

М 379452

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
С С С Р

Московское  
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового  
Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

---

На правах рукописи

ГРЕЗЕВ Анатолий Николаевич

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ  
СВОЙСТВ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УЗЛОВ АВТОМОБИЛЕЙ

З И Л

(05.04.05 - Технология и машины сварочного производства)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

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 ФРОЛОВ В.В.

к.т.н., с.н.с. ЛОПАТКО А.П.

Ведущее предприятие - НИИТАВТОПром.

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1981 г. на заседании специализированного Совета К053.15.03 по технологии и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Училища.

Автореферат разослан "9" января 1981 г.

ученный секретарь

спе

ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

20 объем I п.л.

МЗ79452

НТБ МТУ им. Н.Э.Баумана



1379452

Грезев А.Н. Разработка техн

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работ. Значительный уровень энергии излучения (до 30 кВт), достигаемый в современных технологических лазерных установках, в сочетании с высокой плотностью мощности в пятне нагрева ( $10^8$ – $10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>) дают возможность вне вакуума получать швы с кинжальной формой проплавления и малой по ширине зоной термического влияния. Вследствие этого ожидаемые деформации сварной конструкции должны быть минимальными, что обуславливает успешное применение лазерной сварки в машиностроении и использование ее в качестве заключительной операции для сварки сталей и сплавов без последующей термической и механической обработки сварных конструкций.

Особенно широки возможности использования существующих лазерных установок мощностью излучения до 5 кВт в автомобилестроении, где не удастся при действующих технологиях сварки обеспечить требуемую точность изготовления некоторых сварных узлов, что снижает их долговечность при эксплуатации и срок безаварийной работы автомобиля в целом.

Однако отмеченные преимущества лазерной сварки практически невозможно реализовать без решения вопросов технологии, связанных с получением качественных сварных соединений. Оптимизация присущих лазеру сварочных параметров: мощности излучения, положения фокуса относительно поверхности изделия, защитной среды в области шва и традиционного – скорости сварки, позволяет обеспечить качественное формирование шва при наибольшей, для данного уровня мощности, глубине проплавления.

Оценка остаточных деформаций и напряжений в сварном соединении при лазерной сварке позволяет определить, во сколько раз эти величины меньше, чем при дуговых способах сварки и насколько реальны предпосылки использования лазеров для получения сварных соединений узлов и деталей машиностроения с низким уровнем деформации. Кинжальная форма проплавления металла шва на высоких скоростях в сравнении с другими способами сварки обеспечивает исключительно интенсивное охлаждение металла сварного соединения в области температур кристаллизации металла и в зонах распада аустенита. В связи с этим ставится задача изучения свойств сварных соединений при лазерной сварке: технологической прочности, механических свойств, деформации и напряжений. Решение этой задачи позволит использовать лазеры в машиностроении для сварки реальных узлов и деталей машин.

Цель работы состоит в получении лазерных сварных соединений узлов автомобилей ЗИЛ с минимальными остаточными деформациями, обладающих высокими эксплуатационными свойствами.

Методы исследования. Остаточные деформации и напряжения оп-



ределялись механическим методом, основанным на разрезке образцов после сварки и замеры нанесенных баз до сварки, а также после сварки и разрезки. Оценка сопротивляемости сварных соединений образованию горячих трещин осуществлялась с помощью количественного метода ЛТП1 и специально изготовленной установки ЛТП1-II. Влияние способа и режимов сварки на стойкость сварных соединений против образования горячих трещин изучалось на жесткой круговой пробе. Сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин оценивалась количественным методом ЛТП2 с использованием установки ЛТП2-5. Оценка механических свойств проводилась по ГОСТ 6996-66.

Лазерная сварка выполнялась на установке ЛТИ-2 мощностью излучения до 5 кВт, электроннолучевая сварка - на установке ВЕ-691 "Sciaky" и аргодуговая сварка - на аппарате АДСВ-2.

Научная новизна. 1. При лазерной сварке деформационная способность металла шва в температурном интервале хрупкости практически не зависит от скорости сварки, тогда как при аргодуговой этот показатель существенно понижается с увеличением  $V_{св}$ . Это объясняется высокой дисперсностью первичной структуры и неизменной схемой кристаллизации металла шва при лазерной сварке, тогда как при аргодуговой сварке происходит переход от плоской схемы кристаллизации металла шва к линейной с крупной первичной структурой и, следовательно, пониженной сопротивляемостью шва образованию горячих трещин.

2. На оптимальных режимах лазерной сварки легированных сталей 12Х2Н4А, 18ХТТ достигается увеличение показателя сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин, а на углеродистой стали Ст.35 - уменьшение в сопоставлении с дуговой сваркой. Высокая сопротивляемость сварных соединений перлитных сталей 12Х2Н4А и 18ХТТ образованию холодных трещин обуславливается измельчением элементов структуры при высоких скоростях охлаждения и процессом сдерживания роста зерна легирующими элементами, входящими в состав указанных сталей. В стали Ст.35 повышенное содержание углерода и низкое содержание легирующих элементов не способствуют измельчению структуры, а высокие скорости охлаждения сварного соединения создают условия образования структуры крупноиглочатого мартенсита, характеризующегося значительной тетрагональностью и низкой пластичностью, что снижает сопротивляемость образованию холодных трещин.

