

На правах рукописи

УДК 621.791.72

Грезев Николай Витальевич

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ДВУХЛУЧЕВОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ  
ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы  
и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Москва – 2010

Работа выполнена в Московском государственном техническом  
университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: д.т.н., проф. **Григорьянц Александр Григорьевич**

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. **Неровный Вячеслав Михайлович**

к.т.н. **Кваша Юрий Николаевич**

Ведущее предприятие: **ОАО «Трубная металлургическая компания»**

Защита диссертации состоится «\_24\_»\_\_марта\_\_\_\_\_2011 г. в \_14\_ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

Телефон для справок: 8-499-267-09-63

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «        »\_\_\_\_\_2011 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, доцент

Коновалов А.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

В диссертационной работе рассматриваются вопросы, связанные с технологией сварки конструкционных низколегированных трубных сталей и формированием качественных сварных соединений, полученных двумя лазерными излучениями.

### **Актуальность работы.**

Лазерная обработка металлов (сварка, резка, наплавка, термообработка) получила значительное развитие за сравнительно короткий срок своего применения. Благодаря высокой концентрации энергии в лазерном пучке и возможности локального воздействия на изделие лазер обеспечивает высокую производительность и прецизионность обработки. Лазерные технологии, в отличие, например, от электронно-лучевых, обладают такими достоинствами, как возможность проведения процесса при атмосферном давлении и передачи энергии лазерного излучения на достаточно большие расстояния, в том числе с использованием гибких световодов.

Однако, несмотря на эти важные преимущества, возможности лазера как источника тепла в значительной степени ограничены при необходимости сварки металлов больших толщин. При увеличении мощности лазерного излучения индуцируется приповерхностная плазма, которая значительно уменьшает долю энергии, вкладываемую лазерным пучком в обрабатываемое изделие, в результате чего технология лазерной сварки на больших мощностях остается недостаточно эффективной.

Существенными факторами, сдерживающими внедрение технологии лазерной сварки в производство, являются высокие требования, предъявляемые к сварному шву по твердости, и требования к сборке кромок под сварку (отсутствие деформации и зазора).

Одним из перспективных методов решения изложенных проблем может стать двухлучевая лазерная сварка (ДЛЛС), которая благодаря более распределённому источнику нагрева увеличивает объём сварочной ванны, что приводит к понижению твердости сварного шва и уменьшению требований к точности сборки. При этом уменьшается вероятность оптического пробоя приповерхностной плазмы. Однако технология двухлучевой лазерной сварки в настоящее время мало изучена и требует проведения исследований.

В связи с изложенным разработка технологии двухлучевой лазерной сварки является актуальной задачей.

**Цель работы.** Разработать способ двухлучевой лазерной сварки низколегированных трубных сталей.

### **Задачи исследования.**

1. Исследовать теоретически (численно) и экспериментально влияние основных факторов процесса лазерной сварки одним и двумя лучами.
2. Найти оптимальные значения параметров, характеризующих основные факторы, которые влияют на металлургические и механические свойства сварного соединения: интенсивность лазерного излучения; скорость ЛС; углы падения лучей на поверхность сварного стыка; расстояние между фокусными пятнами; параметры приповерхностной плазмы.
3. Выполнить исследования металлургических и механических свойств

сварных соединений, полученных способом двухлучевой лазерной сварки, а также комбинированным способом (двусторонняя ДЛЛС с последующей дуговой сваркой под слоем флюса).

4. Провести лабораторные испытания труб, сварные соединения которых получены способом ДЛЛС, на механическую прочность.
5. Разработать рекомендации на технологическую схему ДЛЛС и установить основные параметры процесса ДЛЛС труб.

**Методы исследования.** Основные задачи работы решались на основе экспериментальных и теоретических методов исследований.

Исследования микро- и макроструктуры сварных шлифов, полученных двухлучевой лазерной сваркой, проводились с использованием оптического микроскопа Neophot-2. Ударная вязкость измерялась по методу Шарпи. Твердость определялась твердомерами марок М-400 и ПМТ-3. Для расчетов плазменных процессов использовалась программа, созданная с помощью языков программирования Fortran и С++, а также программного обеспечения Mathlab. Численное моделирование тепловых процессов производилось конечно-разностным методом.

### **Научная новизна.**

1. Установлено, что введение дополнительного источника тепла в виде второго лазерного излучения (под определенным углом) в сварочную каверну приводит к увеличению объема жидкого металла хвостовой части ванны и, соответственно, к снижению скорости охлаждения металла шва и зоны термического воздействия в 1,5–2 раза. Это объясняется тем, что при подаче второго луча под углом в интервале  $13\text{--}16^\circ$  по отношению к первому лучу происходит эффективный подогрев задней стенки парогазового канала, который формируется от первого, более мощного лазерного излучения. На низколегированных трубных перлитных и бейнитных сталях способ двухлучевой лазерной сварки, по сравнению с однолучевой лазерной сваркой, обеспечивает отсутствие закалочных структур и снижение микротвердости в 1,5–2 раза (до 210–220 НВ) при прочности сварного соединения на уровне основного металла.
2. Установлено, что при двухлучевой лазерной сварке снижается вероятность пробоя плазмы, поглощающей лазерное излучение. Это объясняется следующим: 1) При двухлучевой лазерной сварке уменьшается плотность мощности излучения на поверхности свариваемого металла, т. к. имеет место не одно, а два фокусных пятна, расстояние между центрами которых составляет 1,5–2 мм, чем достигается плотность мощности не более  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, что влияет на прозрачность плазмы; 2) Второй лазерный луч подается под углом  $13\text{--}16^\circ$ , что обеспечивает эффективный подвод энергии без пересечения зоны приповерхностной плазмы от первого луча; тем самым в одинаковых газовых средах до поверхности изделия доводится суммарно большее количество энергии, нежели одним лучом той же мощности, полностью проходящим сквозь плазму.

### **Практическая ценность.**

1. Для повышения надежности эксплуатации сварных соединений толстостенных, в том числе продольных и спиральных швов газонефтепроводных труб, на уровне лабораторных испытаний разработан

способ двухлучевой лазерной сварки. Достигнуто улучшение эксплуатационных показателей сваренных образцов труб: снижение твердости сварного шва до 260 HV, повышение ударной вязкости в 3 раза, повышение давления при гидравлических испытаниях на разрыв трубы до 203 атм. Эти факторы определяют эксплуатационную надежность и ресурс газонефтепроводных труб в условиях севера РФ.

2. Способ ДЛЛС позволяет увеличить экономические и экологические показатели выполнения технологического процесса сварки и параметров сварных соединений за счет: повышения скорости сварки; уменьшения расхода присадочной проволоки; отсутствия необходимости разделки кромок и последующей термической обработки; увеличения срока службы эксплуатации труб и межпрофилактического срока за счет возрастания прочности сварных соединений.

