

1420557
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ имени Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи
УДК 621.791.05

ИВАНОВ Юрий Николаевич

РАЗРАБОТКА СПОСОБА НЕПРЕРЫВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ
ТОЛЩИНОЙ ДО 5 ММ И ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА КАЧЕСТВО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

(05.04.05 – Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

1984

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель — д.т.н., профессор Григорьянц А.Г.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Акулов А.И.

к.т.н., с.н.с. Мульченко Б.Ф.

Ведущее предприятие — указано в решении специализированного Совета

Защита состоится " 4 " октября 1984 года на заседании специ
ордена Ленина
Красного Зна
по адресу: I

Ваши от
по указанном

С диссе

Авторе

у
специа
д

M420557

Подписано

950

Л-83179

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. К наиболее перспективным научно-техническим направлениям технологии машиностроения относится применение в операциях металлообработки мощных концентрированных потоков энергии, обладающих высокой тепловой эффективностью; среди них особое место занимают способы непрерывной лазерной сварки (ЛС) конструкционных сталей и сплавов различной толщины. Технической базой большинства освоенных в промышленности способов ЛС служат специализированные установки, оснащенные непрерывными CO_2 -лазерами мощностью 2...5 кВт. С их помощью решаются разнообразные практические задачи по шовой сварке изделий средних толщин. Однако в последнее время развитие работ по оптимизации существующих и созданию перспективных новых способов ЛС сдерживается некоторыми обстоятельствами, в частности: (1) практически отсутствуют надежные критерии для количественной оценки эффективности процесса ЛС; (2) недостаточно изучены основные характеристики и свойства ЛС-соединений различной толщины и их связь с технологическими факторами и параметрами режимов сварки.

Указанные обстоятельства не позволяют корректно определять границы реальных возможностей многих способов ЛС и тем самым затрудняют их внедрение в производство. Поэтому разработка научных основ эффективной, воспроизводимой и сравнительно недорогой промышленной технологии лазерной сварки является актуальной научно-технической задачей, решение которой в условиях современного машиностроения позволит сформировать области оптимальных режимов ЛС для различных групп материалов, толщин и типов соединений.

Цель работы. Разработка способа непрерывной лазерной сварки изделий средних (до 5 мм) толщин, отличающегося высокой производительностью и эффективностью использования энергии лазерного излучения и позволяющего получать прецизионные сварные соединения с высокой технологической и эксплуатационной прочностью.

Методы исследований. Основные теплофизические показатели способа ЛС определялись по предложенной в работе методике. Особенности теплопереноса при непрерывной лазерной сварке изучались с привлечением методов машинного моделирования тепловых процессов. Технологическая прочность ЛС-соединений оценивалась по их сопротивляемости образованию холодных трещин по методике ЛТП2. Механические свойства определялись по ГОСТ 6996-66 и по методике МБТУ. Оста-

I

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1420557

Иванов Ю.Н. Разработка спос



точные напряжения и деформация определялись традиционными методами. Нормы допустимости дефектов при ЛС определялись по специальной методике, вероятностная оценка указанных норм проводилась методами статистического контроля качества. Макро- и микроструктура металла сварных соединений изучалась методами металлографического анализа. Степень структурной неоднородности металла шва и ОШЗ оценивалась статистически по результатам измерения микротвердости.

Научная новизна. 1. Для большинства высокопрочных сложнолегированных сталей и титановых сплавов толщиной до 5 мм режим устойчивого "кинжального" проплавления достигается при концентрации инфракрасного лазерного излучения в зоне обработки до уровня 10^{10} Вт/м² при абсолютном значении мощности 2,5...5,0 кВт. Оптимальные режимы непрерывной лазерной сварки указанных материалов существуют в широком диапазоне скоростей от 60 до 180 м/ч (от 17 до 50 мм/с) и независимо от состояния облучаемой поверхности характеризуются повышенными теплофизическими показателями, достигающими 60...70% для эффективного к.п.д. и 42...46% для термического к.п.д., что связано с высокой производительностью процесса и с возможным устойчивым существованием узкого парогазового канала в зоне проплавления.

2. Применительно к условиям непрерывной лазерной сварки тонких пластин учет температурных зависимостей коэффициентов теплоемкости, теплопроводности и полной поверхностной теплоотдачи соединяемых материалов при численном моделировании тепловых процессов позволяет повысить точность определения максимальных температур, размеров сварочной ванны и величин скоростей охлаждения металла в высокотемпературной области (свыше 900К) до 85...90%, тогда как в области средних и низких температур (от 800К и ниже) тепловые процессы при ЛС могут быть удовлетворительно описаны аналитически.