Практическая ценность. 1. Отработаны принципиальные вопросы технологии лазерной сварки, т.е. определены режимы сварки (мощности излучения, скорости сварки, положения фокуса относительно поверхности изделия и т.д.), разработан способ сварки с присадоч-

ним металлом, найдены оптимальные сборочные зазоры между свариваемыми кройками.

2. Установлено, что выполнение лазерной сварки на скоростях, превышающих на порядок скорости дуговых способов сварки, рационально как с позиций производительности сварки, так и технологической прочности и показателей механических свойств.

3. Исследования позволили в кратчайший срок отработать технологию лазерной сварки шестерни и карданного вала автомобилей ЗИЛ. Сварные узлы обладают низкими остаточными деформациями и повышенными эксплуатационными свойствами. Это увеличивает срок службы узлов в 1,5-5 раз в сопоставлении с действующими технологиями.

Экономический эффект от внедрения лазерной сварки одного типа карданного вала с годовой программой 50 тыс.шт. составит 25 тыс. рублей. Результаты работы могут быть использованы на других предприятиях автомобильной промышленности.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы доложены на научно-технической конференции в г. Перми (1979 г.), на юбилейной У Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции, посвященной 150-летию МВТУ им.Н.Э.Баумана (1980 г.), на секции президиума НТО ЗИЛА (1980 г.), а также на научном семинаре сварщиков г. Москвы (МВТУ им.Н.Э.Баумана, июнь, 1980 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов по работе и приложения. Выполнена на 134 страницах машинописного текста, содержит 123 рисунка, 4 таблицы и 119 наименований используемых литературных источников. Глава I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Технологические лазерные установки прошли путь развития от твердотельных лазеров, работающих в импульсном режиме, на средней мощности излучения до 200 Вт и к.п.д. не более 1-3%, до мощных (до 30 кВт) лазеров на углекислом газе с непрерывной генерацией излучения и к.п.д., превышающим 15%. Фокусировка луча  $\text{CO}_2$  лазера обеспечивает плотность мощности в фокальном пятне  $10^8 - 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>. Излучение такой интенсивности, направленное даже на тугоплавкие металлы (молибден, тантал и другие) доводит их за миллисекунды до расплавления и испарения. Непрерывная сварка лазерным лучом такой интенсивности приводит к образованию шва с кинжальной формой проплавления. Размеры сварочной ванны можно с большой точностью регулировать, изменяя параметры лазерного излучения. Для каждого значения мощности луча лазера существует оптимальная величина заглубления фокального пятна в металл, при которой шов имеет максимальную глубину и минимальную ширину проплавления. Так, при сварке стальной лучом мощностью 5 кВт оптимальное заглубление фокального пят-

на составляет  $(0,5 \pm 1) \cdot 10^{-3}$  м. При этом установлено, что на мощности 4,5 кВт с увеличением скорости сварки глубина проплавления уменьшается и в диапазоне скоростей  $(1,4 \pm 5,5) \cdot 10^{-2}$  м/с она составляет  $(7 \pm 4) \cdot 10^{-3}$  м при защите шва гелием и  $(6 \pm 3) \cdot 10^{-3}$  м при защите шва углекислым газом.

Отдельные примеры промышленного использования лазеров для сварки показывают, что основные области их применения связаны с уникальной технологией, где другие способы сварки не приемлемы по каким-либо характеристикам. В частности, по существующей технологии изготовления карданных валов и шестерни автомобилей ЗИЛ процесс сварки является заключительной операцией. При дуговой сварке в  $\text{CO}_2$  деформация проушин вилки карданного вала составляет  $(0,07 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$  м (допустимый  $0,01 \cdot 10^{-3}$  м) и, как следствие, срок эксплуатации такой карданной передачи определяется пробегом автомобиля в  $(70 \pm 100) \cdot 10^6$  м. Меньшее тепловложение при сварке трением позволило снизить остаточные деформации вилки до  $(0,02 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$  м и увеличить эксплуатацию карданного вала до пробега автомобиля  $(250 \pm 300) \cdot 10^6$  м. Предполагается, что при лазерной сварке уменьшение тепловложения в карданный вал позволит снизить деформации проушин вилки до  $0,01 \cdot 10^{-3}$  м и увеличить срок эксплуатации карданного вала до  $500 \cdot 10^6$  м, что будет соответствовать в целом безаварийному пробегу автомобиля.

Существующая технология дуговой сварки шестерни аустенитными электрозаклепками обеспечивает требуемую прочность, но уровень остаточных деформаций превышает допустимые значения. Ожидается, что лазерная сварка шестерни позволит обеспечить как её прочность, так и точность размеров.

Карданный вал и шестерня в процессе эксплуатации подвергаются сложной знакопеременной нагрузке. В связи с этим заводом разработан комплекс статических и циклических испытаний сварных соединений, после проведения которых дается заключение о возможности серийного выпуска узла по предлагаемой технологии.

