

УДК 621.791.725

Снижение остаточных напряжений в судовых конструкциях при лазерной сварке

***А.В. Пересторонин**, магистрант
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»*

*Научный руководитель: **Б.М. Федоров**, к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»*

Сварочные процессы – эффективный метод создания неразъемных соединений в судостроении. Они позволяют существенно ускорить сборочные операции при постройке судна. Однако, одним из наиболее важных факторов, влияющих на эффективность его применения, является формирование при сварке остаточных напряжений и деформаций, существенно влияющих на технологичность этих процессов [1].

Расширение или сокращение металла от неравномерного нагрева или охлаждения, а также от структурных превращений образуют так называемые собственные, или внутренние деформации и напряжения при сварке. Они существуют в теле без приложения внешних нагрузок [2].

На образование остаточных напряжений, таким образом, влияют как термический цикл сварки, так и другие факторы, оказывающие воздействие на протекание фазовых и структурных превращений при кристаллизации стали. Это позволяет сделать вывод о том, что, путем воздействия на термический цикл сварки, можно добиться изменения распределения остаточных напряжений. Кроме того, этого же эффекта можно добиться путем применения других физических факторов, влияющих на кинетику распада и формирования фаз в ходе сварочного процесса.

В последние десятилетия широкое распространение получили сварные конструкции из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, поскольку они являются наиболее широко применяемыми в машиностроении конструкционными материалами. В состоянии поставки для этих сталей наиболее характерна феррито-перлитная структура.

Однако, при быстром охлаждении, характерном для сварочных процессов, в них возможно образование закалочных структур.

Наибольшее влияние остаточные напряжения и деформации имеют при сварке крупногабаритных конструкций, в частности, в судостроении. Для снижения уровня остаточных напряжений в сталях, склонных к образованию закалочных структур, необходимо воздействовать тем или иным способом на превращения, происходящие в стали при ее кристаллизации. Основными приемами для этого являются:

- 1) Изменение термического цикла сварки;
- 2) Послесварочная термообработка;
- 3) Воздействие дополнительных физических факторов в процессе сварки, в частности, ультразвукового поля;
- 4) Послесварочная механическая обработка (ударная, вибрационная, пластическая).

В рамках данной работы было произведено сравнительное исследование влияния первых двух из указанных приемов на остаточные напряжения в сварном шве при лазерной сварке углеродистых сталей, используемых в судовых конструкциях.

Одним из наиболее эффективных методов изменения термического цикла является применение гибридных источников теплоты. Гибридные методы имеют ряд преимуществ, связанных как с синергетическим эффектом и взаимной компенсацией недостатков, так и с повышением количества варьируемых параметров технологического процесса, что позволяет расширить диапазон изменения термического цикла сварки.

Частным случаем гибридных лазерных технологий является применение двухлучевой лазерной сварки. При этом, во-первых, повышается эффективность использования энергии, во-вторых, существенно изменяется термический цикл сварки, при этом такая технология в значительной мере сохраняет положительные черты лазерной сварки [3].

Применение двухлучевой лазерной сварки позволяет изменить термический цикл, снизив скорость охлаждения в области температур мартенситного превращения, что приводит к снижению фазового наклепа и, как следствие, величины остаточных напряжений.

Послесварочная термообработка – широко распространенный прием снижения остаточных напряжений. Он позволяет, в отдельных случаях, полностью их устранить, однако требует длительного времени и больших энергозатрат.

Более быстрой и экономичной является локальная термообработка околошовной зоны, например, лазерным лучом. Этот прием также позволяет снизить уровень

остаточных напряжений, хотя, в отличие от печной, такая обработка полностью их устранить не может.

В рамках данной работы рассмотрены результаты экспериментов по сварке пластин толщиной 4 мм из материала Ст3, широко используемые в судостроении для изготовления корпусных конструкций малотоннажных судов.

Сварка производилась излучением двух CO₂ лазеров (мощностью 5 и 3 кВт). Для сравнения приведены данные для дуговой сварки, выполненной соответствующим электродом в среде защитных газов.

Как известно, лазерная сварка отличается от дуговой более жестким термическим циклом, однако формирование более узкого шва и ЗТВ приводят к тому, что зона действия максимальных растягивающих напряжений также намного уже. Так же в ее пользу говорят существенно меньшие значения остаточных деформаций и более высокая производительность процесса.

Измерение напряженного состояния в металле образцов выполняли совместно с ЦТСС. использовали прибор SMMТ-3, предназначенный для неразрушающего контроля механических напряжений в конструкциях из ферромагнитных материалов.

