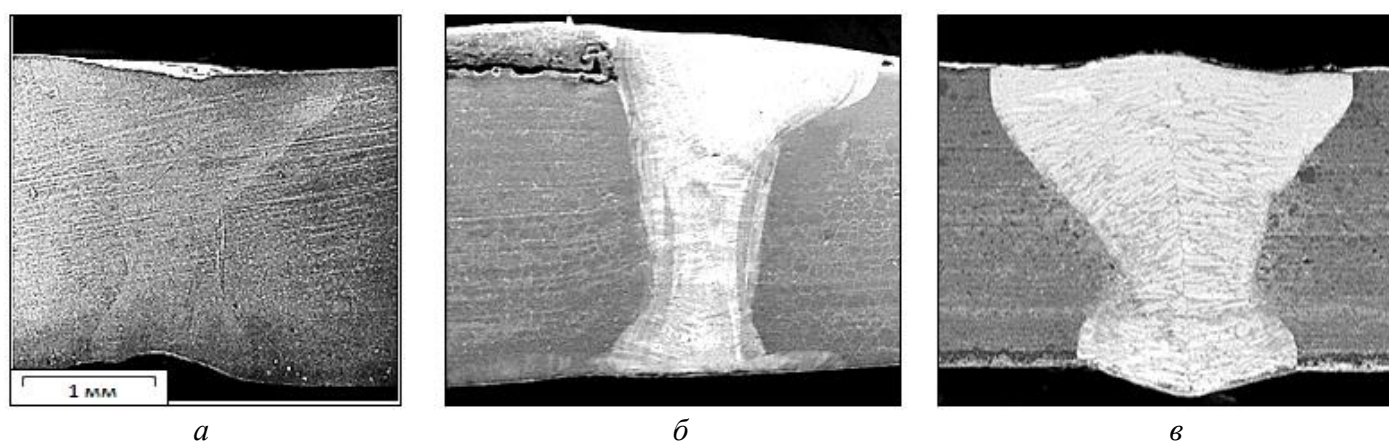
Вне зависимости от типа сварного соединения, лазерная сварка в стапеле с медной подложкой и высокой концентрацией сфокусированного лазерного излучения, формирует форму сварного шва в виде "песочных часов" (см. рис. 4).

Образование сварного шва подобной формы, обусловлено тем, что лазерное излучение, попадая на поверхность сплава, нагревает металл со скоростью, существенно превышающей скорость отвода тепла. Пары металла, находясь при высоком давлении в паровом канале, вытесняют жидкий металл к стенкам канала, что дает возможность лазерному излучению проникать вглубь материала с образованием узкого шва с большим отношением глубины к ширине. За счет «кинжального» проплавления сварочной ванны, паровой канал может достигать канавки между подложкой и свариваемыми заготовками. Таким образом, при высоких скоростях сварки причинами формирования шва характерной формы, является образование поверхностной плазмы, парового канала и плазмы, образующейся в корне шва.

Технология сварки стыкового соединения без использования присадочной проволоки (см. рис. 4, а) на поверхности образует утонение сварного шва. При малой

ширине сварного шва в корне стыкового соединения (см. рис. 4, а) масса расплава незначительна и поэтому силы поверхностного натяжения расплава превышают массовые силы и стягивают расплав, формируя вогнутость в корне шва.

Преимуществом технологии лазерной сварки с высокой концентрацией излучения и высокой скоростью в режиме "кинжального" проплавления является узкий сварной шов, характеризующийся большим соотношением глубины проплавления к ширине шва. При использовании технологии лазерной сварки на замковом соединении данный факт является недостатком, так как из-за малой площади обрабатываемого материала на поверхности шва происходит частичное расплавление замка и образование несплавления сварочного бурта с основным металлом (см. рис. 4, б). Анализ данного сварного соединения приводится ввиду его применения в серийной технологии аргонодуговой сварки обечаек корпуса внутреннего ГТД.