Практическая ценность работы. Определена область оптимальных режимов ЛС для стыковых, кольцевых и замковых соединений из высокопрочных сложнолегированных сталей типа 28Х3СНМВФА, 18Х2Н3МДА, 10Х16Н4Б и титановых сплавов типа ПТЗВ ГОСТ 19307-74, ВТ28 и др. толщиной 2...5 мм, позволяющая повысить технологическую и эксплуатационную прочность получаемых соединений и существенно снизить уровень их остаточных деформаций по сравнению с традиционными способами сварки плавлением.

Разработаны практические рекомендации по организации типового процесса ЛС, позволяющие в условиях опытно-промышленного производ-

ства получать высококачественные сварные узлы и изделия.

По комплексу основных характеристик получаемых соединений (коррозионная стойкость, герметичность, механическая прочность) исследованный способ лазерной сварки рекомендуется для производства сварных конструкций теплообменных аппаратов.

Апробация. Результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на II Всесоюзной конференции "Применение лазеров в приборостроении, машиностроении и медицинской технике" (Москва, 1979), на научных семинарах: кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Баумана (1980), НИЦТЛ АН СССР (1981), кафедры "Оборудование и технология сварочного производства" ЛПИ им. Калинина (Ленинград, 1982).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из предисловия, шести глав, общих выводов по работе и приложений. Выполнена на 144 машинописных листах, содержит 108 рисунков, 19 таблиц, 165 наименований используемых литературных источников.

Глава I. Посвящена комплексному анализу возможностей, особенностей и характеристик метода непрерывной лазерной сварки конструкционных материалов. В ней коротко рассмотрены физические процессы, протекающие при поглощении лазерного излучения непрозрачными твердыми телами; особое место уделено тепловой модели "кинжальной" лазерной сварки металлов и сплавов. В главе проанализировано современное состояние проблемы лазерной сварки изделий средней толщины и рассмотрены пути ее промышленного освоения и развития.

Известно, что лазерное излучение, падающее на поверхность металлического материала, частично отражается ею, а частично поглощается в тонком поверхностном слое. Основная доля тепла переносится вглубь вещества с помощью электронной проводимости и в этом смысле тепловые процессы при ЛТО имеют единую физическую основу с традиционными способами тепловой обработки металлов. В то же время физические явления при поглощении лазерного излучения имеют ряд особенностей, существенных для технологии. Однако их характер и интенсивность в первую очередь зависят от среднего уровня плотности мощности лазерного излучения в зоне обработки q_n , Вт/м².

При уровне $q_n \sim 10^8 \dots 10^9$ Вт/м² происходит активный локальный разогрев материала без заметного испарения или разрушения. Такой процесс может быть использован для термообработки, наплавки, локального легирования и сварки на "мягких" режимах. При значительном увеличении q_n (свыше 10^{11} Вт/м²) в зоне лазерного воздействия устанавливается "жесткий" режим стационарного разрушения, что

позволяет осуществлять высокопроизводительную лазерную резку металлов. Снижение q_n до $10^9 \dots 10^{10}$ Вт/м² приводит к появлению жидкой фазы в движущейся парогазовой каверне. Расплавленный металл оттесняется назад и кристаллизуется с образованием сварного шва. Тепловая эффективность и производительность ЛС с глубоким проплавлением могут быть определены в ряде случаев расчетным путем с использованием традиционной модели мощного быстро движущегося линейного источника тепла, что позволяет оперативно подбирать определенный тип лазера и предпочтительный режим его работы.

Условием эффективной непрерывной сварки металлов удовлетворяют три типа лазерных систем: твердотельные лазеры на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом, на стекле с неодимом и газовые лазеры на двуокиси углерода. Наибольшую среднюю мощность обеспечивают лазерные системы, использующие интенсивное течение газа, в частности, электроразрядные СО₂-лазеры. Уровень мощности серийных технологических СО₂-лазеров может изменяться от 100 Вт до 1...5 кВт при общем к.п.д. 10...15%, что в значительной степени удовлетворяет энергетическим потребностям основных способов ЛС.

Совместное применение ЛС и ЭЛС в машиностроении показало, что в целом производственные возможности двух лучевых методов сварки на уровне мощности 2...5 кВт примерно равны несмотря на ряд физико-технических и технологических различий. Принципиальной особенностью ЛС является совместное сбалансированное использование внешних оптических устройств и систем газовой защиты. Типы и фокусные расстояния объективов для ЛС выбираются в зависимости от мощности излучения, конкретных условий сварки и оптических характеристик лазерного луча. Наибольший интерес для сварщиков-машиностроителей представляют длиннофокусные (100...200 мм) оптические системы с малыми (10...15°) углами сходимости, позволяющие осуществлять "кинжальную" ЛС в условиях значительных технологических возмущений. Глубина и форма шва, надежность и качество сварного соединения также во многом зависят от способа организации и состава газовой защиты, что особенно важно при сварке активных сплавов и высокопрочных сталей. В настоящее время толщина ЛС-соединений составляет 3...12 мм при сохранении проплавляющей способности луча и скорости сварки на уровне 0,75...1,2 кВт/мм и 25...50 мм/с соответственно; типичный коэффициент формы шва равен 2,5...5,0 и близок к аналогичному показателю ЭЛС; расширилась номенклатура материалов и типов соединений.