Высокие градиенты температур при лазерной сварке приводят к повышенным скоростям охлаждения металла шва на этапе его кристаллизации и  $\beta \rightarrow \alpha$  превращений. Это может оказать влияние на сопротивляемость сварных соединений образованию горячих и холодных трещин, на показатели пластических свойств и, как следствие, привести к понижению усталостной прочности сварного узла.

Таким образом, необходим комплекс исследований для определения оптимальных режимов лазерной сварки, обеспечивающий сочетание высокой технологической и конструктивной прочности при невысо-

ком уровне остаточных деформаций.

Необходимость исследований технологической прочности и механических свойств сварных соединений при лазерной сварке вызвана применением для изготовления шестерни перлитных сталей 12Х2Н4А, 18ХГТ, а для изготовления карданного вала - стали Ст.35, склонных к образованию транскристаллитных и закалочных структур. Ценность этих исследований и полнота объяснения полученных экспериментальных результатов еще в большей степени увеличатся при сопоставлении лазерной сварки с электроннолучевой и аргонодуговой сваркой.

В связи с изложенным в задачи работы входило:

1. Отработка технологии лазерной сварки карданного вала и шестерни автомобилей ЗИЛ.
2. Оценка свойств сварных соединений и их работоспособности.

## Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

Результаты распределения продольных остаточных деформаций  $\epsilon_x$  в поперечном направлении показывают, что уровень максимальных деформаций при аргонодуговой сварке в 2,5-3 раза больше, чем при лазерной. Это, в первую очередь, объясняется тем, что лазерную сварку при той же эффективной мощности можно осуществить на скоростях в 2-3 раза больших, чем аргонодуговую сварку. Соответственно в 2-3 раза снижается погонная энергия, но в силу большей ее концентрации при этом также осуществляется полное проплавление образца.

Поперечная усадка по длине шва при лазерной сварке распределяется более равномерно и составляет величину в 5-6 раз меньшую, чем при аргонодуговой сварке. Продольные остаточные пластические деформации  $\epsilon_x$  при лазерной сварке сконцентрированы в более узкой зоне, чем при аргонодуговой сварке. Это приводит к уменьшению ширины зоны растягивающих напряжений  $\epsilon_x$ , вследствие чего напряжения сжатия оказываются значительно ниже. Это обстоятельство в большинстве случаев позволяет избежать потери устойчивости тонколистовых сварных элементов.

Результаты измерений деформаций проушин вилки карданного вала показали, что на скорости лазерной сварки  $1,4 \cdot 10^{-2}$  м/с их максимальная величина соответствует  $0,01 \cdot 10^{-3}$  м. На более высоких скоростях сварки  $2,2 \cdot 10^{-2}$  и  $3,3 \cdot 10^{-2}$  м/с деформации проушин, замеренные на 30 вилках, полностью отсутствовали. Низкий уровень остаточных деформаций при лазерной сварке шестерни отмечен на скоростях  $2,2 \cdot 10^{-2}$  и  $2,8 \cdot 10^{-2}$  м/с.

### Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЮ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

В литературе практически отсутствуют сведения по вопросам технологической прочности сварных соединений при лазерной сварке. Исследования по горячим трещинам, проведенные при дуговых способах сварки, ограничены применяемыми скоростями сварки и не позволяют даже приблизительно оценить технологическую прочность при лазерной сварке. Из работ В.И.Дятлова, Б.Ф.Якушина и др. известно, что при дуговой сварке увеличение скорости, как правило, приводит к резкому понижению сопротивляемости сварных соединений образованию горячих трещин. В связи с этим определение технологической прочности в температурном интервале хрупкости (ТИХ) при лазерной сварке является важной задачей исследования.

Для определения сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин согласно работам Н.Н.Прохорова, Б.Ф.Якушина использовали критический темп деформации, т.е. отношение  $\frac{V_{кр}}{\dot{\epsilon}_{ТИХ}} = L_{кр}$ . Для перехода к критическому темпу деформации измеряли, кроме критической скорости изгиба образца  $V_{кр}$ , значение скорости охлаждения металла шва в ТИХ -  $\dot{\epsilon}_{ТИХ}$  (рис. 1).

Из результатов, приведенных на рис. 2, следует, что во всех случаях по мере увеличения скорости дуговой сварки показатель сопротивляемости горячим трещинам резко падает. Наиболее высокие его значения были получены при сварке со скоростью  $0,166 \cdot 10^{-2}$  м/с. На скоростях сварки выше  $1,1 \cdot 10^{-2}$  м/с выполнение дуговой сварки затруднено вследствие неустойчивости процесса, пор, горячих трещин и т.п. Лазерной сваркой выполнялись соединения на скоростях от  $1,1 \cdot 10^{-2}$  до  $3,33 \cdot 10^{-2}$  м/с, при этом сопротивляемость образованию горячих трещин на скорости  $1,1 \cdot 10^{-2}$  м/с несколько выше, чем при аргонодуговой сварке. Дальнейшее увеличение скорости лазерной сварки почти не снижает сопротивляемость металла шва образованию горячих трещин.

Стойкость сварных соединений из сталей 12Х2Н4А и Ст.35 против образования горячих трещин, определяемая на круговой пробе по длине трещины (рис. 3), при лазерной сварке выше, чем при аргонодуговой, причем с увеличением скорости лазерной сварки стойкость повышается.