а – без присадочного материала ($P_{\text{ли}}=4$ кВт, $v_{\text{св}}=33,3$ мм/с),
 б – замковое соединение ($P_{\text{ли}}=4$ кВт, $v_{\text{св}}=33,3$ мм/с),
 в – с присадочной проволокой ($P_{\text{ли}}=4$ кВт, $v_{\text{св}}=33,3$ мм/с, $v_{\text{п.}}=33,3$ мм/с).
 Рисунок 4 – Макроструктура сварного шва при увеличении $X50$

Одним из технологических способов устранения подобных дефектов сварки является непрерывная подача присадочной проволоки в ванну расплава при стыковом соединении (см. рис. 4, в). При непрерывной подаче присадочной проволоки образуется усиление сварного шва, что приводит к повышению его прочностных характеристик и является одним из критериев при разработке технологии создания неразъемных соединений. Применение проволоки дает возможность регулировать в широких пределах химический состав шва, обеспечивая требуемые свойства сварных соединений, исключать такие дефекты, как неравномерность проплавления, поры в корне шва, горячие трещины, а также снизить требования к точности при сборке деталей под сварку. Это хорошо наблюдается при лазерной сварке проволокой Св.06Х15Н60М15, не содержащей Al, Ti, Co и W в своем составе. Во время сварки происходит дополнительное легирование ванны расплава данными элементами из основного материала, что приводит к уменьшению их содержания в ОШЗ и сварном шве (см. рис. 5). Следовательно, отсутствие Al и Ti в присадочном материале приводит к уменьшению концентрации интерметаллидной γ' -фазы в сварном шве. Данный фактор оказывает положительное влияние при сварке и повышает свариваемость сплава без потери прочностных характеристик (см. рис. 8).

Дополнительное легирование шва молибденом из присадочной проволоки повышает деформационную способность и стойкость к образованию трещин при

сварке жаропрочных дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов. Это обусловлено тем, что при сварке данной проволокой шов имеет более низкую жаропрочность и релаксационную стойкость, чем основной материал, что создает условия для релаксации остаточных напряжений в большем объеме более пластичного металла шва по сравнению с более жаропрочной ОШЗ.

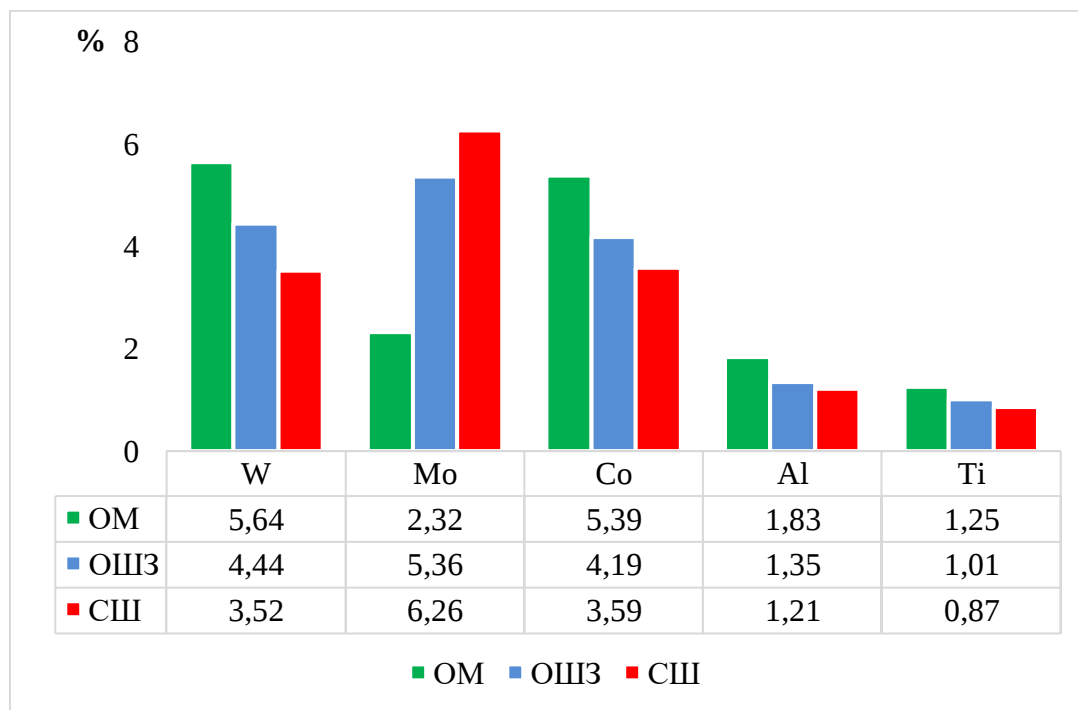


Рисунок 5 – Диаграмма распределения легирующих элементов в сварном соединении: ОМ – основной металл, ОШЗ – околошовная зона, СВ – сварной шов

На рисунке 6 представлена микроструктура сварного соединения выполненной лазерной сваркой.