**Реализация результатов работы.** Разработанный способ двухлучевой лазерной сварки был опробован для сварки труб диаметром 530 мм и толщиной стенки 8 мм из стали 09Г2СУ, гидравлические испытания которых на Челябинском трубопрокатном заводе показали удовлетворительные результаты.

**Апробация работы.** Основные положения работы доложены на Российской конференции по лазерным технологиям (г. Радужный, 2003 г.); на научном семинаре в ИПЛИТ РАН (г. Шатура, 2005 г.); на научном семинаре кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2006 г.); на научном семинаре кафедры МТ-7 «Технологии сварки и диагностики» (г. Москва, 2009 г.)

#### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 4 печатные работы.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и списка литературы из 64 наименований. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок и 21 таблицу.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Глава 1. Литературный обзор.** Однолучевая лазерная сварка получила значительное развитие за сравнительно короткий срок своего использования. Благодаря высокой концентрации энергии в лазерном пучке и возможности локального воздействия на изделие лазер обеспечивает высокую производительность и прецизионность обработки. Кроме того, лазерные технологии, в отличие, например, от электронно-лучевых, обладают такими достоинствами, как возможность проведения процесса при атмосферном давлении и передачи энергии лазерного излучения на достаточно большие расстояния.

Однако, несмотря на эти важные преимущества, возможности лазера как источника тепла в значительной степени ограничены. Это, в первую очередь, связано с низкой эффективностью нагрева металлов лазерным излучением, обусловленной их высокой отражательной способностью на частотах излучения, характерных для большинства технологических лазеров.

Другим фактором, снижающим эффективность использования мощных лазеров, является индуцируемая лазерным излучением приповерхностная

плазма, которая существенно уменьшает долю энергии, вкладываемую лазерным пучком в обрабатываемое изделие, в результате чего технология лазерной сварки на больших мощностях остается недостаточно эффективной.

Существенным фактором, сдерживающим внедрение технологии в производство, являются высокие требования, предъявляемые к сварному шву по твёрдости. Второй сдерживающий фактор – требования к сборке кромок под сварку (отсутствие деформации и зазора).

В последнее время для решения упомянутых проблем всё чаще используются гибридные лазерные технологии: лазерно-дуговые и лазерно-плазменные. Суть технологии заключается в совместном воздействии на обрабатываемое изделие лазерного излучения и электрической (плазменной) дуги. При практической реализации гибридных процессов оба источника тепла воздействуют на металл в пределах общей зоны нагрева, причем дуга может гореть как со стороны изделия, на которую направлен лазерный пучок, так и с противоположной. Происходящий в обоих случаях нагрев металла электрической дугой приводит к увеличению коэффициента поглощения лазерного излучения. В итоге применение дополнительного дугового нагрева способствует повышению эффективности соответствующего лазерного процесса, что особенно важно при использовании лазеров небольшой мощности. Сварной шов при гибридной лазерной сварке имеет кинжальную форму с резким увеличением ширины шва в месте воздействия второго низкоконцентрированного источника тепла, что оказывает негативное влияние на физико-механические свойства сварного соединения.

Возможности комбинированной лазерной сварки, а именно использование двух лучей одновременно, изучены мало. Благодаря тому, что лазерная сварка характеризуется наличием парогазового канала, в котором происходит поглощение энергии, существует возможность добавления дополнительного лазерного излучения в этот же канал. В литературе сообщается, что излучение может подаваться под различными углами ( $\leq 16^\circ$ ), при этом не нарушается стабильность сварочного процесса; помимо этого, имеются отдельные сведения по сварке двумя лучами.

Однако двухлучевая лазерная сварка не применяется в промышленности, так как технология недостаточно изучена. Во-первых, исследования касались лишь твёрдотельных и диодных лазеров, излучение которых подавалось по оптоволоконным лучепроводам. Во-вторых, нет окончательной ясности в физике процесса: влияние относительных заглублений фокальных точек, угла оси наклона и других параметров на стабильность процесса.

## **Глава 2. Разработка способа комбинированной лазерной сварки.**

Для решения поставленных задач была разработана физико-математическая модель, состоящая из двух частей. Первая часть позволяет вести расчеты взаимодействия лазерного излучения с приповерхностной плазмой, возникающей в среде защитного газа, вторая часть рассматривает взаимодействие прошедшего через плазму излучения с поверхностью свариваемой стальной детали.

В первой части рассматривается конический симметричный сходящийся световой луч мощностью  $P$ . В области, где плотность излучения

достигает порогового значения, возникает оптический разряд, в котором все выделяющееся тепло отводится от разряда теплопроводностью. В этом случае в сферической системе координат распределение температуры описывается уравнением баланса энергии:

$$C_a \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \lambda_a \frac{\partial T}{\partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \lambda_a \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\mu(r, \theta) P_R(\theta)}{\pi (\theta_R r)^2} \exp\left(-\int_r^R \mu(r, \theta) dr\right), \quad (1)$$

где  $r, \theta$  – координаты сферической системы координат,  $C_a, \lambda_a$  – коэффициенты теплоемкости и теплопроводности среды, с которой взаимодействует лазерное излучение;  $\mu(r, \theta)$  – коэффициент поглощения среды;  $\theta_R$  – угол фокусировки лазерного луча;  $R$  – верхняя граница расчетной области, на которой задано излучение лазера, распределение мощности которого вычисляется по формуле:  $P_R = P_0 \cdot \exp(-(R_\theta)^2 / R_L^2)$ , где  $R_L$  – характерный размер радиуса лазерного луча;  $P_0$  – мощность лазера.

Константы  $C_a, \lambda_a, \mu$  заданы таблично в зависимости от температуры. Размеры расчетной области выбираются такими, что температура на границах не меняется и равна температуре окружающего воздуха.

Совместно с уравнением (1) в рамках модели геометрической оптики решается уравнение для интенсивности излучения:  $\frac{dE}{dr} = -\mu(r, \theta)E$ , где  $E$  – интенсивность излучения лазера. С помощью этого уравнения определяется распределение излучения в сходящемся коническом световом луче оптического разряда, при этом интенсивность на верхней границе при  $r=R$  задана.

Полученное решение для распределения интенсивности лазерного излучения на поверхности является исходным для решения второй части: моделирование нагрева свариваемой детали. Сфокусированный луч с цилиндрической симметрией перемещается по поверхности пластины со скоростью  $V$ .