Принцип работы прибора основан на использовании магнитоупругого эффекта, связанного с изменением магнитных свойств ферромагнитного материала под действием механических напряжений. Прибор создает в материале магнитный поток и регистрирует величину его изменения. Величина изменения магнитного потока пропорциональна действующим в металле напряжениям.

Внешний вид прибора SMMТ-3 показан на рисунке 1. Конструктивно прибор состоит из магнитоупругого преобразователя и электронного блока с цифровой индикацией, обеспечивающей индикацию трех разрядов и знака измеряемой величины. Магнитоупругий преобразователь представляет собой датчик, внутри которого перпендикулярно друг другу расположены две катушки с магнитопроводом, замыкающимся на исследуемом металле.

Прибор SMMТ-3 имеет следующие характеристики:

- диапазон измерения механических напряжений – до $0,9\sigma_T$;
- время установки рабочего режима – 1 с;
- площадь контролируемого участка – 300 мм²;
- габариты – 150х100х30 мм;
- масса – 300 г.

Применение магнитометрического метода не позволяет выявить распределение остаточных напряжений непосредственно в шве и околошовной зоне, поскольку размер

датчика сопоставим с габаритами шва. Однако, он позволяет по определенной интегральной величине остаточных напряжений судить об их изменении в сварном шве при применении к нему различных воздействий или изменении параметров сварки. При этом данный метод является неразрушающим и позволяет измерять напряжения в поверхностном слое наиболее оперативно [3] .

Проводились эксперименты по сварке одним лучом, двумя лучами при различных взаимных расположениях лучей и сварке с последующей локальной лазерной термообработкой. Для сварки использовалась установка, включающая в себя два СО₂ лазера. Оптическая схема установки показана на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид прибора SMMT-3

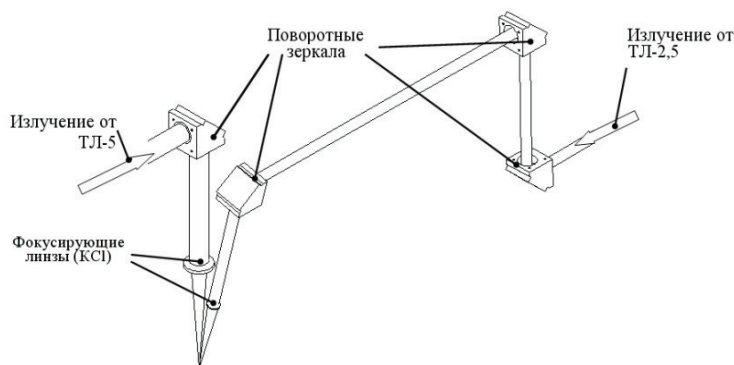


Рис. 2. Схема оптического тракта экспериментальной установки

Параметры сварки приведены в таблице.

Параметры лазерной сварки и термообработки

№ режима	Мощность основного лазерного луча P_1 , кВт	Мощность дополнительно го лазерного луча P_2 , кВт	Скорость сварки V , м/мин	Примечание
1	4,5	—	2,0	Сварка без присадочной проволоки одним лучом
2.1	4,0	2,8	2,0	Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен — фокус на поверхности перед основным лучом.
2.2	4,0	2,8	2,0	Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен — фокус на поверхности за основным лучом.
2.3	4,0	2,8	2,0	Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен — фокус на $\frac{1}{2}$ толщины от поверхности перед основным лучом.
2.4	4,5	3,0	2,0	Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен — фокус на $\frac{1}{2}$ толщины от поверхности за основным лучом.

2.5	4,5	3,0	2,0	Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен и расфокусирован на поверхности перед основным лучом
2.6	4,5	3,0	2,0	D второго луча на поверхности изделия 4,2мм
Часть 2 1.	4,9	—	1,5	Термообработка одним лазерным лучом по линии сплавления сварного соединения, полученного при сварке без присадочной проволоки одним лучом
2.	5,0	—	1,5	Термообработка последовательно одним лазерным лучом, затем вторым у линии сплавления сварного соединения, полученного при сварке без присадочной проволоки одним лучом Диаметр пятна на поверхности 5мм.
3.	5,0	3,0	1,5	Диаметр фокусного пятна на поверхности изделия 4,5мм и 3,2 мм

Из графика рис. 3 видно, что при дуговой сварке остаточные напряжения имеют максимальное значение.

Термообработка одним лазерным лучом по линии сплавления сварного шва позволяет снизить напряжения до 142 МПа.