В процессе кристаллизации рост дендритов происходит в направлении края сварного шва перпендикулярно теплоотводящей поверхности, а также от зоны сплавления к центру сварного шва, где образовался паровой канал (см. рис. 6). Высокая скорость сварки способствовала формированию зоны с ослабленной прочностью — стык двух фронтов роста дендритов. Интенсивный отвод тепла в основной металл сокращает размеры околошовной зоны и формирует мелкодендритную структуру литой зоны сварного шва (см. рис. 6, до ТО) за счет высоких скоростей сварки.

В четвертой главе исследовано влияние термической обработки на структуру жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК (ЭП693). При высокотемпературном нагреве жаропрочных сплавов происходит увеличение размера зерен, изменение морфологии границ зерен и частиц, упрочняющих γ' -фазу.

Термическая обработка (ТО) жаропрочных никелевых сплавов состоит из отжига на твердый раствор, закалки и старения. Наибольшая жаропрочность сплава достигается после закалки с последующим старением, в результате чего образуется мелкодисперсные выделения γ' -фазы, которые создают торможение пластической деформации в сплаве. Технология ТО, применяемая в производстве ГТД, не является

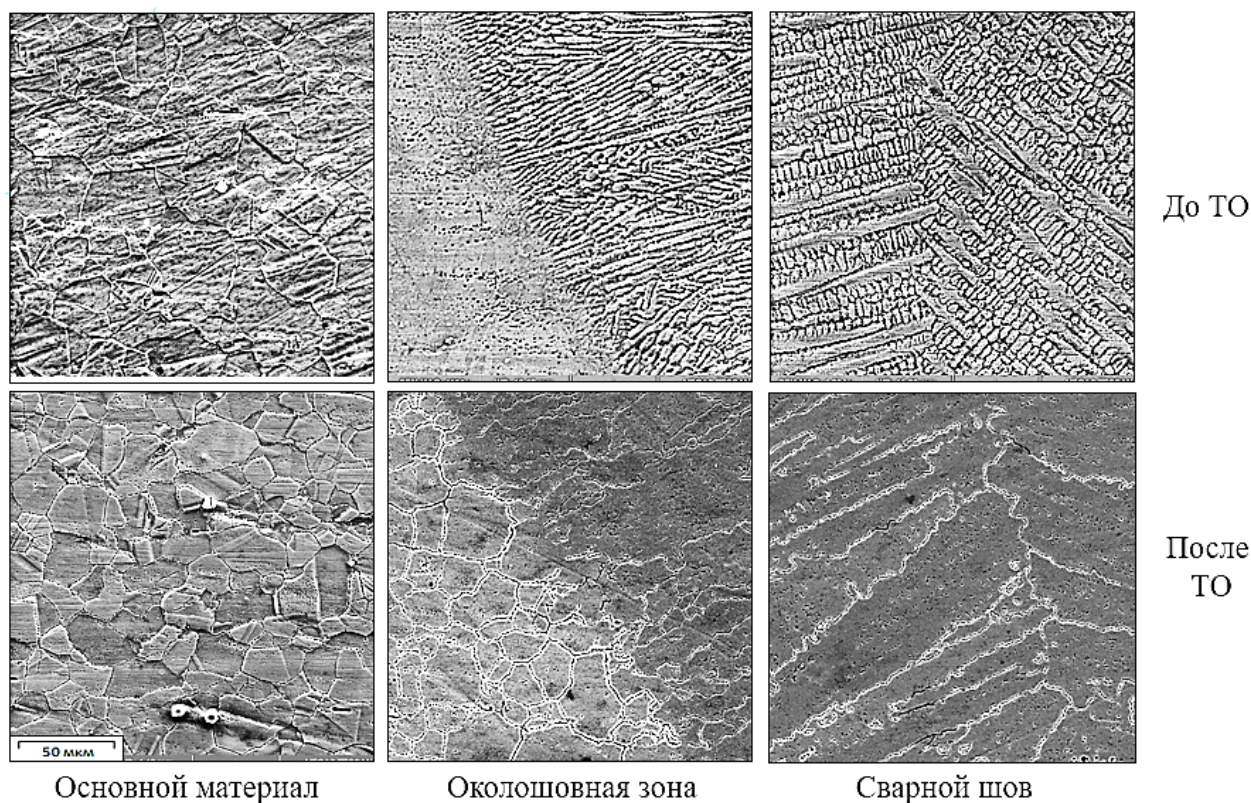


Рисунок 6 – Микроструктура сварного шва выполненной по оптимальному режиму сварки ($P_{\text{ли}}=4$ кВт, $v_{\text{св}}=33,3$ мм/с, $v_{\text{п.}}=33,3$ мм/с)

Термическая обработка стабилизирует структуру сплавов, увеличивает объемное содержание γ' -фазы, уменьшает степень её неоднородности по химическому составу и по размерам, снижает уровень ликвации, что в итоге приводит к существенному повышению характеристик долговечности и оказывает положительное влияние на технологию создания неразъемных соединений.

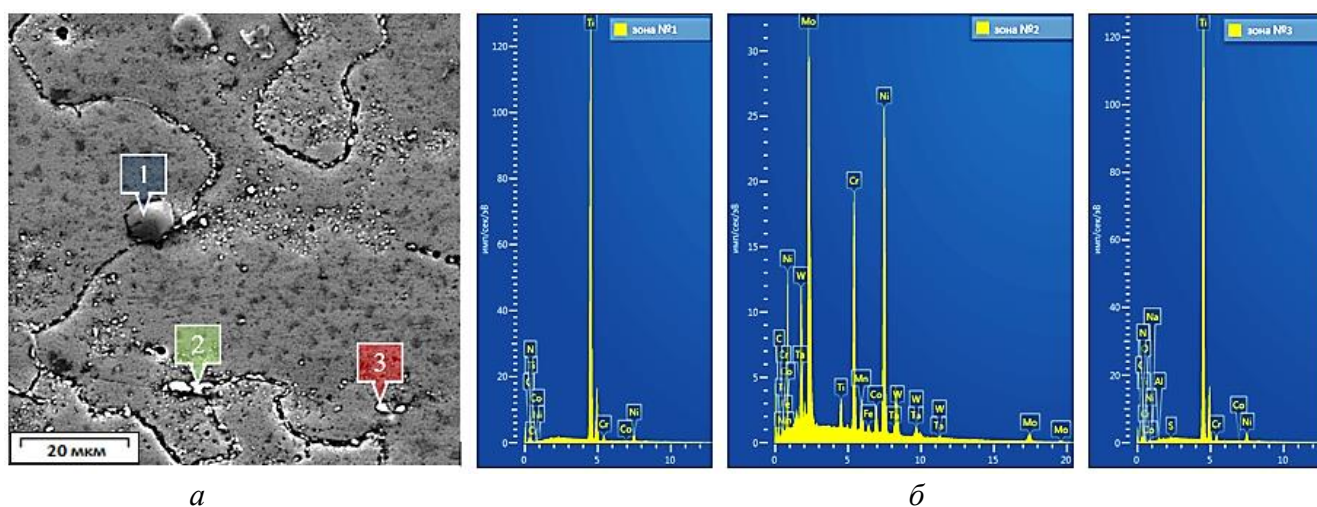


Рисунок 7 – Спектральный анализ околошовной зоны: *а* – микроструктура ОШЗ, *б* - спектры рентгеновской флуоресценции, возбужденные первичным пучком в указанных точках

Образовавшиеся после термообработки крупные зерна соответствуют γ' -фазе с выделениями карбидов по границам зерен (см. рис. 7), которые обеспечивают необходимые прочностные свойства сплавов при температурах, лежащих выше границы растворимости интерметаллидной γ' -фазы.