Для организации оптимального режима ЛС для изделий средней (до 5 мм) толщины необходимо выполнение ряда обязательных условий:

использование лазера мощностью не менее 2 кВт; концентрация излучения до уровня $10^9 \dots 10^{11}$ Вт/м²; точная подгонка, сборка и фиксация свариваемых изделий; организация интенсивного теплоотвода от корня шва. Соединения, выполняемые способом ЛС на правильно выбранном режиме, отличаются малым остаточным формоизменением, повышенной ударной вязкостью металла шва, улучшенными механическими свойствами и т.д. По мнению специалистов, в сварочном производстве имеются области, в которых лазерный луч может оказаться единственным приемлемым инструментом. По всей видимости, это будет сварка прецизионных изделий из высокопрочных сталей или титановых сплавов. При этом наибольший экономический эффект от внедрения средств и методов ЛС может быть получен путем оптимального сочетания рентабельности и технической целесообразности их использования в условиях массового производства.

Глава 2. Содержит обоснование и формулировки основных целей и задач работы.

Одним из условий создания научно-обоснованной технологии ЛС является оптимизация существующих способов сварки на основе совместного анализа их теплофизических показателей и свойств получаемых соединений. Применительно к способу непрерывной лазерной сварки сталей и сплавов средней толщины это означает, что для его оптимизации должны быть решены следующие научно-технические задачи:

1. экспериментальное исследование эффективного и термического к.п.д. процесса в зависимости от параметров режима и технологических факторов ЛС и оценка их значений для оптимальных режимов сварки;
2. теоретический анализ и моделирование потоков тепла при ЛС;
3. количественное определение и сравнительное исследование показателей механической и технологической прочности сварных соединений, выполненных способами ЛС, ЭЛС и АДДС;
4. исследование особенностей напряженного состояния в тонколистовых соединениях и оценка возможностей способа ЛС как заключительной сборочной операции при изготовлении прецизионных изделий;
5. практическая проверка выводов и рекомендаций работы путем разработки перспективного варианта технологии ЛС элемента конструкции теплообменного аппарата.

Глава 3. Содержит описание принципов работы и технических возможностей оборудования и приборов, применявшихся при проведении исследований.

Базой для разработки способа непрерывной лазерной сварки по-

служил образец опытно-промышленной технологической установки ЛТ1-2, созданной в ИАЭ им. Курчатова, главным элементом которой являлся быстропотоочный CO_2 -лазер с замкнутым газовым контуром и самостоятельным электрическим разрядом, генерировавший непрерывное инфракрасное излучение мощностью до 5,0 кВт с к.п.д. не менее 10%.

Для проведения экспериментов по "кинжальной" лазерной сварке использовался специализированный стенд, оборудованный подвижным столом с электрическим приводом, системой наведения и фокусировки лазерного луча и газовой защитой зоны сварки. Управление работой стенда и контроль режима ЛС осуществлялись с общего пульта управления. В процессе сварки образец равномерно перемещался относительно неподвижного лазерного луча, фокусирующая система (230 ± 20 мм, двояковыпуклые линзы из монокристаллов KCl) обеспечивала "кинжальное" проплавление всех использованных материалов в широком диапазоне режимов ЛС. Соосно с фокусирующим устройством над поверхностью образца располагалось специальное сопло, через которое в зону сварки подавались защитные газы (Ar , He , CO_2 или их смеси).

Действительная средняя мощность лазерного излучения, скорость и характер ее изменения в пределах сварочного цикла регистрировались с точностью 95...97% болометрическим измерителем проходного типа непосредственно в ходе проведения технологических экспериментов. Управление режимом генерации лазера осуществлялось вручную либо автоматически, причем режим ручного регулирования мог быть записан и затем воспроизведен с относительной ошибкой в 5...8%.

Сравнительные эксперименты с использованием традиционных методов проводились на модернизированном стенде аргодуговой сварки АДСВ-2 и на серийной электроннолучевой установке ВЕ-691 Sciaky

Глава 4. Посвящена изучению тепловых процессов при лазерной сварке. Обсуждены результаты теплофизических исследований; с помощью ЭВМ проанализированы особенности теплопереноса в тонких пластинах, проплаляемых быстро движущимся лазерным лучом. Даны рекомендации по использованию разработанных методик и вычислительных программ.