Высокая сопротивляемость металла шва образованию горячих трещин, а также малая чувствительность сопротивляемости к изменению скорости лазерной сварки объясняются характером формирования структуры, т.е. схемой и типом кристаллизации металла шва.

При аргонодуговой сварке сталей 12Х2Н4А и Ст.35 наблюдается плоская схема кристаллизации металла шва. При лазерной сварке

схема кристаллизации ближе соответствует линейной. Однако при лазерной сварке, как и при аргонодуговой, на скорости  $1,1 \cdot 10^{-2}$  м/с наблюдается ячеисто-дендритная структура, дисперсность которой в 2,5-3 раза выше, что обуславливает более высокие пластические свойства металла шва, т.е. более высокую его сопротивляемость образованию горячих трещин. Дальнейшее увеличение скорости лазерной сварки до  $3,3 \cdot 10^{-2}$  м/с несколько снижает фрагментацию поверхности кристаллитов, однако при этом дисперсность структуры увеличивается в 2+2,5 раза, что препятствует ощутимому понижению ее пластичности, а следовательно, и понижению сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин.

Измельчение первичной структуры металла шва с увеличением скорости лазерной сварки явилось одной из причин повышения стойкости сварных соединений против образования горячих трещин.

#### Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

Холодные трещины - наиболее распространенный дефект, образующийся при сварке, когда металл одной из зон сварного соединения претерпевает полную или частичную закалку. При лазерной сварке скорости охлаждения шва и околошовной зоны в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита наиниже выше, чем при дуговых способах сварки (рис. 1). Однако, как показывают проведенные исследования, при лазерной сварке сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин на закаливающихся сталях 12Х2Н4А, 18ХГТ и Ст.35 оказалась неодинаковой (рис. 4). Так, при лазерной сварке на легированных сталях 12Х2Н4А и 18ХГТ при условии максимально возможного нагружения по методике ЛТП2-5 в течение 20 ч холодных трещин в сварном соединении не наблюдается. На стали Ст.35 и ее сочетании со сталью Ст.10 лазерная сварка приводит к образованию холодных трещин.

Разная сопротивляемость легированных сталей перлитного класса 12Х2Н4А, 18ХГТ и углеродистой стали Ст.35 образованию холодных трещин при сопоставляемых способах сварки является следствием различия структур сварных соединений в процессе образования аустенитных зерен и  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения.

При аргонодуговой сварке стали 12Х2Н4А на скорости  $0,56 \cdot 10^{-2}$  м/с размер аустенитных зерен составляет: в шве -  $120 \cdot 10^{-6}$  м, в околошовной зоне  $80 \cdot 10^{-6}$  м. При лазерной сварке на скорости  $2,2 \cdot 10^{-2}$  м/с размер аустенитных зерен этой же стали составляет в шве -  $79 \cdot 10^{-6}$  м, в околошовной зоне -  $52 \cdot 10^{-6}$  м. Дальнейшее повышение скорости лазерной сварки приводит к еще более заметно-

му измельчению аустенитного зерна. Так, при сварке со скоростью  $5,5 \cdot 10^{-2}$  м/с размер аустенитных зерен составляет: в шве  $28 \cdot 10^{-6}$  м, в околошовной зоне  $22 \cdot 10^{-6}$  м.

Металлографическое исследование стали Ст.35 показало, что при лазерной сварке со скоростью  $2,2 \cdot 10^{-2}$  м/с и  $3,3 \cdot 10^{-2}$  м/с не происходит заметного измельчения аустенитных зерен в шве в сравнении с аргонодуговой сваркой. Отсутствие измельчения аустенитной структуры при сварке стали Ст.35, согласно работам Г.В.Курдюмова, Л.С.Лившица и др., объясняется высоким содержанием углерода, способствующим росту зерна, и отсутствием легирующих элементов, которые бы, наоборот, сдерживали его рост.

Резкое ужесточение термического цикла при лазерной сварке в сравнении с аргонодуговой оказывает разное влияние на  $j$ - $2$  превращение в сталях 12Х2Н4А и Ст.35, а следовательно, на изменения структуры и микротвердости металла.

Сталь 12Х2Н4А имеет мартенситно-бейнитную структуру в шве и околошовной зоне при термических циклах аргонодуговой сварки, с преобладанием мартенситной составляющей. Переход на лазерную сварку приводит к образованию в шве и околошовной зоне мартенситной структуры, но более мелкой; особенно высока дисперсность на скорости  $5,5 \cdot 10^{-2}$  м/с.

Иное влияние оказывает высокая жесткость термического цикла лазерной сварки на структуру металла шва и околошовной зоны стали Ст.35. В условиях аргонодуговой сварки наблюдается перлитная структура как в шве, так и в околошовной зоне. Переход на лазерную сварку со скоростью  $2,2 \cdot 10^{-2}$  м/с изменяет структуру металла в шве и околошовной зоне: структура становится мартенситной, характерной для углеродистой стали. Повышение скорости сварки до  $3,3 \cdot 10^{-2}$  м/с не вызывает заметного измельчения мартенситной структуры.