Распределение тепла в пластине определяется из решения уравнения теплопроводности в приближении термически тонкой пластины. В этом случае задача решается в декартовых координатах:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda_c \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \frac{\alpha}{h} E(x, y) - \frac{\varepsilon \sigma T^4}{h} - \frac{q_e}{h} \theta(T_K - T), \quad (2)$$

где  $C, \lambda_c$  – коэффициенты теплоемкости и теплопроводности материала свариваемой пластины;  $h$  – толщина пластины;  $\alpha$  – коэффициент поглощения лазерного излучения пластиной;  $E(x, y)$  – интенсивность излучения, падающего на пластину (определена на основе решения задачи (1));  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon$  – коэффициент теплового излучения;  $\theta(\xi) = 0$  при  $\xi < 0$ ,  $\theta(\xi) = 1$  при  $\xi \geq 0$ , где  $\xi = T_K - T$ ,  $T_K$  – температура кипения материала. Луч перемещается по оси  $x$ . Последние два члена в правой части уравнения (2) описывают потери на тепловое излучение с поверхности и потери тепла за счет испарения. Поток энергии, уносимой паром, определяется произведением теплоты сублимации  $L$  на плотность пара  $n_H$  и его тепловую скорость  $\bar{V}_T$ .

$$q_e = 0,2n_H \bar{V}_T L = \frac{2,56 \cdot 10^3}{\sqrt{T}} (P_H - P_a) (Bm / cm^2) , \quad (3)$$

где  $P_a = 0,1$  кГс/мм<sup>2</sup>. Плотность пара обусловлена давлением насыщенного пара, определяемым в виде:

$$P_H = \frac{4}{T^{1,27}} 10^{(13,27 - 19710 / T)} . \quad (4)$$

Числовые значения в этих выражениях приведены для железа. Существенное испарение начинается, когда температура поверхности превысит температуру кипения материала  $T_K$ , при этом  $P_H > P_a$ . Температура кипения поверхности железной пластины приблизительно равна 2800 °С. В наших расчетах принято, что температура расплава незначительно превышает температуру кипения. При уровнях лазерной мощности, рассматриваемых в данной работе, температура незначительно превышала температуру кипения, а область, где достигалась температура испарения, имела геометрические размеры до 1 мм. Поэтому в данных расчетах потери тепла за счет испарения малы. По краям пластины использовалось условие  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$  (потери тепла через границы пластинки не учитывались), где  $n$  – нормаль к границе. В качестве начального условия полагалось, что температура пластины равна температуре окружающего воздуха  $T_0$ . Теплофизические параметры материала мишени для простоты полагались постоянными и близкими к параметрам Ст35.

Как только температура в пластине превысит температуру плавления, расчет температурного поля при сварке проводится с учетом фазовых переходов, с этой целью решается задача Стефана. Температуры в расплаве и твердой фазе удовлетворяют уравнению (2). На границе раздела фаз температура равна температуре фазового перехода  $T^*$ , разность тепла на границе  $K_\phi v$ , где  $K_\phi$  – теплота фазового перехода,  $v$  – скорость фронта границы фаз,  $v = \frac{\partial x}{\partial t}$ . Условия на границе фаз имеют вид:

$$\begin{aligned} T(\xi + 0, t) &= T(\xi - 0, t) = T^* \\ \lambda_n \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\xi+0} - \lambda_p \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\xi-0} &= \rho K_\phi \frac{dx}{dt} , \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\lambda_n$  и  $\lambda_p$  – коэффициенты теплопроводности в пластине и расплаве.

Для численных расчетов использовалась явная разностная схема второго порядка аппроксимации по пространственным переменным и первого порядка по времени. В соответствии с представленной выше физико-математической моделью взаимодействия лазерного излучения с металлами при сварке были разработаны алгоритм и численный код. В результате ряда выполненных численных расчетов полученные решения были сопоставлены с аналитическими решениями модельных задач.

На основе литературных данных и результатов расчетов физико-математической модели была отработана схема двухлучевой лазерной сварки (рис. 1–5). При этом использовались два технологических СО<sub>2</sub>-лазера – мощностью 3 и 5 кВт. Отрабатывались различные схемы сварки, основываясь на результатах расчётов, была оптимизирована схема двухлучевой сварки (рис. 6).

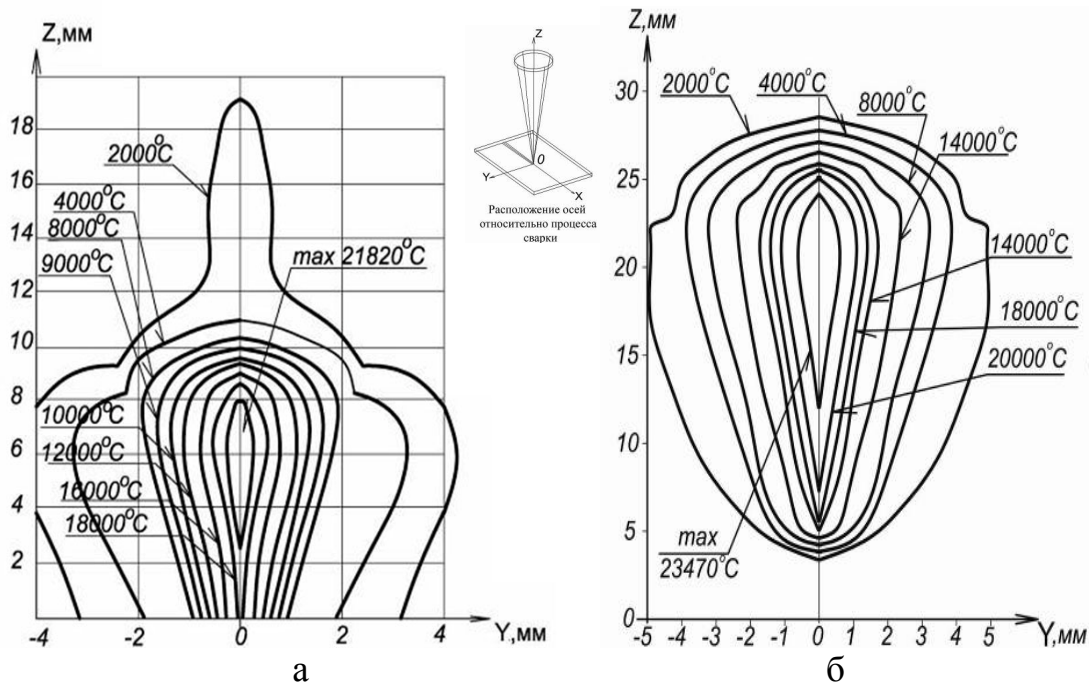


Рис. 1. Изотермы распределения плотности мощности лазерного луча для параметров лазерного излучения:  $P = 5$  кВт (а);  $P = 8$  кВт (б); линза с фокусным расстоянием  $F=350$  мм; защитный газ – аргон.