Для исследования показателей тепловой эффективности процессов ЛС была разработана специальная методика, заключающаяся в синхронном калориметрировании режима и записи термического цикла ЛС. Методика позволяла достоверно определять действительную эффек-

тивную мощность процесса, характерные значения и градиенты температур, скорости нагрева/охлаждения металла в различных областях сварного соединения. (Так, было установлено, что в большинстве случаев ∇T непосредственно у линии сплавления составляет 300...500 град/мм). В дальнейшем для упрощения методики была предложена расчетная схема, удовлетворительно описывавшая тепловые процессы в средне- и низкотемпературных (500...800K) областях ЗТВ. Основу ее составила классическая модель быстро движущегося линейного источника тепла, проплавляющего пластину конечной толщины. Это позволило, отказавшись от калориметрирования, оперативно определять уровень ($q_{\text{эфф}}$) ЛС по низкотемпературной части диаграммы термочикла с ошибкой 10...15%, приемлемой для последующих расчетов.

При анализе эффективного к.п.д. ЛС было установлено, что определяющую роль в зависимостях $\eta_u = F(N_{\text{изл}}, V_{\text{св}})$ играет конкретное сочетание значений $N_{\text{изл}}$ и $V_{\text{св}}$. Если мощность лазерного излучения постоянно близка к максимальной, увеличение скорости сварки приводит к значительному росту (η_u) ЛС. Так, на уровне

$N_{\text{изл}} \sim 5 \text{ кВт}$ эффективный к.п.д. ЛС тонких пластин титанового сплава BT28 возрастает в 2,5...2,8 раза при изменении $V_{\text{св}}$ в 8...10 раз. В условиях сварки с минимальными энергозатратами, обеспечивающими полное проплавление на заданной скорости, (η_u) ЛС оказывается практически неизменным и, по-видимому, близким к предельному в диапазоне $V_{\text{св}} = 10...40 \text{ мм/с}$. Это подтверждается совпадением экстремума кривой $\eta_u(N_{\text{изл}}, V_{\text{св}}) \approx 0,57...0,60$ в первом случае с установившимся уровнем (η_u) ЛС = 0,58...0,63 во втором. Отмеченное различие можно объяснить влиянием глубины и формы пароголового канала на интегральный коэффициент поглощения $(A_{\text{эфф}})_{\Sigma} \approx (\eta_u)_{\text{ЛС}}$, что особенно заметно при "кинжальной" ЛС.

Термический к.п.д. ЛС также зависит от мощности излучения и скорости сварки, однако эта зависимость является более сложной. Если лазерный луч движется быстро, то тепловая эффективность проплавления металла высока; если же он движется медленно, то потери за счет теплопроводности возрастают и уровень (η_t) ЛС снижается. Причем при лазерной сварке он снижается тем резче, чем ниже уровень $(A_{\text{эфф}})_{\Sigma} = \eta_u(V_{\text{св}})$. Таким образом, лазерная сварка с низкой производительностью может оказаться неэффективной ввиду нелинейной зависимости (η_t) ЛС от $(A_{\text{эфф}})_{\Sigma} = \eta_u(V_{\text{св}})$. Так, при лазерной сварке 2 мм-пластины сплава BT28 со скоростью 6...8 мм/с, термический к.п.д. составил 0,23, тогда как при 24...25 мм/с он возрос до 0,40...0,42. В целом термический к.п.д. реальных процессов ЛС весьма высок (0,40...

0,46 в зависимости от материала пластины и режима сварки) и близок к теоретически предельному (η_t) пред = 0,484; это объясняется тем, что способ "кинжальной" ЛС по своей физической сути наиболее близок к классической схеме проплавления тонкой пластины мощным быстродействующим источником тепла.

Для оценки влияния технологических факторов изучалось совместное воздействие физико-химического состояния облучаемой поверхности, рода защитного газа и степени расфокусировки оптической системы ПЛТУ на эффективность поглощения энергии при сварке. Было установлено, что при больших $\gamma_{\text{св}}$ эффективный к.п.д. мало зависит от химического состава и топографии облучаемой поверхности при защите зоны сварки струей CO_2 или He, но может сильно снижаться при использовании Ar или Ar + He-смесей, а также при расфокусировке лазерного пятна на 15...20%. Максимум (η_u) ЛС наблюдается при некотором "заглублении" фокального пятна под поверхность материала: конкретная величина (ΔF)_{opt} определяется в основном углом сходимости сфокусированного луча, свойствами свариваемого материала, и геометрией "кинжального" парогазового канала. Соединения, выполненные на ЛТИ-2 с $\Delta F = -1$ мм, отличаются повышенным коэффициентом формы шва ($H/B \geq 1,5$) и практически не имеют макродефектов.

Анализ результатов теплофизических экспериментов позволил сформулировать для исследуемого способа ЛС рекомендации по выбору оптимальных сочетаний $N_{\text{изл}}$, $\gamma_{\text{св}}$ и др., которые обеспечивали бы максимально возможные значения η_u и η_t при номинальном уровне $N_{\text{изл}} \sim 5 \cdot 10^3$ Вт. Было установлено, что оптимальными являются режимы, которые на скорости 100...150 м/час в условиях CO_2 или He - защиты характеризуются 65...70%-м эффективным и 42...46%-м термическим к.п.д. и обеспечивают устойчивое "кинжальное" проплавление свариваемых деталей на глубину 1,5...4,0 мм.