Полученный структурный анализ подтверждается результатами замера микротвердости и термокинетическими диаграммами.

Замер распределения микротвердости  $H_{150}$  поперек оси шва стали 12Х2Н4А показал, что при аргонодуговой сварке средняя микротвердость в шве и околошовной зоне составляет  $450 H_{150}$ . Разброс микротвердости, свидетельствующий о неоднородности структуры, достаточно высок и колеблется от 380 до  $520 H_{150}$ . При лазерной и электроннолучевой сварке микротвердость в шве повышается до  $500 H_{150}$ .

При аргонодуговой сварке стали Ст.35 средняя микротвердость металла шва и околошовной зоны составляет  $325 H_{150}$ , что свидетельствует о перлитном характере структуры этих зон и подтвержда-

ет структурный анализ. Микротвердость металла шва и околошовной зоны при лазерной и электроннолучевой сварке значительно выше, чем при аргонодуговой, и достигает 600-750 *Нм*. Такую микротвердость имеет структура мартенсита, что также подтверждается структурным анализом.

Таким образом, при лазерной и электроннолучевой сварке стали I2X2H4A микротвердость шва и околошовной зоны несущественно отличается от микротвердости этих зон при аргонодуговой сварке. Однако образующиеся при всех способах сварки закалочные структуры обладают при лучевых способах сварки повышенной дисперсностью, а следовательно, и высокой пластичностью. Лазерная и электроннолучевая сварка стали Ст.35 обеспечивают в шве и околошовной зоне структуру крупноигльчатого мартенсита с высокой микротвердостью, что резко снижает пластичность этих зон по сравнению с аргонодуговой сваркой.

#### Глава 5. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ

В главе рассматриваются результаты исследования механических свойств сварных соединений, которые являются неотъемлемой частью вновь обрабатываемой технологии сварки и позволяют не только определить служебные характеристики сварных соединений, но и найти пути эффективного их регулирования.

При испытании сварных соединений на статическое растяжение определяется временное сопротивление наиболее слабого участка. Разрушение образцов из термоупрочненных сталей I2X2H4A и I8XIT при всех сравняемых способах сварки происходило по зоне разупрочнения, а сварные соединения, выполненные из Ст.35, оказались равнопрочными основному металлу и разрушались вне зоны термического влияния. Следует отметить, что образцы из стали I2X2H4A, сваренные электронным и лазерным лучами, также оказались равнопрочными основному металлу. Полученные результаты показали, что высокая прочность сварных соединений, выполненных лучевыми способами сварки из термоупрочненных сталей, объясняется несколькими причинами, в том числе, согласно работам О.А.Бакши, Р.З.Шрона и др., эффектом так называемого контактного упрочнения "мягкой прослойки", что было подтверждено экспериментально.

При испытании на ударный изгиб определялась ударная вязкость металла шва и различных участков зоны термического влияния.

При аргонодуговой сварке стали I2X2H4A ударная вязкость шва, линии сплавления и зоны закалки оказалась ниже *А<sub>н</sub>* основного металла. Лучевые способы сварки этой же стали при более жестком термическом цикле обеспечивают достаточно высокую ударную вязкость тех же участков сварного соединения, превышающую этот показатель

для основного металла.

Полученные результаты по ударной вязкости косвенно совпадают с данными работ М.Бенеса, И.Слупа и др. и могут быть объяснены тем, что повышение ударной вязкости металла шва и, в конечном счете, улучшение механической прочности сварных соединений, выполненных лучевыми способами сварки, обусловлено процессом металлургической очистки и дегазации переплавленного металла, которые протекают вне зависимости от природы высококонцентрированного источника тепла. Кроме того, в данной главе показано, что при лазерной сварке повышение ударной вязкости металла шва по сравнению с  $A_n$  основного металла связано с получением более мелкодисперсной структуры переплавленного металла.

При лучевых способах сварки сталей 18ХГТ и Ст.35 в сопоставлении с основным металлом наблюдается понижение ударной вязкости металла шва и околошовной зоны. Низкое значение  $A_n$  металла шва Ст.35 при лазерной сварке явилось следствием резкого повышения его микротвердости, характерной для структуры грубого игольчатого мартенсита с низкими пластическими свойствами. Для повышения показателя  $A_n$  шва рекомендован способ лазерной сварки с присадочным металлом, например, с использованием сварочной проволоки СВО8ГС. Выводы по ударной вязкости сварных соединений из сталей 12Х2Н4А и Ст.35 хорошо коррелируют с результатами испытаний шва и различных зон термического влияния на статический изгиб.

В главе представлены результаты оценки пластических свойств сварных соединений – угла загиба, относительного удлинения и сужения образца при статическом растяжении. В частности, показано, что угол загиба сварных соединений из стали Ст.35 при лазерной и электроннолучевой сварке равен  $\alpha$  основного металла.

Представлены результаты испытания при циклических нагрузках, которые проводились при сопоставлении усталостной прочности сварных соединений, выполненных лазерной сваркой, с этим же показателем основного металла.

При всех приложенных напряжениях сварные соединения показали усталостную прочность, равную прочности основного металла.