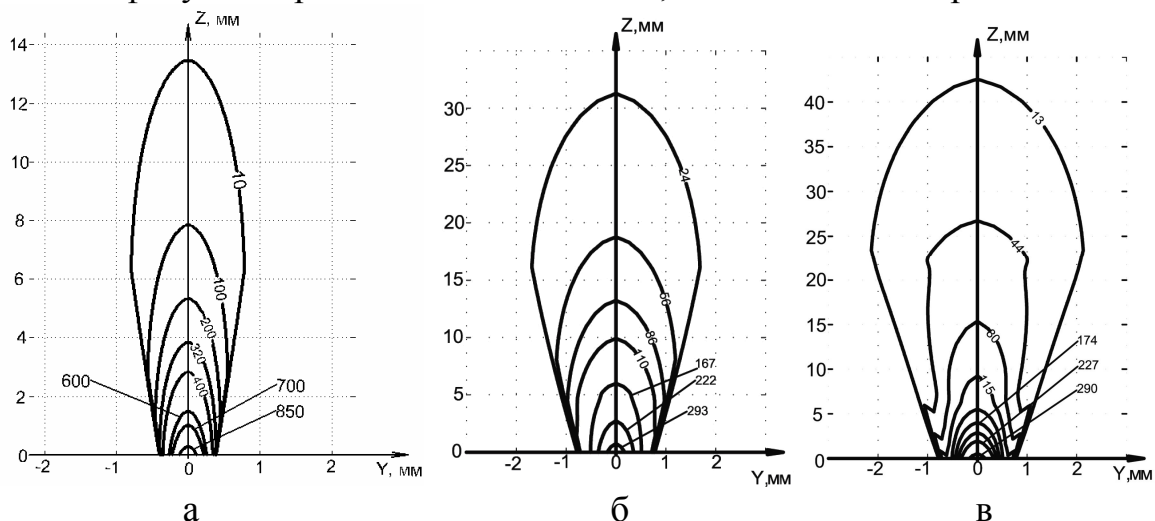


Рис. 2. Изотермы распределения плотности мощности для параметров лазерного излучения:  $P = 3$  кВт (а);  $P = 5$  кВт (б);  $P = 8$  кВт (в); линза с фокусным расстоянием  $F=350$  мм; защитный газ – аргон ( $\text{кВт}/\text{см}^2$ ).

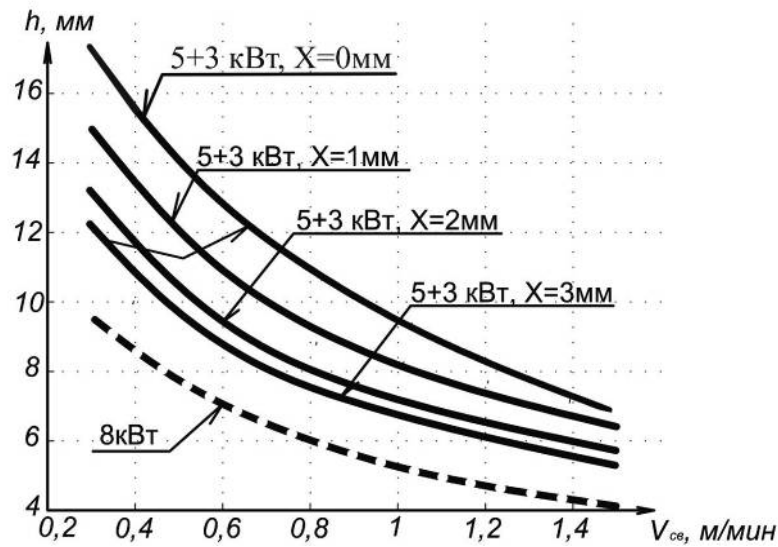


Рис. 3. Зависимость глубины проплавления от скорости луча для различных расстояний между центрами фокусных пятен.

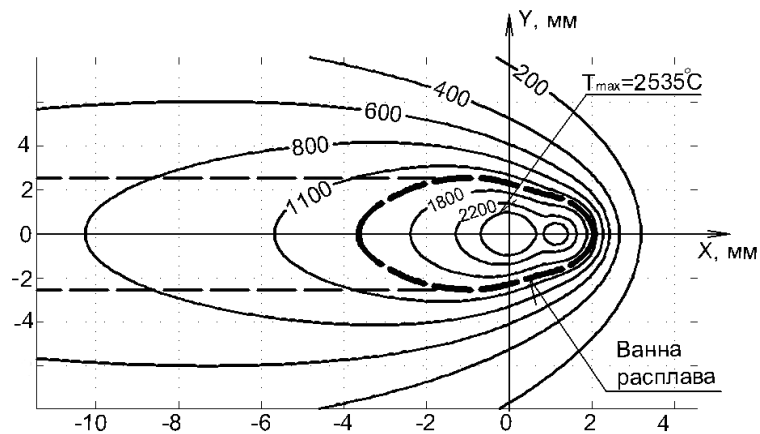


Рис. 4. Распределение температуры в стальной пластине толщиной 8 мм при двухлучевой лазерной сварке двумя лазерами – мощностью 5 и 3 кВт; расстояние между фокусными пятнами 1,5мм.

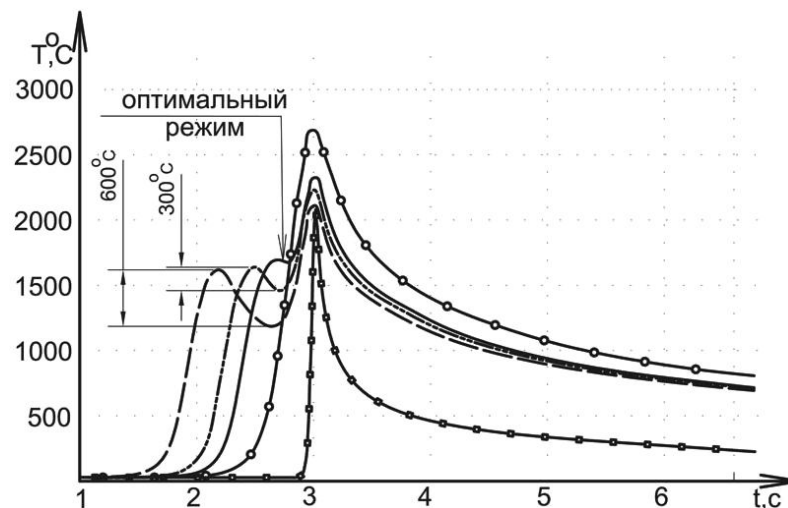


Рис. 5. Термические циклы нагрева и охлаждения металла при однолучевой ЛС ( $P=8$  кВт) и двухлучевой ЛС ( $P=5+3$  кВт),  $V_{cb}=1$  м/мин:

- – двухлучевая ЛС, расстояние между фокусными пятнами 3 мм;
- · - · - – двухлучевая ЛС, расстояние между фокусными пятнами 2 мм;
- – двухлучевая ЛС, расстояние между фокусными пятнами 1,5 мм;
- о-о – двухлучевая ЛС, расстояние между фокусными пятнами 0 мм;
- – однолучевая ЛС, мощность 8 кВт.