Перспективным направлением оптимизации быстропротекающих сварочных процессов является их многофакторное моделирование, учитывающее изменение теплофизических свойств материалов, колебаний эффективной мощности и др. Поле температур, возникающее в тонколистковых соединениях при ЛС, может быть смоделировано на ЭВМ с использованием нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности в твердой фазе, дополненного краевыми условиями 3-го рода. Для приближенного численного решения уравнения был выбран метод конечных разностей (МКР), позволивший с помощью явной схемы: (1) вычислить скорости нагрева и охлаждения различных зон ЛС-сое-

динений; (2) определить профили и градиенты температур в высокотемпературной области ЗТВ и уточнить ее линейные размеры в условиях ЛС; (3) сопоставить результаты численного решения нелинейной тепловой задачи (П) с аналитическими расчетами по классической линейной схеме (I) и с экспериментальными термическими циклами ЛС, записанными в сходных условиях (Ш); (4) оценить адекватность использованной математической модели реальным условиям ЛС и определить области практического применения разработанной программы (ЭВМ BES1030, язык Фортран IV, ключ ДОС).

Сравнительный анализ экспериментальных (Ш) и расчетных (I и П) данных позволил отметить следующее: (а) топография температурных полей, построенных по схеме (I) и модели (П), существенно различна в высокотемпературной области (свыше 900К); расчет по уточненной схеме приводит к 1,5...3,0-кратному уменьшению ее линейных размеров в предельном состоянии; (б) характерная длина сварочной ванны в тонкой пластине, определяемая изотермой плавления (1960К для сплава ВТ28), составляет в зависимости от параметров режима ЛС 9...12 мм при расчетах по схеме (I) и 2...5 мм — по модели (П), тогда как в реальных условиях (Ш) она колеблется от 3 до 7 мм; (в) температура металла в центре пятна нагрева, вычисленная по нелинейной модели (П), составляет 2200...2700К, что в целом согласуется с литературными данными, определяющими степень перегрева жидкой фазы при ЭЛС как (0,2...0,4)Тпл; (г) скорость охлаждения металла шва в процессе кристаллизации (1900...1500К) составляет 3700 град/с для нелинейной модели (П) и не превышает 1200 град/с при расчетах по линейной схеме (I); (д) скорости охлаждения металла в ЗТВ, определенные для "мягкого" режима ЛС в диапазоне высоких (900...1200К) температур, составляют: схема (I) — 48 град/с; эксперимент — 107 град/с; модель (П) — 126 град/с и т.д. Следовательно, для количественного анализа процессов, протекающих в высокотемпературных (свыше 900К) областях тонколистовых соединений при ЛС, целесообразно использовать нелинейную модель (П), учитывающую температурные зависимости теплофизических характеристик сдвигаемых материалов.

Рассмотренный в работе метод машинного моделирования тепловых процессов при ЛС позволяет осуществлять: (1) предварительную оценку структуры и свойств сварного соединения, выполненного на известном режиме ЛС; (2) исследование, выбор и оптимизацию параметров температурных режимов при разработке технологии лазерной сварки ответственных узлов и изделий.

Учет характера распределенности источника в разработанной вычислительной программе расширил диапазон ее применения, т.к. позволил моделировать тепловые процессы при дуговых способах сварки.

Глава 5. Содержит результаты исследований прочностных и деформационных характеристик ЛС-соединений: рассматривается влияние особенностей лазерной сварки на технологическую прочность и механические свойства, определяется уровень остаточных деформаций и напряжений в тонких пластинах, оценивается роль подготовительно-сборочных операций при ЛС.

Для экспериментов по изучению влияния особенностей лазерной сварки на технологическую прочность сварных соединений были выбраны четыре марки сталей: бейкитная 18Х2Н3МДА, две мартенситные 30ХГСА и 28Х3СНМВФА и мартенситостареющая 10Х16Н4Б и две марки титановых сплавов: ПТ7М и ВТ28. Образцы из указанных материалов сваривались лазерным лучом, аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом и электронным лучом и оказались не склонными к образованию горячих трещин на абсолютном большинстве исследованных режимов.

Увеличение скорости АРДС приводило к ухудшению сопротивляемости образованию холодных трещин для всех высокопрочных сталей за исключением 28Х3СНМВФА, в то время как при лазерной сварке технологическая прочность с увеличением скорости сварки неизменно увеличивалась, особенно при $V_{св} > 100$ м/ч (свыше 28 мм/с). Для всех сопоставимых скоростей способ ЛС обеспечивал более высокие показатели сопротивляемости трещинообразованию по сравнению с АРДС. Аналогичные результаты были получены и на титановых сплавах. Анализ термокинетических диаграмм показал, что наиболее "жесткие" условия термомеханического цикла реализуются при ЛС на высокой скорости. Изменение жесткости цикла сказывается как на форме шва (при АРДС U-образная форма с $K_{\phi} \approx 0,3$; при ЛС — "кинжальный" шов с $K_{\phi} \approx 1,2 \dots 2,5$), так и на микроструктуре шва и ОШЗ. Статистическая оценка влияния способа и скорости сварки на степень структурной неоднородности показала, что металл шва и ЗТВ при ЛС обладает большей структурной однородностью, чем при АРДС.