## Глава 6. ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ УЗЛОВ АВТОМОБИЛЕЙ

### З И Л

В главе показано, что лазерная сварка может успешно выполняться с защитой шва гелием, а также углекислым газом. Однако с защитой шва  $CO_2$  для повышения качества сварных соединений лазерная сварка должна выполняться с раскислением сварочной ванны присадочной проволокой типа СВО8Г2С, содержащей элементы-раскислители (Si, Mn, Ti, Al и т.д.).

Рассмотрены типы сопел для защиты шва при сварке. Высокие показатели по качеству защиты шва имеет сопло с козырьком, позволяющее защищать шов до полного его охлаждения при расходе газа, не превышающем нормы расхода при дуговых способах сварки.

На формирование шва при лазерной сварке оказывает влияние и способ введения присадочного металла в сварочную ванну. Было показано, что наилучшие результаты по формированию шва достигаются подачей присадочной проволоки непосредственно в сварочную ванну в фокальном пятне лазерного луча. Реализация этого способа сварки осуществлена при помощи специально разработанного сопла.

Показано, что при лазерной сварке зазор между свариваемыми кромками не должен превышать  $0,3 \cdot 10^{-3}$  м, а при лазерной сварке с присадочным металлом появляется возможность осуществлять процесс с зазором до  $(0,4 \div 0,5) \cdot 10^{-3}$  м и получать швы с регулируемым усилением.

Установлено, что отклонение луча лазера от оси стыка не должно превышать  $0,3 \cdot 10^{-3}$  м.

В главе обоснован выбор типов соединений, лазерная сварка которых обеспечивает статическую и усталостную прочность.

Дано описание способов управления мощностью излучения лазера с целью обеспечения качественного формирования шва на различных участках, включая начало и зону перекрытия с заваркой кратера.

Приводится анализ результатов исследований на технологическую прочность, механические свойства сталей 12Х2Н4А и 18ХТТ, которые идут на изготовление шестерни. Показано, что лазерная сварка шестерни на скоростях  $\geq 2,2 \cdot 10^{-2}$  м/с обеспечивает высокую технологическую прочность и механические свойства, а также низкие остаточные деформации.

Окончательная оптимизация режима лазерной сварки шестерни проводилась на натурных образцах с испытанием их после сварки на скручивание. Установлено, что в процессе нагружения при крутящем моменте 360 Н.м происходит разрушение шестерни по основному металлу. Поскольку максимальный крутящий момент, передаваемый муфтой свободного хода коробки передач, равен 120 Н.м, то обеспечивается трехкратный запас прочности сварного соединения при статическом нагружении. Производству рекомендован оптимальный режим сварки шестерни: скорость  $3,3 \cdot 10^{-2}$  м/с (время сварки 8 с), мощность излучения 4,5 кВт, расход газа  $\text{CO}_2$   $78 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с.

Результаты исследований лазерных сварных соединений из сталей Ст.35, Ст.10, которые используются при изготовлении карданных валов, показали, что с точки зрения технологической прочности выполнение сварки на скоростях менее  $1,4 \cdot 10^{-2}$  м/с не желатель-

но из-за опасности появления горячих трещин, а на скоростях более  $3,3 \cdot 10^{-2}$  м/с – образования холодных трещин. Испытания карданных валов, выполненных лазерной сваркой без присадочного металла и на скоростях  $1,4 \cdot 10^{-2}$  и  $2,2 \cdot 10^{-2}$  м/с, показали низкие значения усталостной прочности (рис. 5).

Оптимизация проплавления, повышение скорости сварки до  $2,8 \cdot 10^{-2}$  м/с и добавление в шов присадочного металла СВО8ГС или СВО8Г2С позволили повысить усталостную прочность до уровня, не уступающего показателю прочности карданных валов, полученных дуговой сваркой и сваркой трением. Причем остаточные деформации проушин вилки при лазерной сварке на скорости  $2,8 \cdot 10^{-2}$  м/с практически полностью отсутствуют. Это позволяет увеличить срок службы карданных валов в 1,5–5 раз в сопоставлении с действующими технологиями. Лазерная сварка карданных валов внедрена в филиале Производственного объединения ЗИЛ – Московском заводе карданных валов.

## ВЫВОДЫ

1. Эффективное применение лазеров мощностью излучения до 5 кВт в технологии сварки достигается на скоростях выше  $1,4 \cdot 10^{-2}$  м/с, при заглублении фокуса под поверхность свариваемого изделия на глубину  $(0,5-2) \cdot 10^{-3}$  м.

2. При лазерной и электроннолучевой сварке продольная усадка в 2,5–3, а поперечная в 5–6 раз меньше, чем при аргонодуговой сварке, что объясняется высокой концентрацией энергии лазерного и электронного луча, приводящей к уменьшению объема металла, вовлекаемого в пластическую деформацию.

3. При лазерной сварке, как и при электроннолучевой и аргонодуговой сварке, продольные остаточные напряжения  $\sigma_x$  имеют одинаковые максимальные значения в шве, ориентировочно равные пределу текучести материала при комнатной температуре  $\sigma_T$ . Однако при лазерной сварке, как и при электроннолучевой, ширина зоны продольных пластических деформаций и растягивающих напряжений меньше, чем при аргонодуговой сварке. Это снижает продольные сжимающие остаточные напряжения, что в большинстве случаев позволяет избежать деформации потери устойчивости тонколистовых свариваемых элементов.