Установлено, что для стабилизации процесса сварки необходимо контролировать следующие параметры: расстояние от одного фокального пятна на поверхности свариваемой детали до другого, угол наклона оси второго излучения и скорость сварки. Исследования показали, что для схемы, представленной на рис. 6, расстояние между фокусными пятнами должно быть  $\cong 1,5$  мм, оптимальный угол наклона  $13^\circ$ , скорость сварки (в зависимости от свариваемой толщины) 0,6–1,5 м/мин. Установлено, что на скоростях выше 1 м/мин между двумя излучениями чётко видна перемычка из расплавленного металла. При понижении скорости сварки перемычка исчезает, т.е. происходит объединение парогазовых каналов двух излучений.

При угле подачи излучения в  $13^\circ$  лазерное излучение частично минует парогазовый факел, возникающий над поверхностью образца. Эта схема сварки делает возможным использование не только таких защитных газов, как He и  $\text{CO}_2$ , но и Ar, при условии, что расход составляет не менее 50 л/мин для сдува плазмы.

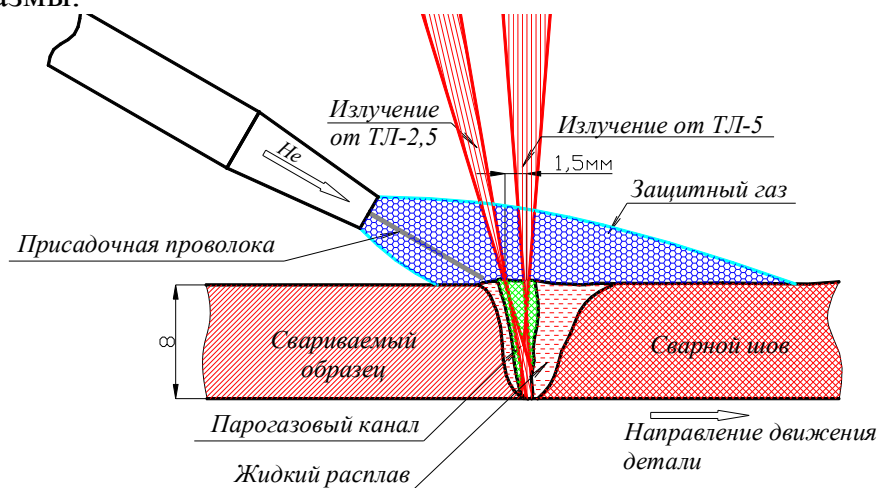


Рис. 6. Оптимальная схема двухлучевой лазерной сварки.

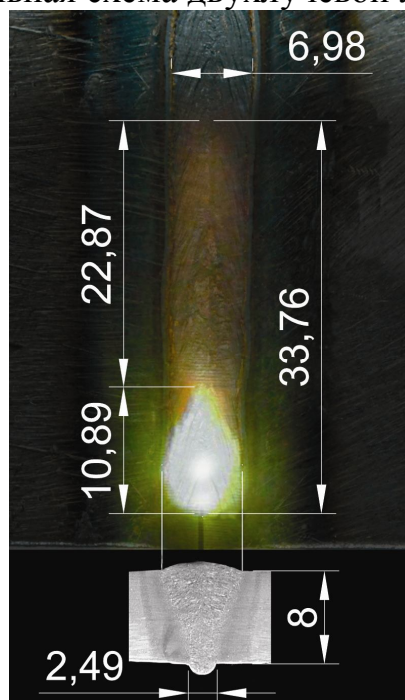


Рис. 7. Сварной шов, выполненный двухлучевой лазерной сваркой ( $\delta=8$  мм).

Эксперименты позволили установить, что двухлучевая лазерная сварка с присадочной проволокой позволяет значительно снизить требования к зазору между свариваемыми кромками, по сравнению с однолучевой лазерной сваркой. Однако при сварке с присадкой глубина проплавления уменьшается, поэтому необходимо снижать скорость сварки или увеличивать мощность излучения. Это связано с тем, что часть энергии идёт на расплав присадочной проволоки.

Скорости двухлучевой лазерной сварки соизмеримы со скоростями при однолучевой лазерной сварке той же мощности. Это свидетельствует о том, что КПД процесса находится на том же уровне, что и при однолучевой лазерной сварке, при этом сохраняется «кинжалность» проплавления (рис. 7).

При двухлучевой лазерной сварке с присадочной проволокой несколько увеличена ширина как верхней, так и нижней части шва, по сравнению с лазерным швом, полученным однолучевой лазерной сваркой. Зона термического влияния несколько выше, но соизмерима с однолучевой лазерной сваркой.

Исследования физико-механических свойств сварных швов проводились на образцах из трубных сталей 08ГФБАА и 14ГБШ класса К60 размером 150х300х8мм. Исследования на статическое растяжение по ГОСТ 1497-84 и на изгиб по ГОСТ 14019-2003 показали, что сварной шов не уступает по свойствам основному металлу.

Испытания на ударную вязкость образцов сварного соединения проводились по ГОСТ 6996-66 при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  и  $-60^{\circ}\text{C}$ . Испытания образцов на ударную вязкость с V-образной формой производились при температуре  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$  и  $-30^{\circ}\text{C}$ . Ударная вязкость обеих сталей остаётся на очень высоком уровне. Причём, если для стали 14ГБШ переход в хрупкое состояние происходит при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$ , то для стали 08ГФБАА этот порог видимо смещён в более низкие температуры (ниже  $-60^{\circ}\text{C}$ ), поэтому установить его не удалось.

Исследование микрошлифов показали, что структура металла сварного шва феррито-перлитная мелкозернистая с величиной зерна 11–12 баллов, в зоне нормализации – зерно 13–14 баллов по ГОСТ 5639-80, согласно шкале I, и состоит из столбчатых кристаллов. Структура достаточно однородна по толщине проката, хотя в средней части проката (на отдельных шлифах) выявлена осевая неоднородность в виде полос, обогащенных С, Мп, Р и неметаллическими включениями. Наличие неоднородностей объясняется недостаточно качественной подготовкой поверхности под сварку, по аналогии с любой другой сваркой плавлением.

По сравнению с однолучевой лазерной сваркой при двухлучевой лазерной сварке отсутствуют закалочные структуры типа мартенсита, бейнита, которые появляются при сварке трубных сталей при скоростях около 1 м/мин. Это объясняется тем, что при двухлучевой лазерной сварке скорость охлаждения жидкой фазы ниже, однако при этом механизм формирования сварного шва остаётся таким же, как и при однолучевой лазерной сварке.