В структуре сварного шва (особенно после термообработки) наблюдается транскристаллитность шва (см. рис. 6, *после ТО*), в центре которого на больших скоростях сварки формируется зона, ослабляющая прочность сварного шва — стык двух фронтов кристаллизации с возможной зональной ликвацией.

Применяемая серийная технология термообработки (закалка с последующим старением) после сварки гетерогенных дисперсионно-упрочняемых сплавов привела к частичному растворению и последующему росту зерен и формированию дендритной структуры с дендритами (см. рис. 6, *после ТО*).

Морфология частиц γ' -фаз в значительной мере зависит от технологии термической обработки и ее длительности и регулирует свойства сварного соединения. Длительность тепловых выдержек приводит к увеличению размеров частиц γ' -фазы и вызывает реакции, происходящие в первую очередь по границам зерен.

В пятой главе на основании массива экспериментальных данных определена кратковременная прочность сварных соединений, выполненных по оптимальному режиму ($P_{ли}=4$ кВт, $v_{св}=33,3$ мм/с, $v_{п.}=33,3$ мм/с) лазерной сваркой из жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК. Дано сравнение полученных результатов кратковременной прочности при лазерной сварке с данными справочника ФГУП «ВИАМ» при дуговой и электроннолучевой сварке (см. рис. 8).

Применение гомогенной присадочной проволоки ЭП367 в технологии сварки позволяет получать сварные соединения с достаточно высокой прочностью, которая при ЛС составляет 0,9 от прочности основного материала без последующей термической обработки. Это достигается за счет дополнительного легирования шва титаном и алюминием из основного металла.

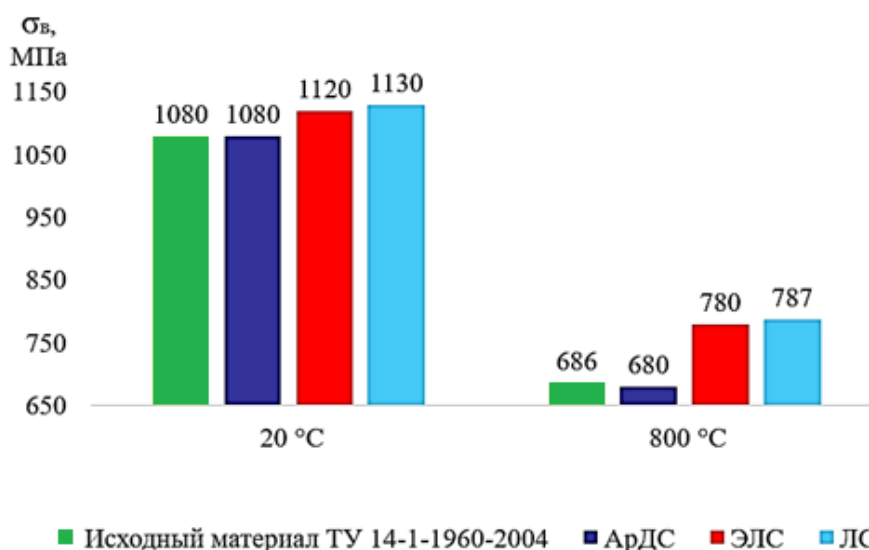


Рисунок 8 – Кратковременная прочность сварных соединений из жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК, погрешность измерения составляет $\pm 0,5$ %.

После термической обработки (закалка + старение) кратковременная прочность сварных соединений, выполненных ЛС, выше (до 10%) прочности основного материала, прошедшего аналогичную ТО.

Определен предел выносливости сварных соединений, выполненных по оптимальному режиму ($P_{ли}=4$ кВт, $v_{св}=33,3$ мм/с, $v_{п.}= 33,3$ мм/с) лазерной сваркой из жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК. Анализ полученных результатов предела выносливости (см. табл. 2), свидетельствует о том, что закалка с последующим старением не оказывает сильное влияние на сварные соединения, выполненные ЛС.

Таблица 2 – Предел выносливости сварных соединений из жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК

Способ сварки	Присадочный материал	Термическая обработка	σ_{-1} , МПа при долговечности 2×10^6 циклов
Лазерная сварка (полученные данные)	св. 06X15H60M15 (ЭП 367)	Закалка в состоянии поставки + сварка без последующей ТО	215 ÷ 228
		Закалка в состоянии поставки + сварка + закалка и старение	215 ÷ 243

Запас прочности конструкции (3) определяется как отношение:

$$K_m = \sigma_{\text{дл}} / \sigma_{\text{max}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{дл}}$ – предел прочности материала, соответствующей температуре в расчетной точке обечайки и времени работы в рассматриваемом режиме; σ_{max} – максимальное главное напряжение.