4. При лазерной сварке деформационная способность металла шва в температурном интервале хрупкости практически не зависит от скорости сварки, тогда как при аргонодуговой этот показатель существенно понижается с увеличением  $V_{св}$ . Это объясняется высокой дисперсностью первичной структуры и неизменной схемой кристаллиза-

ции металла шва при лазерной сварке, тогда как при аргонодуговой сварке происходит переход от плоской схемы кристаллизации металла шва к линейной с крупной первичной структурой и, следовательно, пониженной сопротивляемостью шва образованию горячих трещин.

5. На оптимальных режимах лазерной сварки легированных сталей 12Х2Н4А, 18ХГТ достигается более высокая сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин, а на углеродистой стали Ст.35 – более низкая по сравнению с аргонодуговой сваркой. Высокая сопротивляемость сварных соединений перлитных сталей 12Х2Н4А и 18ХГТ образованию холодных трещин объясняется измельчением элементов структуры при высоких скоростях охлаждения и процессом сдерживания роста зерна легирующими элементами, входящими в состав указанных сталей. В стали Ст.35 повышенное содержание углерода и низкое содержание легирующих элементов не способствуют измельчению структуры, а высокие скорости охлаждения сварного соединения создают условия образования структур крупноиглочатого мартенсита, характеризующегося значительной тетрагональностью и низкой пластичностью, что снижает сопротивляемость образованию холодных трещин.

6. Сварные соединения из термоупрочненных сталей 12Х2Н4А, 18ХГТ и углеродистой стали Ст.35, выполненные лазерной сваркой, равнопрочны основному металлу. Высокая прочность сварных соединений из термоупрочненных сталей при лазерной сварке объясняется эффектом контактного упрочнения мягкой прослойки.

7. Ударная вязкость шва и зоны закалки сварных соединений из стали 12Х2Н4А при лазерной сварке выше в сопоставлении с аргонодуговой сваркой и основным металлом. Сварные соединения из стали Ст.35 при лазерной сварке имеют низкий показатель ударной вязкости, что объясняется повышенным содержанием углерода, приводящего к переходу от измельченной структуры с повышенной пластичностью у стали 12Х2Н4А к структуре с грубым иглочатым мартенситом, характеризующимся пониженной пластичностью.

8. Осуществлена отработка технологии лазерной сварки карданного вала и шестерни коробки передач автомобилей ЗИЛ. Сварные узлы обладают низкими значениями остаточных деформаций и повышенными эксплуатационными свойствами. Это позволяет увеличить срок службы узлов в 1,5–5 раз в сопоставлении с действующими технологиями.

Экономический эффект от внедрения лазерной сварки одного типа карданного вала с годовой программой 50 тыс.шт. составит 25 тыс.рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Грезев А.Н., Григорьянц А.Г., Федоров В.Г. Технологическая прочность и выносливость при лазерной сварке конструкционных сталей. - В сб.: Повышение качества и эффективности сварочного производства на предприятиях г. Москвы. - М.: Знание, 1980, с. II-15.
2. Григорьянц А.Г., Иванов Ю.Н., Грезев А.Н. Механические свойства сварных соединений, выполненных лазерной сваркой. - Труды МВТУ № 337: Прочность сварных конструкций и требования контроля. Под ред. В.А.Винокурова. - М.: МВТУ, 1980, с. 10-18.
3. Григорьянц А.Г., Грезев А.Н., Федоров В.Г., Якушин Б.Ф. и др. Сравнение технологической прочности соединений, выполненных лучевыми и дуговыми способами сварки. - Автоматическая сварка, 1980, № 10, с. II-14.
4. Григорьянц А.Г., Федоров В.Г., Грезев А.Н. Исследование влияния лазерной сварки на технологическую прочность и механические свойства сварных соединений высокопрочных сталей. - В сб.: Научные основы автоматизации производственных процессов и управления качеством машиностроении и приборостроении. Тезисы докладов Юбилейной У Всесоюзной межузловской научно-технической конференции, посвященной 150-летию МВТУ им. Н.Э.Баумана. - М.: 1979, с. 3-5.