Исследование микротвёрдости сварных швов показали, что значения твердости металла не превышали значения 260 HV (уровень, рассматриваемый как максимально допустимый при дуговой сварке труб). Чётких отличий в твердости металла шва и ЗТВ в верхней части соединения и у корня шва не выявлено.

Двухлучевая лазерная сварка полностью удовлетворяет допустимым нормам по твёрдости, тогда как при однолучевой лазерной сварке твёрдость достигает 400 HV по зоне сплавления. Такая твёрдость недопустима, поэтому сварной шов требует дополнительной термической обработки или же предварительного подогрева.

**Глава 3. Двухлучевая лазерная сварка опытной партии труб из стали 08ГФБАА (К60).** Стоимость мощных лазерных установок для сварки больших толщин очень высока, что является сдерживающим фактором для широкого внедрения лазерных технологий. Поэтому область применения лазерных технологий возможна там, где есть поточная линия и количество выпускаемой продукции велико. Большие объёмы производства позволят в кратчайший срок окупить лазерное оборудование. Поэтому, одно из возможных применений двухлучевой лазерной сварки может быть в трубной промышленности.

Для внедрения двухлучевой лазерной сварки недостаточно исследований образцов пластин. Необходимо проведение натурных испытаний труб, сваренных данной технологией. Именно трубы, сваренные двухлучевой лазерной сваркой, и последующие гидравлические испытания их на разрыв позволят оценить реальное повышение качества сварных соединений.

Такие испытания проводятся для всех труб, которые претерпели те или иные изменения в технологии производства. Натурные испытания показывают реальные возможности трубы, её эксплуатационные характеристики.

Отработанная схема двухлучевой лазерной сварки позволяет сваривать трубы с толщиной стенки до 12 мм. Однако оптимальной по производительности для мощности лазерных установок используемых в данной работе является толщина 8 мм.

Для проведения опытной лазерной сварки были использованы заготовки Челябинского трубопрокатного завода следующих параметров: L=2000 мм – длина заготовок; D=530 мм – диаметр заготовок;  $\delta$ =8 мм – толщина металла заготовок. Материал заготовок – трубная сталь марки 08ГФБАА класса прочности К60. Данный класс стали является лучшим на сегодняшний день и может использоваться, как в северных условиях, так и в южных.

Для реализации отработанной технологии двухлучевой лазерной сварки был создан опытный стенд для сварки трубных образцов. В этот стенд вошло следующее оборудование:

Первый лазер – CO<sub>2</sub>-лазер марки ТЛ-5М мощностью 5 кВт.

Второй лазер – CO<sub>2</sub>-лазер марки ТЛ-3 мощностью 3 кВт.

Автоматизированный лазерный технологический комплекс АЛТК-Р, модель АЛТК-Р.1500 (использовался для продольного перемещения образцов).

Устройство ИЗОПЛАН–U104 (использовалось для подачи сварочной проволоки и защитного газа).

Для лазерной сварки необходимо обеспечить сборку кромок свариваемого изделия без зазора. С этой целью был специально разработан кондуктор для сжатия продольного стыка трубы.

С помощью двух гидравлических кондукторов заготовка трубы зажималась по краям. Для того чтобы обеспечить равномерный зажим, кондуктор №2 был подвижным, то есть находился в подвешенном состоянии, что позволяло производить его перемещение вдоль трубы и с помощью прихваток зажимать трубу равномерно по всей длине. Схема сборки с помощью кондукторов представлена на рис. 8а.

Усилие сжатия с помощью гидравлических домкратов составляло 5 т. Помимо домкратов, использовались фиксирующие винты, которые позволили удерживать трубную заготовку в фиксированном положении в течение длительного времени.

После сборки труба помещалась на стол продольного перемещения. Общая схема расположения всего оборудования представлена на рис. 8б.

После исследования основных закономерностей режимов сварки на опытных образцах были сформулированы основные требования к сборке трубных заготовок.

Для двухлучевой лазерной сварки без присадочной проволоки необходимо обеспечить зазор не более 0,2 мм. Для сварки с присадочной проволокой достаточно обеспечить зазор не более 0,7 мм.

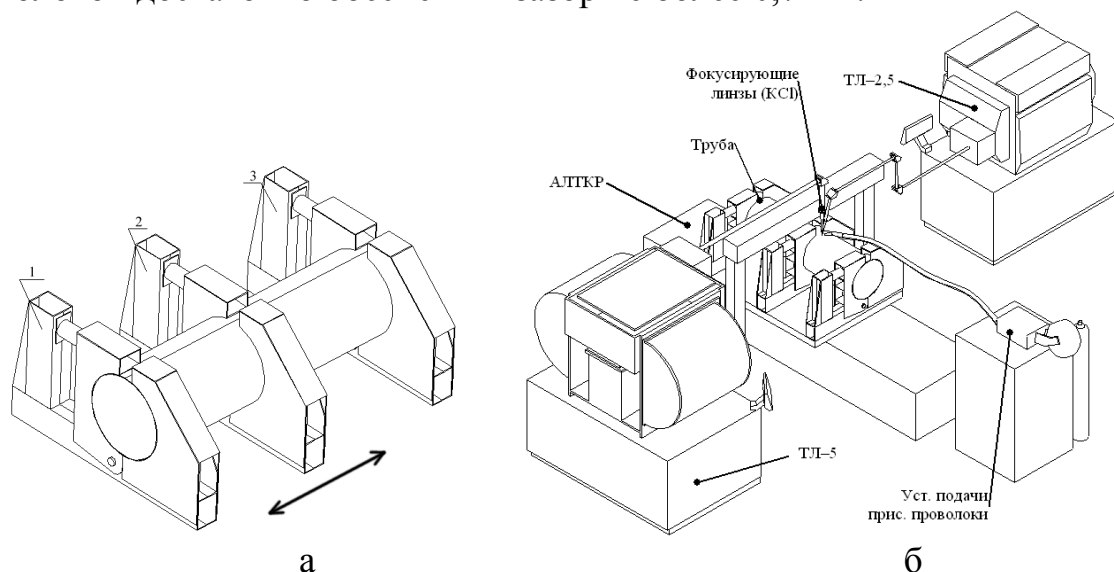


Рис. 8. Трёхмерная схема: а) кондуктора для сборки трубной заготовки; б) сварочный стенд с двумя лазерами.

Было установлено, что для обеспечения равномерного сварного шва необходимо получить одинаковые характеристики сборки по всей длине, что в условиях промышленного производства невозможно. Поэтому определена зависимость подачи присадочной проволоки от меняющегося зазора.