Согласно прочностному анализу сварных обечайек опоры и статора турбины ГТД максимальные напряжения на сварные соединения варьируется от 65 до 160 МПа. Следовательно, применение лазерной сварки (по оптимально приведённым режимам) сплава ХН68ВМТЮК при изготовлении данных ДСЕ, с целью повышения показателей свариваемости и обеспечения требований запаса прочности по местным напряжениям, применимо для сварных конструкций, где максимальные напряжения на сварные соединения составляют до 120 МПа.

В шестой главе проведено сравнение серийной и вновь разработанной маршрутной технологии создания неразъемных соединений Внедрение разработанной технологии лазерной сварки снизило внутренние напряжения в сварных соединениях и, как следствие, сократило количество последующих термических.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование формирования структуры сварного шва при воздействии лазерного излучения для определения склонности к образованию пор и трещин в сварном соединении из жаропрочных сплавов ХН68ВМТЮК и ХН45ВМТЮБР с целью выбора оптимального режима ($P_{ли}=4$ кВт, $v_{св}=33,3$ мм/с, $v_{п.}= 33,3$ мм/с). Установлено, что уменьшение дефектообразования в сварном соединении достигается, за счет повышения плотности мощности и уменьшения длительности воздействия лазерного излучения.

2. Проведено исследование геометрических характеристик сварного шва при различных режимах воздействия лазерного излучения. На основании полученных экспериментальных данных и метода нелинейной регрессии установлена линейная зависимость глубины и ширины сварного шва от плотности мощности и времени воздействия лазерного излучения, соответственно. Установлено, что формирование более оптимальной формы «кинжального» проплавления возможно за счет увеличения мощности и уменьшения длительности воздействия лазерного излучения, что позволяет снизить внутренние напряжения в сварном соединении.

3. Проведено исследование влияния погонной энергии на образование трещин в сварном соединении. Установлено, что уменьшение погонной энергии за счет увеличения скорости сварки приводит к снижению количества трещин и уменьшению ее длины в ОШЗ.

4. Установлено, что термическая обработка в виде закалки ($T = 1000 \pm 50$ °C, $t = 4$ ч) с последующим старением ($T = 700 \pm 50$ °C, $t = 16$ ч) стабилизирует структуру жаропрочного сплава, содержащую интерметаллидную γ' -фазу. Это повышает кратковременную прочность сварного соединения до 10% от прочности основного материала.

5. Проведено исследование и впервые определен предел выносливости лазерного сварного соединения из жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК. На основании прочностного анализа для статора турбины ГТД установлено, что применение лазерной сварки с обеспечением необходимого запаса прочности в 1,8 раза применима для конструкций с неразъемными соединениями, работающими до 120 МПа.

6. На основе результатов исследований структуры и свойств сварных соединений разработан и внедрен маршрутный технологический процесс лазерной сварки ДСЕ «Корпус внутренний» статора турбины ГТД для наземной (НК-12СТ, НК-14СТ-10, НК-36СТ) и авиационной (НК-25 сер.01, НК-25 сер.02, НК-32 сер.01, НК-32 сер.02) тематики из жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК, позволяющий получить сварные соединения, отвечающие требованиям норм прочности и надежности изделия.

7. На основе результатов материаловедческих исследований получены новые научно-практические знания о создании неразъемных соединений сваркой плавлением жаропрочных сплавов путем воздействия лазерного излучения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus:

1. Baranov, D.A. HN45VMTYUBR Alloy: Impact Beam Welding Modes on Microstructure and Distribution of Alloying Elements in the Seam [Текст] / D.A. Baranov, A.A. Parkin, S.S. Zhatkin // Solid State Phenomena. 2018. - Vol.284. - pp 530-535.