При сварке титановых сплавов на большинстве режимов ЛС микроструктура шва характеризовалась наиболее благоприятным фазовым составом и повышенной дисперсностью составляющих.

Оценка механических свойств сварных соединений проводилась на сплавах ПТЗВ и ПТ7М. Сварные соединения, выполненные ЛС, при испытаниях на статическую прочность оказались равнопрочными основному

металлу; при этом механические свойства различных участков ЛС-соединений оставались практически неизменными независимо от их положения относительно оси шва и от режима ЛС. Испытание стыковых сварных соединений сплава ПТ7М на статический изгиб показало удовлетворительную пластичность образцов при всех скоростях ЛС. Однако при увеличении $V_{св}$ с 60 м/ч до 200 м/ч максимальный угол загиба снизился со 140 до 90°, что может быть объяснено повышенной склонностью сплава ПТ7М к порообразованию на "жестких" режимах. Образцы сплава ПТ3В отличались высокой стабильностью свойств на всех режимах сварки. Оптимальными в отношении прочности и пластичности оказались режимы ЛС с высокими скоростями сварки (80...160 м/ч).

Изучение влияния подготовительно-сборочных операций на отдельные показатели качества ЛС-соединений проводилось при сварке стыковых соединений сплавов ПТ7М и ПТ3В толщиной 2,8...3,5 мм. Критерием качества служило временное сопротивление статическому разрушению и относительное удлинение образцов, а различные неточности сборки моделировались изменением зазора и деформации кромок. Была обнаружена повышенная чувствительность соединений к изменению зазора при сварке, критическая величина которого составила 3...6% от толщины основного металла при $V_{св} = 60...160$ м/ч, причем требования к точности сборки ужесточались с увеличением скорости сварки. Критическое значение деформации составило 40% от толщины пластины по критерию прочности и 20...30% по критерию пластичности; величина погонной энергии и коэффициент формы шва мало влияли на показатели качества.

На основе стандартных испытаний нескольких партий сварных соединений по методике ИВТУ им.Баумана (проф. Волченко В.Н.) была проведена расчетная оценка нормы допустимости дефектов при ЛС и определена возможная доля брака во всем объеме выпускаемых изделий. Ожидаемая доля брака типа "зазор" в стыковых соединениях при нормативной и пороговой величине дефекта составила 9 и 16% соответственно.

Деформационные характеристики тонколистовых элементов исследовались на образцах из сплавов ВТ28 и ПТ7М, сваренных аргонодуговой и лазерной сваркой. Способ ЛС обеспечивал снижение остаточных продольных деформаций в 3...5 раз и остаточной поперечной усадки в 5...7 раз по сравнению с АРДС. Снижение уровня остаточных максимальных деформаций почти линейно зависело от погонной энергии процесса сварки; кроме того, при ЛС наблюдалось более равномерное распределение поперечной усадки по длине шва. На основе полученных данных

был определен коэффициент пропорциональности в формуле Винокурова для определения поперечной усадки в тонкой пластине при ее полном проплавлении в условиях ЛС. Остаточный уровень максимальных продольных растягивающих напряжений при ЛС был приблизительно равен аналогичной характеристике АРДС и составлял $(0,8...0,9) \times \sigma_{0,2}$, причем зона их концентрации при ЛС оказалась существенно уже. Изменение режима ЛС практически не изменяло (σ_{∞}) ост. Уменьшение зоны пластических деформаций и снижение растягивающих напряжений на 40...70% приводило к тому, что усадочная сила в ЛС-об-разцах оказывалась меньше, чем при АРДС.

Глава 6. Содержит результаты завершающего этапа исследований; в ней предложен оптимизированный вариант технологии лазерной сварки элемента конструкции теплообменного аппарата и даны практические рекомендации по организации типового технологического процесса ЛС в условиях опытно-промышленного производства.

Для практической проверки положений и выводов диссертационной работы был разработан и опробован в лабораторных условиях перспективный вариант технологии ЛС макета узла типа "труба - трубная решетка" (Т - ТР), выполненного из высокопрочных титановых сплавов ПТ7М и ПТЗВ ГОСТ 19807-74. Выбор способа ЛС, определение сборочных допусков и параметров сварочного цикла проводились внутри области оптимальных режимов, сформированной по результатам выполненных в работе исследований. Уровень качества полученных соединений оценивался по итогам их сравнительных испытаний совместно с аналогичными узлами, выполненными промышленным способом ЭЛС.