Последовательная термообработка одним лазерным лучом, затем вторым у линии сплавления сварного шва, также снижает напряжения до 155 МПа.

Одновременная термообработка двумя лазерными лучами у линии сплавления сварного шва показала напряжения равные 203 МПа.

Таким образом, наилучшие результаты получены при термообработке одним лазерным лучом по линии сплавления сварного шва. Напряжения в шве снижаются на 29 %.

Лазерная гибридная сварка двумя лучами при различном сочетании взаимного положения основного и дополнительного луча показала следующие значения остаточных напряжений в шве:

а) Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен – фокус на поверхности перед основным лучом – 182 МПа;

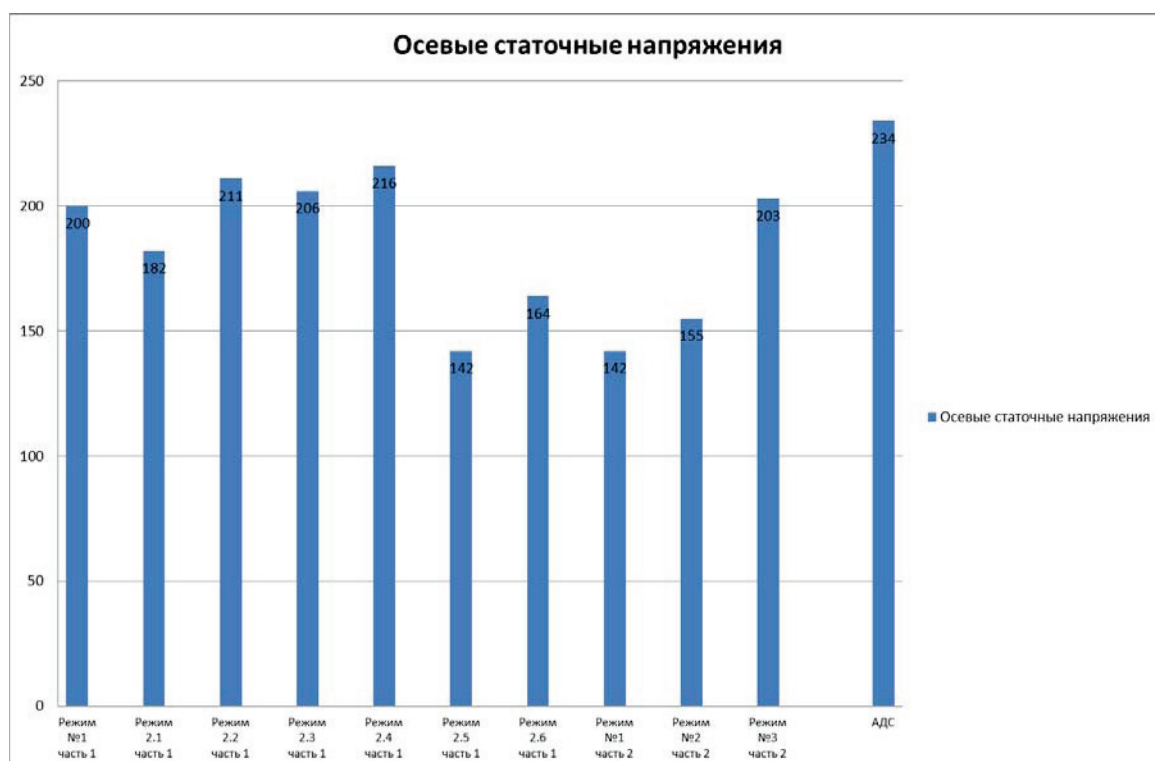


Рис. 3. Максимальные осевые растягивающие напряжения в шве и ОШЗ при различных режимах сварки и последующей термообработки

б) Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен – фокус на поверхности за основным лучом – 211 МПа;

в) Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен – фокус на $\frac{1}{2}$ толщины от поверхности перед основным лучом – 206 МПа;

г) Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен – фокус на $\frac{1}{2}$ толщины от поверхности за основным лучом – 216 МПа;

д) Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен и расфокусирован на поверхности перед основным лучом – 142 МПа;

е) Основной луч направлен перпендикулярно поверхности; дополнительный луч наклонен и расфокусирован на поверхности за основным лучом – 184 МПа.

Наилучшие результаты получены при сварке по варианту (д). Напряжения в шве, также как и при лучшем варианте лазерной термообработки, снижаются на 29 %.