2. Baranov, D.A. Ensuring Strength in Laser Welds Made Using the Dispersion-Hardened EP693 Nickel Alloy [Текст] / D.A. Baranov, S.S. Zhatkin, V.I. Nikitin other // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2021. - Vol.62. No.40. - pp441-447.

3. Baranov, D.A. Analysis of Defects at Laser Welding of Heat-Resistant Alloy KnN45VMTYuBR [Текст] / D.A. Baranov, A.A. Parkin, S.S. Zhatkin // Defect and Diffusion Forum. 2021. - Vol.410. - pp 108-114.

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

4. Баранов, Д.А. Структура сварного шва, сформированного при лазерной сварке Cr–Ni-сплава при производстве ГТД [Текст] / Д.А. Баранов, К.В. Никитин, А.А. Паркин и др. // *Металлургия машиностроения*. №3. – Москва. – 2016. – С.46-48.

5. Баранов, Д.А. Исследование структуры сварных швов, сформированных лазерной сваркой жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК-ВД (ЭП693-ЭД) при производстве деталей и узлов ГТД [Текст] / Д.А. Баранов, А.А. Паркин, С.С. Жаткин и др. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Т.18, №1 (2). – Самара. – 2016. – С. 148-152.

6. Жаткин, С.С. Баранов Д.А. Влияние термической обработки на структуру и свойства сварного шва при лазерной сварке жаропрочного сплава ЭП693-ЭД используемого в производстве ГТД [Текст] / С.С. Жаткин, Д.А. Баранов, А.А. Паркин и др. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Т.18, №4 (6). – Самара. – 2016. – С. 1106-1113.

7. Баранов, Д.А. Влияние вакуумного отпуска на структурные свойства жаропрочного никелевого сплава ЭП693 [Текст] / Д.А. Баранов, К.В. Никитин, А.А. Паркин и др. // *Литейное производство*. 2018. №11. – Москва. – 2018. – С.3-8.

8. Баранов, Д.А. Особенности формирования сварного шва жаропрочного сплава ХН45ВМТЮБР в зависимости от режимов лазерной сварки [Текст] / Д.А. Баранов, А.А. Паркин, С.С. Жаткин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Т.20, №4 (2). – Самара. – 2018. – С. 170-176.

Публикации в прочих изданиях:

9. Баранов, Д.А. Исследование структуры сварного шва, сформированной при лазерной сварке жаропрочного сплава на хромоникелевой основе при производстве ГТД [Текст] / Д.А. Баранов, К.В. Никитин, А.А. Паркин и др. // В 40 Взаимодействие науки и литейного металлургического производства: Материалы 7-го всероссийского научного технического семинара. – Самара. – 2016. – С. 340-346.

10. Баранов, Д.А. Особенности воздействия CO₂-лазера на структуру сварного шва при лазерной сварке жаропрочного сплава, используемого в производстве деталей и узлов ГТД [Текст] / Д.А. Баранов, А.А. Паркин, С.С. Жаткин и др. // В сб.: Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов межд. Науч.-техн. Конф. В 2Ч.Ч.1. – Самара. – 2016. – 256с.

11. Баранов, Д.А. Исследование структуры и элементный анализ лазерного шва после термической обработки жаропрочного сплава ХН68ВМТЮК-ВД [Текст] / Д.А. Баранов, А.А. Паркин, С.С. Жаткин, А.С. Попов // Проектирование и перспективы технологии в машиностроении, металлургии и их кадровое обеспечение. Материалы III-ей Всероссийской научно-практической конференции. – Самара. – 2017. – С. 225-230

12. Баранов, Д.А. Исследование вакуумной обработки на состав и структуру жаропрочного никелевого сплава [Текст] / Д.А. Баранов, К.В. Никитин, А.А. Паркин и др. // Наследственность в литейно-металлургических процессах. Материалы 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Самара. – 2018. – С.460-468.

Научное издание

Баранов Дмитрий Александрович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук на тему:

Исследование структуры и разработка технологии лазерной сварки жаропрочного дисперсионно-твердеющего никелевого сплава при производстве ГТД

Автореферат отпечатан с разрешения объединённого диссертационного совета 99.2.039.02 (Д999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (протокол №14 от «08» октября 2021г.)

Формат 60x84 1/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № ____.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,

Отдел типографии и оперативной печати

443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244