В условиях лаборатории скорость подачи присадочной проволоки пришлось корректировать вручную в зависимости от зазора на трубе, для чего предварительно измерялись зазоры на трубе. В промышленных же условиях рекомендуется применять автоматические системы слежения и корректировки скорости подачи сварочной проволоки.

На ОАО «Трубодеталь» трубы, сваренные двухлучевой лазерной сваркой, подвергались гидроиспытаниям. Разрушение труб произошло при давлении 203 кгс/мм<sup>2</sup>. Разрыв труб идет от внутренней поверхности по сварному шву с выходом в околошовную зону на наружной поверхности (рис. 9 а, б).

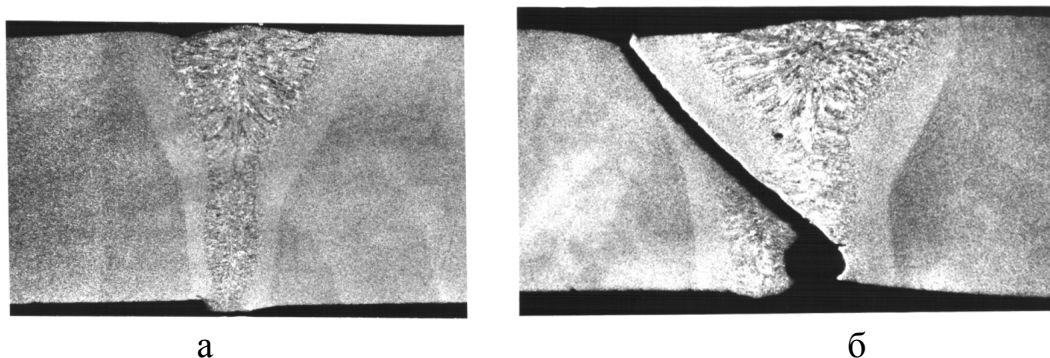


Рис. 9. Фотография шлифа сварного шва: а) до гидравлических испытаний; б) после гидравлических испытаний (то же место).

Трубы тех же параметров, но сваренные двухсторонней автоматической сваркой под флюсом, обычно выдерживают давление, не превышающее 162 кгс/мм<sup>2</sup>. Разрушение, как правило, происходит по зоне термического влияния.

Это говорит о том, что (сварные соединения?) труб, выполненные двухлучевой лазерной сваркой, превышают по своим характеристикам (сварные швы?) труб, сформированные автоматической дуговой сваркой под слоем флюса.

#### **Глава 4. Исследование сварных швов, полученных двухлучевой лазерной сваркой и автоматической сваркой под слоем флюса.**

Другим направлением промышленного внедрения двухлучевой лазерной сварки может стать сварка корня шва толстостенных газонефтепроводных труб с последующей автоматической дуговой сваркой под флюсом с другой стороны.

Трубы с толщиной стенки  $\delta=15-18$  мм обычно изготавливают на спирально-шовных станах, где скорость сварки ограничена из-за опасности вытекания жидкой фазы. Применение же двухлучевой лазерной сварки способствовало бы повышению производительности и качества труб.

Поэтому совместно с ОАО «Стройтрансгаз», ЗАО «Трубная Металлургическая компания», ОАО «Выксунский Трубный Завод» была проведена работа по двухлучевой лазерно-дуговой сварке образцов листовой стали типа 10Г2ФБ с толщиной стенки 15,1–18,7 мм.

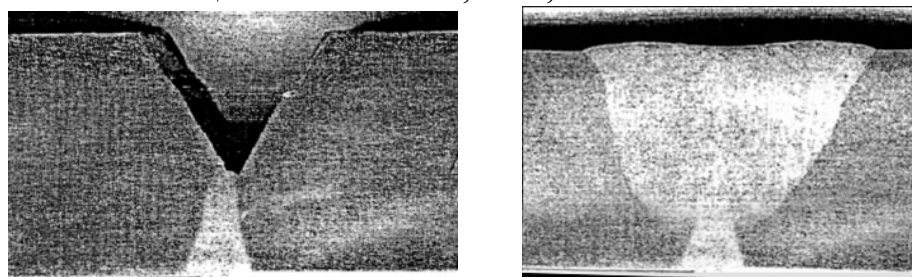


Рис. 10. Макрошлиф сварного соединения пластины с толщиной стенки 16,8 мм, выполненного: а) двухлучевой лазерной сваркой; б) дуговой сваркой под флюсом с другой стороны пластины.

Отработанная технологическая схема двухлучевой лазерной сварки позволяет оптимально, с экономической точки зрения, сваривать (материалы?) толщиной до 8 мм. Поэтому для сварки были использованы образцы из листовой стали марки 10Г2ФБ размером 16,8x2500x12000 мм с V-образной разделкой кромок с углом раскрытия 60° и величиной притупления 8 мм. Для защиты сварного шва использовался инертный газ He.

По отработанной технологической схеме двухлучевой лазерной сварки была подготовлена серия образцов (рис. 10). После двухлучевой лазерной сварки образцы проваривались под флюсом на стыкосварочной установке стана «2520» ТЭСЦ. При этом использовалась проволока марки L70 и флюс марки 995N.

Испытания образцов, сварные соединения которых выполнены комбинированной сваркой, на статическое растяжение показали, что разрушение их происходит по основному металлу, т.е. металл сварного шва имеет более высокие прочностные характеристики, чем свариваемая листовая сталь марки 10Г2ФБ. Временное сопротивление разрыву в основном соответствовало нормативным требованиям для труб класса прочности K60 (не менее 588 МПа) и составляло 592–620 МПа.

При испытании сварных соединений на угол загиба ГОСТ 9454-78 (примерно 180°) с расположением в растянутой зоне сварного шва, выполненного лазерной сваркой, и шва, сваренного под слоем флюса, трещин и разрушений не обнаружено.

Результаты испытаний на ударную вязкость по Шарпи показали, что вязкопластические свойства металла сварных швов, полученных комбинированной лазерной-дуговой сваркой (в месте перекрытия швов), и металла сварного шва, выполненного только дуговой сваркой под слоем флюса, находятся на высоком уровне вплоть до температуры –40°С. Ударная вязкость металла швов, сваренных лазерной и дуговой сваркой под слоем флюса, по средним значениям составляет:  $KCV^{-20} = 96\text{--}163 \text{ Дж/см}^2$ ,  $KCV^{-40} = 71\text{--}132 \text{ Дж/см}^2$  – шов лазерно-дуговой сварки;  $KCV^{-20} = 69\text{--}105 \text{ Дж/см}^2$ ,  $KCV^{-40} = 44\text{--}81 \text{ Дж/см}^2$  – шов под слоем флюса.