Таким образом, применение двухлучевой сварки, за счет обеспечения более мягкого термического цикла, обеспечивает снижение остаточных напряжений примерно на 30%, и схожих результатов можно добиться путем применения лазерной локальной термообработки зоны сплавления.

Выбор конкретного метода зависит от имеющегося оборудования и требований к производительности технологического процесса.

Представленные методы имеют следующие преимущества:

- гибридная технология обеспечивает более высокую производительность процесса сварки и отсутствие дополнительной операции термообработки;
- последующая термообработка не требует применения комплекса с двумя лазерами, что снижает его стоимость и затраты на эксплуатацию.

В качестве альтернативы указанным способам предложено применение лазерной сварки с сопутствующей ультразвуковой обработкой.

Известно [5,6], что применение ультразвуковой обработки при дуговой сварке сталей позволяет повысить качество сварного шва и снизить остаточные напряжения, в отдельных случаях. В случае сварки аустенитных сталей – практически полностью их устранить.

При воздействии ультразвука на металл шва и ЗТВ наблюдаются следующие эффекты:

- дегазация металла шва;
- измельчение структуры;
- сужение зоны устойчивости аустенита;
- снижение остаточных напряжений.

Применение ультразвука вместо второго луча в отдельных случаях позволит снизить стоимость операции, а по сравнению с последующей термообработкой производительность выше. Это говорит о целесообразности исследования лазерной сварки с сопутствующей ультразвуковой обработкой.

С этой целью был подготовлен проект приспособления, обеспечивающей введение ультразвуковых колебаний в процессе лазерной сварки, внешний вид которого представлен на рис. 4.

Приспособление обеспечивает ввод ультразвуковых колебаний в околошовную зону позади лазерного луча на расстоянии примерно 120 мм, что соответствует предложенному в [5]. Оно может применяться с различными сварочными головками и обеспечивает возможность сварки крупногабаритных заготовок, отклонения для которых при лазерной сварке нормированы ± 1 мм.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

- применение гибридной лазерной сварки двумя лучами на подобранных соответствующим образом режимах позволяет снизить остаточные напряжения примерно на 30%;
- аналогичного результата можно добиться путем локальной лазерной термообработки зоны сплавления;
- перспективно применение сопутствующего ультразвукового воздействия в процессе лазерной сварки.

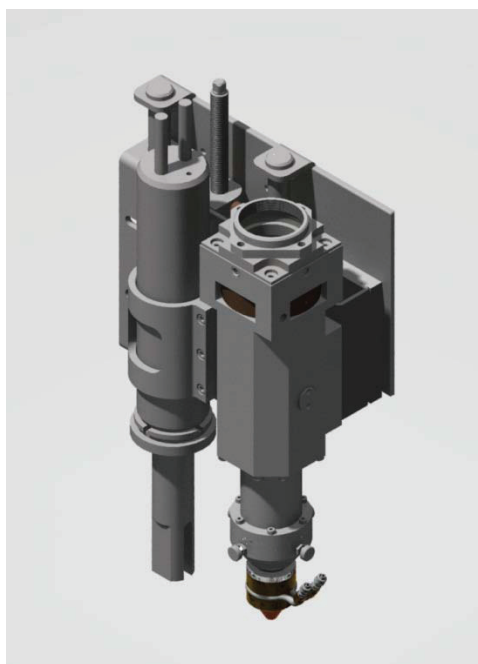


Рис. 4. Внешний вид спроектированного приспособления

Список литературы

1. Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций – Л.: Судостроение, 1974 г.
2. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.

3. Григорьянц А. Г., Шигнов И. Н., Чирков А. М. Гибридные технологии лазерной сварки: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 52 с.: ил.
4. Пересторонин А. В. Анализ методов определения остаточных напряжений в сварных конструкциях [Электронный ресурс] //studvesna.qform3d.ru: Труды Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2012: Машиностроительные технологии». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – URL: <http://studvesna.qform3d.ru?go=articles&id=648>. – Загл. с экрана. – № гос. регистрации 0321200668.
5. А. И. Трофимов, С. И. Минин, В. Н. Дементьев, М. А. Трофимов, А. И. Осипов. Ультразвуковой метод снятия остаточных напряжений в сварных соединениях циркуляционных трубопроводов и оборудования АЭС. - Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, № 3, 2009, С. 44 – 49.
6. В. И. Кирьян, А. А. Кайдалов, Д. П. Новикова, М. Кеснерс. Улучшение структуры сварных соединений под воздействием широкополосных ультразвуковых колебаний в процессе сварки. – Автоматическая сварка, № 2, 2007 г., С. 44 – 48.