Оценка качества макетов проводилась по следующим показателям: герметичность (при давлении не выше 1,2 Рном); механическая и технологическая прочность (при статическом растяжении - не менее 75% от прочности сплава ПТ7М); коррозионная стойкость при повышенной температуре (570...620К). Определение статической прочности сварных соединений и их сопротивляемости образованию холодных трещин осуществлялось по ГОСТ 9669-66 и на основе методики ЛТП2 МВТУ. Было установлено, что в принятых условиях испытаний оба типа сварных узлов не обнаруживают склонности к замедленному разрушению и практически равнопрочны сплаву ПТ7М. Испытания на герметичность и коррозионную стойкость также не выявили следов разрушений и иных повреждений макетов. Таким образом было показано, что сварные узлы типа Т-ТР, выполненные исследованным способом ЛС на оптимальном режиме, по комплексу основных свойств не уступают аналогичным узлам, выполненным промышленным способом ЭЛС; по этим показателям

оба способа сварки на равных основаниях могут быть рекомендованы для использования в заводских условиях при изготовлении элементов конструкций теплообменных аппаратов.

Совокупность данных, полученных в главах 4...6 работы, позволила сформулировать ряд практических рекомендаций по организации технологического процесса ЛС на уровне мощности 2...5 кВт для тонкостенных плоских, коробчатых и трубчатых конструкций, выполненных из металлических материалов с низкой теплопроводностью. Основные положения рекомендаций касаются особенностей проведения подготовительно-сборочных операций, межоперационного хранения свариваемых изделий, фокусировки излучения и создания эффективной газовой защиты в зоне сварки. Особое внимание уделено способам выбора основных параметров режима ЛС, оптимальных для конкретных групп материалов, толщин и типов соединений. Оценку уровня качества типового технологического процесса предложено проводить на основе его реальных теплофизических показателей и по совокупности свойств получаемых сварных соединений.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Использование непрерывного технологического CO_2 -лазера мощностью до 5 кВт позволяет, концентрируя в зоне обработки инфракрасное излучение до уровня $10^9 \dots 10^{10}$ Вт/м², осуществлять высокопроизводительную лазерную сварку высокопрочных сложнoleгированных сталей и сплавов толщиной 2...5 мм.

2. Режим устойчивого "кинжального" проплавления тонких металлических пластин достигается на уровне мощности 2,5...5,0 кВт в широком диапазоне скоростей от 15 до 50 мм/с (от 60 до 180 м/час) и характеризуется высокими теплофизическими показателями:

- а) эффективный к.п.д. процесса ЛС составляет 25...70% в зависимости от мощности излучения лазера и скорости сварки, а также от глубины и формы возникающего при сварке парогазового канала;
- б) термический к.п.д. процесса ЛС в ряде случаев оказывается близким к предельному и может изменяться от 18 до 46% в зависимости от тех же условий.

3. Высокие скорости охлаждения металла шва и ОШЗ, экспериментально установленные порядки величин которых составляют на исследованных режимах ЛС соответственно 1000 и 100 град/с в диапазоне температур 800...1000К ($\approx 500 \dots 700^\circ\text{C}$), а также значительные температурные градиенты, достигающие $5 \cdot 10^{-2}$ К/м (500 град/мм) непосредственно у линии сплавления, формируют в свариваемых издели-

ях "жесткий" термический цикл и приводят к образованию узких и глубоких швов шириной 1,8...3,5 мм, окруженных малой околошовной зоной толщиной 0,6...1,2 мм и узкой зоной термического влияния шириной 5...8 мм; при этом длина сварочной ванны составляет 4...7 мм.

4. Тепловые процессы, протекающие в тонколистовых соединениях при непрерывной лазерной сварке с "кинжальным" проплавлением, удовлетворительно описываются известной моделью проплавления пластины конечной толщины мощным быстро движущимся линейным источником тепла. Учет температурных зависимостей теплофизических характеристик свариваемых материалов, осуществляемый с помощью ЭВМ в рамках данной модели, позволяет оперативно выполнять основные теплотехнические расчеты, в том числе — определять скорости нагрева и охлаждения металла шва и ЗТВ в высокотемпературных (выше 900К) областях сварных соединений, с точностью 85...90%, тогда как использование традиционных линейных схем приводит в тех же условиях к 2,5...3-кратной ошибке. В то же время расчет тепловых полей в области средних и низких температур (от 800К и ниже) может быть выполнен как с помощью численных, так и аналитических методов, поскольку в этих условиях они дают практически сходные результаты.

5. Несмотря на жесткость термических циклов, способы электроннолучевой и лазерной сварки высокопрочных сталей 18Х2Н3МДА, 30ХГСА, 28ХЗСНМВФА, 10Х16Н4Б повышают в целом технологическую прочность соответствующих соединений по сравнению с традиционными способами сварки плавлением, что может быть обусловлено следующими причинами:

- а) формированием более однородного по структуре и свойствам металла шва и околошовной зоны;
- б) образованием тонких, мелкодисперсных структур в указанных зонах;
- в) благоприятной схемой кристаллизации металла шва на оптимальных режимах сварки и др.