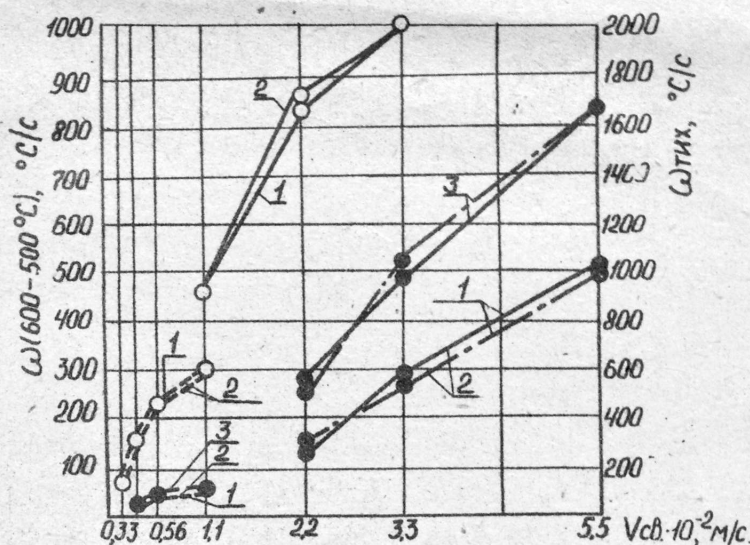


Рис. 1. Влияние скорости сварки сталей на среднюю скорость охлаждения металла шва: ○ - в ТИХ; ● - в интервале превращения; — — лазерная сварка (ЛС); — — — электроннолучевая сварка (ЭЛС); — — — аргонодуговая сварка (АРДС), 1 - 12Х2Н4А, 2 - 18ХГТ, 3 - стали Ст35 и Ст10.

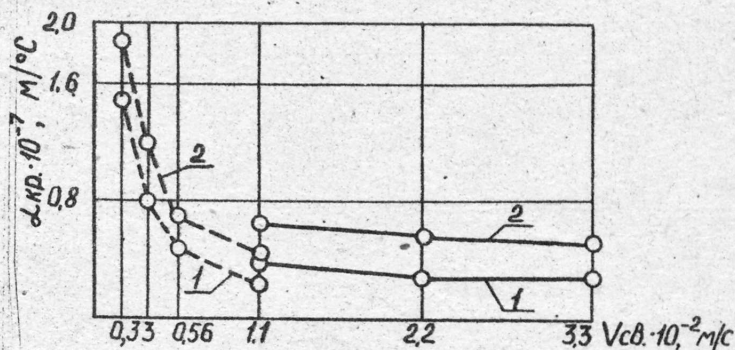


Рис. 2. Влияние скорости сварки стали на критический темп деформации ( $\Delta_{кр}$ ). — — — АРДС, — — — ЛС, 1 - 12Х2Н4А, 2 - 18ХГТ.

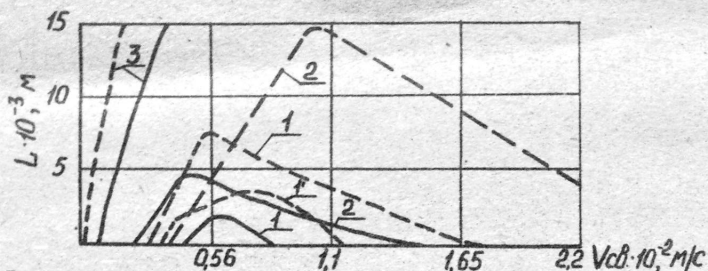


Рис. 3. Влияние скорости сварки стали на суммарную длину трещин в шве ( $L$ ): 1 - ЛС (защита гелием), 1' - ЛС (защита  $\text{CO}_2$ ), 2 - ЭЛС, 3 - АРДС. — — — 12Х2Н4А, — — — Ст35.

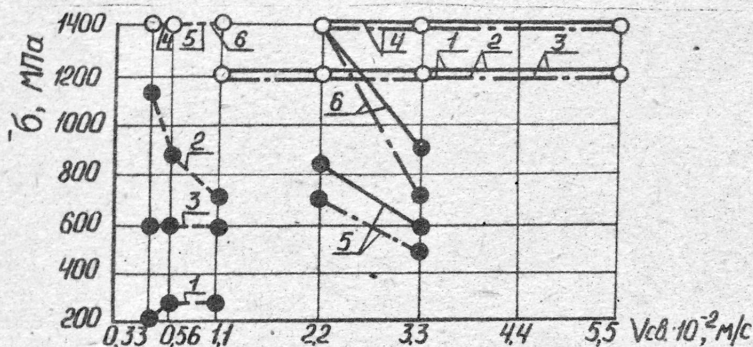


Рис. 4. Влияние скорости сварки стали на показатель сопротивляемости образованию холодных трещин: 1 - 12Х2Н4А, 2 - 18Х1Т, 3 - 12Х2Н4А+18Х1Т, 4 - Ст10, 5 - Ст35, 6 - Ст35+Ст10. — — — ЛС, — — — ЭЛС, — — — АРДС.

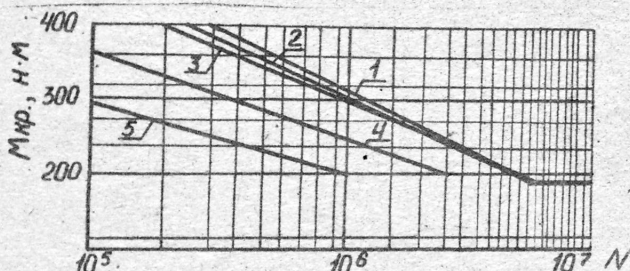


Рис. 5. Кривые усталостной прочности карданных валов: 1 - ЛС  $V_{св} = 2,8 \cdot 10^{-2}$  м/с, проволока СВ08ГС; 2 - сварка трением; 3 - дуговая сварка; 4 - ЛС  $V_{св} = 2,2 \cdot 10^{-2}$  м/с; 5 - ЛС  $V_{св} = 1,4 \cdot 10^{-2}$  м/с, проволока СВ-08Г2С.