Металлографические исследования сварных соединений, выполненных комбинированной лазерно-дуговой сваркой, проводили на поперечных макрошлифах. Исследования показали, что в сварном шве, полученном двухлучевой лазерной сваркой, присутствуют два типа структур. Первый тип: характерно наличие двух кристаллизационных зон – зоны крупных столбчатых кристаллитов, расположенных по периметру шва, и кристаллитов, растущих в направлении отвода тепла от сварочной ванны, и зоны тонких столбчатых кристаллитов. Ширина этих зон изменяется в зависимости от температуры металла сварочной ванны, интенсивности и направления теплоотвода. Второй тип: зона крупных и тонких столбчатых кристаллитов посередине, имеющих разориентированное строение. Эта область ограничена поверхностями срастания с ней ведущих граней кристаллитов, развивающихся от линии сплавления к оси кристаллизации шва.

Микроструктура швов, выполненных способом двухлучевой лазерной сварки, имеет сходное строение и представляет собой мартенситно-бейнитную смесь, имеющую грубоигольчатое строение. В сварном шве

мартенсит в основном встречается в виде одной морфологической разновидности – «речного» мартенсита. Кристаллы речного мартенсита имеют вид реек, вытянутых в одном кристаллографическом направлении. Рейки чаще всего объединены в пакеты. В одном зерне может быть несколько пакетов. В пределах разрешения оптического микроскопа наблюдаются лишь отдельные пакеты. Твердость металла швов, выполненных лазерной сваркой, по средним значениям находится в пределах 327–366 HV<sub>10</sub>. Максимальные значения твердости достигают 390 HV<sub>10</sub>, что значительно превышает максимально допустимую величину твердости (не более 260 HV<sub>10</sub>), установленную Сводом Правил СП 34-101-98 «Выбор труб для магистральных нефтепроводов при строительстве и капитальном ремонте». Появление закалочных структур связано с тем, что скорость охлаждения сварочной ванны из-за большой толщины пластин гораздо выше, чем при сварке пластин 8 мм и достигают критических величин.

Однако под действием тепла, выделяющегося при выполнении сварного шва автоматической сваркой под слоем флюса, происходит измельчение структуры металла шва и ЗТВ сварного соединения, полученного лазерной сваркой. Такое повторное термическое воздействие идентично процессу нормализации. Структура приобретает более тонкое строение, чем в исходном литом состоянии, что положительно сказывается на твердости и механических свойствах металла лазерного шва. В рассматриваемой микроструктуре швов отсутствует единая столбчатая структура.

В околошовной зоне шва, выполненного лазерной сваркой, участок крупного зерна полностью отсутствует и наблюдается мелкозернистая структура. После сварки под слоем флюса максимальные значения твердости на участке перегрева лазерного шва не превышают 230 HV<sub>10</sub>, твердость уменьшается по мере удаления от шва к основному металлу до 209–229 HV<sub>10</sub>.

Структура сварных швов состоит, главным образом, из феррита и небольшого количества тонкодисперсных участков перлита (224–232 HV<sub>10</sub>). Вытянутые вдоль осей столбчатых кристаллитов ферритные зерна в достаточной степени фрагментированы.

В результате повторного нагрева металла шва и ЗТВ сварного соединения, полученного лазерной сваркой, при выполнении автоматической сварки под слоем флюса произошло снижение их твердости до уровня значений твердости сварного соединения, выполненного под слоем флюса (в пределах 224–230 HV<sub>10</sub>). Выравнивание твердости металла двухстороннего сварного соединения является одним из критериев равнопрочности сварного соединения в целом.

## **Глава 5. Экономическая эффективность двухлучевой лазерной сварки в трубном производстве.**

Принято считать, что лазерная сварка – процесс дорогостоящий и не подходит для многих сварочных производств. В первую очередь из-за дороговизны оборудования и низкого значения КПД лазеров. Однако благодаря высокой концентрации энергии и образованию «кинжального» проплавления лазерная сварка обладает рядом отличительных характеристик, которые обеспечивают экономический эффект. В этой главе проводится сравнение стоимости одного погонного метра продольного шва трубы,

полученного дуговой сваркой под флюсом (традиционная сварка, используемая при производстве труб), и лазерной. Подсчитываются расходы, которые относятся непосредственно к затратам на технологический процесс, определяющим основную долю расходов на сварку одного погонного метра.

Проведённые расчёты показали, что расходы на дуговую сварку под флюсом и лазерную сварку трубной стали толщиной 10 мм сопоставимы, причём лазерная сварка обходится даже немного дешевле.

Расчёт, проведённый Волжским трубным заводом, показал, что срок окупаемости оборудования составляет 0,6 лет.

### **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Экспериментальные и теоретические исследования в лабораторных условиях позволили разработать и обосновать новый способ получения сварных соединений конструкционных низколегированных трубных сталей ДЛЛС.
2. Выполненное математическое моделирование тепловых и плазменных процессов, а также экспериментальное исследование режимов ДЛЛС позволили: установить, что при ДЛЛС по сравнению с однолучевой ЛС снижается плотность приповерхностной плазмы, экранирующей подводимое лазерное излучение, благодаря чему КПД процесса на 30% выше, чем при однолучевой ЛС той же мощности; найти оптимальные значения для расстояний между пятнами фокусировки и для углов падения двух лазерных лучей; установить, что при ДЛЛС резко снижается расход присадочной проволоки.
3. Выполненные исследования микро- и макроструктуры сварных швов, полученных ДЛЛС, ударной вязкости, твердости металла швов, гидравлические испытания сварных соединений показали, что механическая прочность сварных соединений находится на уровне основного металла. Показано, что при ДЛЛС достигаются более высокие значения механической прочности по сравнению с однолучевой ЛС и дуговой сваркой. Повышается ударная вязкость, снижается твердость, повышается прочность сварного соединения вплоть до температур ниже – 40°C. Это должно увеличить срок эксплуатации газонефтепроводных труб и повысить экономические и экологические показатели технологии процесса сварки и технологии эксплуатации труб.
4. Технологию ДЛЛС можно рекомендовать как перспективное направление трубосварочного производства.

### **Список опубликованных работ**

1. Григорьянц А.Г., Грезев А.Н., Грезев Н.В. Технология двухлучевой лазерной сварки и ее применение в промышленности // Технология машиностроения. 2005. № 10. С. 28-31.
2. Григорьянц А.Г., Грезев А.Н., Грезев Н.В. Разработка технологии лазерной сварки сталей, используемых в трубной металлургии // Технология машиностроения. 2005. № 10. С. 32-37.
3. Разработка технологии двухлучевой лазерной сварки и натурные испытания газонефтепроводных труб / А.Г. Григорьянц [и др.] // Сварочное производство. 2006. № 5. С. 33-37.
4. Эффективность процесса двухлучевой лазерной сварки / А.Г. Григорьянц [и др.] // Сварочное производство. 2009. № 8. С. 20-27.