В частности, переход от способа АРДС к исследованному способу непрерывной лазерной сварки тонколистовых соединений из указанных материалов повышает их сопротивляемость замедленному разрушению в 1,5...2,2 раза на всех сопоставимых по скорости режимах.

6. Образцы сварных соединений, полученные путем сквозного проплавления лазерным лучом пластин титановых сплавов ВТ28, ПТ7М, ПТЗВ и др. толщиной $3,0 \pm 0,5$ мм, по комплексу основных механических свойств (прочность, относительное удлинение, сопротивление

изгибу при статическом нагружении) не уступают основному металлу в широком диапазоне режимов ЛС; при этом оптимальными в отношении прочности и пластичности являются режимы, характеризующиеся высокими скоростями – от 20 до 45 мм/с (от 70 до 160 м/час).

7. Стыковые соединения из тех же материалов, выполненные с использованием стандартной сборочной оснастки, остаются практически равнопрочными основному металлу в случае, если величина зазора не превышает 5...7, а величина смещения кромок – 20...25% от толщины материала. Статистически обоснованные, указанные нормы допустимости дефектов обеспечивают 80%-й уровень качества стыковых соединений при условии, что эти соединения выполнены на оптимальных режимах ЛС; необходимая точность сборки может быть достигнута с помощью серийной оснастки типа УСП, не требующей специальной технологической подготовки производства.

8. В условиях высокоскоростной лазерной сварки уровень погонной энергии, соответствующий устойчивому проплавлению тонких (2...4 мм) титановых пластин, снижается в 5...8 раз по сравнению с оптимальными режимами АРДС, что приводит к уменьшению остаточных продольных деформаций свариваемых элементов в 3...5 раз и остаточных поперечных деформаций – в 5...7 раз. При односторонней лазерной сварке пиковые значения остаточных продольных растягивающих напряжений в шве и околошовной зоне не увеличиваются, а зона распространения и максимальный уровень сжимающих напряжений в основном металле – снижаются на 40...70% по сравнению с АРДС; это приводит к уменьшению усадочной силы и позволяет избежать потерю устойчивости тонколистовых элементов, выполненных исследованным способом ЛС. Практически это означает, что прецизионная лазерная сварка может быть использована в качестве заключительной сборочной операции, после которой не потребуются механической обработки или правки готовых изделий.

9. Модели сварных узлов типа "труба-трубная решетка", выполненные на оптимальных режимах ЛС из титановых сплавов типа ПТЗВ и ПТ7М, по комплексу механических, антикоррозионных и других служебных свойств не уступают соединениям, выполненным по апробированной в промышленных условиях технологии ЭЛС. Таким образом, исследованный способ непрерывной лазерной сварки может быть рекомендован для разработки перспективных вариантов технологии изготовления узлов и элементов теплообменных аппаратов в тех случаях, когда традиционные способы сварки плавлением не обеспечивают требуе-

мых уровней точности, прочности и герметичности получаемых соединений.

10. На основании полученных данных разработаны практические рекомендации, позволяющие в условиях опытно-промышленного производства организовать технологический процесс высокопроизводительной лазерной сварки соединений из специальных сталей и титановых сплавов толщиной 2...5 мм для плоских, коробчатых и трубчатых конструкций.

Основное содержание диссертации отражено в следующих опубликованных работах:

1. Исследование влияния лазерной сварки на склонность высокопрочных сталей к образованию холодных трещин. /В.Г.Федоров, А.Г. Григорьянц, Ю.Н.Иванов и др. - Изв.вузов. Машиностроение, 1978, № 12, с. 138-143.
2. Влияние лазерной сварки на структуру металлов сварного соединения. /В.Г.Федоров, А.Г.Григорьянц, Ю.Н.Иванов и др. - Изв. вузов. Машиностроение, 1979, № 2, с. 122-125.
3. Григорьянц А.Г., Грезев А.Н., Иванов Ю.Н. Механические свойства сварных соединений, выполненных лазерной сваркой. - Труды/ МВТУ, 1980, № 337, Прочность сварных конструкций и требования контроля / Под ред. В.А.Винокурова, с. 10-18.
4. Сопоставление процессов лазерной и дуговой сварки. /А.Г.Григорьянц, Ф.К.Косырев, Ю.Н.Иванов и др. - Сварочное производство, 1980, № 9, с. 1-3.
5. Григорьянц А.Г., Иванов Ю.Н., Кваша Ю.Н., Трофимов А.Н. Расчет тепловых процессов при лазерной сварке. - Изв. вузов. Машиностроение, 1981, № 11, с. 135-138.

10. 12. 87

