

# Технология LaserHybrid в судостроении

Краткий обзор: учитывая, что конечным потребителям в сфере судостроения требуется все более высокое качество продукции и улучшенные рабочие характеристики, непрерывные инновации считаются решающим фактором успеха. Данное утверждение в наибольшей степени справедливо для сварочных технологий, что ставит перед профессионалами данной отрасли задачу разработки новой, усовершенствованной и более производительной технологии сварки. В технологии соединения материалов важную роль играют, с одной стороны, высокая скорость сварки в сочетании со снижением деформации и, с другой стороны, хорошая способность к перекрытию зазора. При этом оба указанных условия можно обеспечить при использовании традиционных технологий лазерной сварки.

Нет никаких сомнений в том, что технология сварки лазерным лучом и технология GMAW (сварка плавящимся электродом в среде защитных газов) будут широко использоваться для соединения материалов еще в течение очень долгого времени. Сочетание обеих технологий при использовании различных источников лазерного излучения обеспечивает новые возможности и эффект совместного действия. В статье, рассматривается использование углекислотных, волоконных и YAG лазеров в сочетании с технологией GMAW, а также описывается использование технологии LaserHybrid со сварочным трактором совместно с системой отслеживания шва для выполнения длинных линейных швов.

## 1. Введение

Лазерная сварка демонстрирует огромный потенциал использования для сварки конструкционных сталей благодаря таким чрезвычайно привлекательным свойствам, как высокая скорость сварки, низкая деформация и простота автоматизации. Использование гибридной технологии сварки GMAW-Laser улучшает способность к перекрытию зазора, а также существенно увеличивает скорость сварки, что обеспечивает преимущества при широком зазоре. Как сварка лазерным лучом, так и дуговая сварка в течение долгого времени используются в промышленности, обеспечивая широкий спектр видов применения для соединения материалов. Для каждой из данных технологий характерны определенные области применения, в зависимости от физических процессов переноса энергии к заготовке и потоков получаемой энергии.

Энергия передается от источника лазерного излучения к обрабатываемому материалу инфракрасным когерентным излучением высокой энергии с использованием оптоволоконного кабеля или системы зеркал. Сварочная дуга передает тепловую энергию, необходимую для сварки посредством электрического тока высокого напряжения, который направляется к заготовке через столб дуги. Лазерное излучение способствует образованию чрезвычайно узкой околошовной зоны при высоком отношении глубины проплавления к ширине шва (эффект глубокого проплавления). Способность технологии лазерной сварки к перекрытию зазора чрезвычайно низкая в связи с малым диаметром фокального пятна, но, с другой стороны, она обеспечивает очень высокую скорость сварки.

Технология дуговой сварки характеризуется гораздо более низкой плотностью энергии и более низкой скоростью сварки, но создает фокальное пятно большего диаметра на поверхности

заготовки. Объединив обе технологии, можно добиться полезного комбинированного эффекта. Это позволяет достичь как преимуществ в качестве и технологичности производства, так и снижения затрат. Данная технология позволяет использовать нестандартные решения и уменьшать затратность работ в судостроительной отрасли, не в последнюю очередь благодаря снижению требований к точности заготовок, повышению производительности и возможности обеспечения хороших механических/технологических свойств.

Методика объединения в одном сварочном процессе технологий лазерной и дуговой сварки известна с 70-х годов XX века, но дополнительные разработки не велись в течение длительного периода с того времени. В последнее время разработчики вновь обратили свое внимание на этот вопрос и предприняли попытку объединить достоинства дуговой и лазерной сварки в технологии гибридной сварки. На начальном этапе использования технологии необходимо было подтвердить пригодность источников лазерного излучения для промышленного применения, но в настоящее время они входят в комплект стандартного технологического оборудования на многих производственных предприятиях.

Сочетание лазерной сварки с другой сварочной технологией называется «гибридная технология сварки». Это означает, что лазерная и дуговая сварка одновременно используются в одной зоне сварки, оказывая взаимное влияние и дополняя друг друга. Цель представленных исследований заключалась в том, чтобы определить, насколько технологические характеристики способствуют улучшению возможностей сварочной технологии. Одной из стандартных сфер применения гибридной технологии CO<sub>2</sub>-Laser GMA является судостроение. В данном отчете демонстрируются и обсуждаются возможности использования технологии в данной сфере.

## 2. Аспекты использования технологии лазерной сварки

В технологии лазерной сварки требуется не только мощный источник лазерного излучения, но и высококачественный лазерный луч, обеспечивающие получение желаемого «эффекта глубокого проплавления». Более высокое качество лазерного луча может использоваться для получения фокального пятна меньшего диаметра или большего фокусного расстояния. Количество энергии на единицу длины  $E_s$  находится на очень низком уровне, что позволяет значительно уменьшить деформацию и необходимость в регулировании мощности. Как и при использовании автоматизированной дуговой сварки, при лазерной сварке крупногабаритных заготовок необходимо использовать отдельную разработку управляющих программ, функцию отслеживания шва и адаптивное управление процессом сварки.

Без использования присадочной проволоки максимально допустимая величина зазора составляет 0,1 - 0,2 мм, в то время как для зазора большего размера необходимо использование присадочного материала, при этом присадочная проволока обычно используется в производстве для увеличения способности к перекрытию зазора до 0,4 мм. В промышленности используется углекислотный лазер мощностью 12 кВт. При использовании углекислотного лазера лазерный луч передается к заготовке с помощью системы зеркал. Лазерный луч направляется на заготовку с помощью фокусирующего модуля с фокусным расстоянием 300 мм. Для настоящего исследования также использовались YAG-лазер с ламповой накачкой мощностью 4 кВт, установленный на заготовке, и волоконный лазер мощностью 7 кВт.

### 3. Технология LaserHybrid

При сварке металлических заготовок интенсивность лазерного излучения составляет более  $106 \text{ Вт/см}^2$ . Когда лазерный луч попадает на поверхность материала, место контакта нагревается до температуры испарения, при этом в свариваемом металле образуется паровая каверна в связи с выходом паров металла. Отличительной особенностью сварного шва является высокий коэффициент отношения глубины проплавления к ширине шва. Плотность потока энергии свободно горящей сварочной дуги немногим превышает  $104 \text{ Вт/см}^2$ .

На рисунке 1 показан базовый принцип данной технологии, в частности перенос металла при гибридной сварке. Изображенный на рисунке лазерный луч передает тепло металлу верхней части шва в дополнение к нагреву металла сварочной дугой. В отличие от последовательного сочетания двух отдельных технологий сварки, гибридную сварку можно рассматривать как сочетание двух процессов сварки, одновременно воздействующих на одну и ту же технологическую зону. В зависимости от того, какая технология лазерной или дуговой сварки используется, и от технологических параметров, процессы влияют друг на друга в различной степени и различным образом.

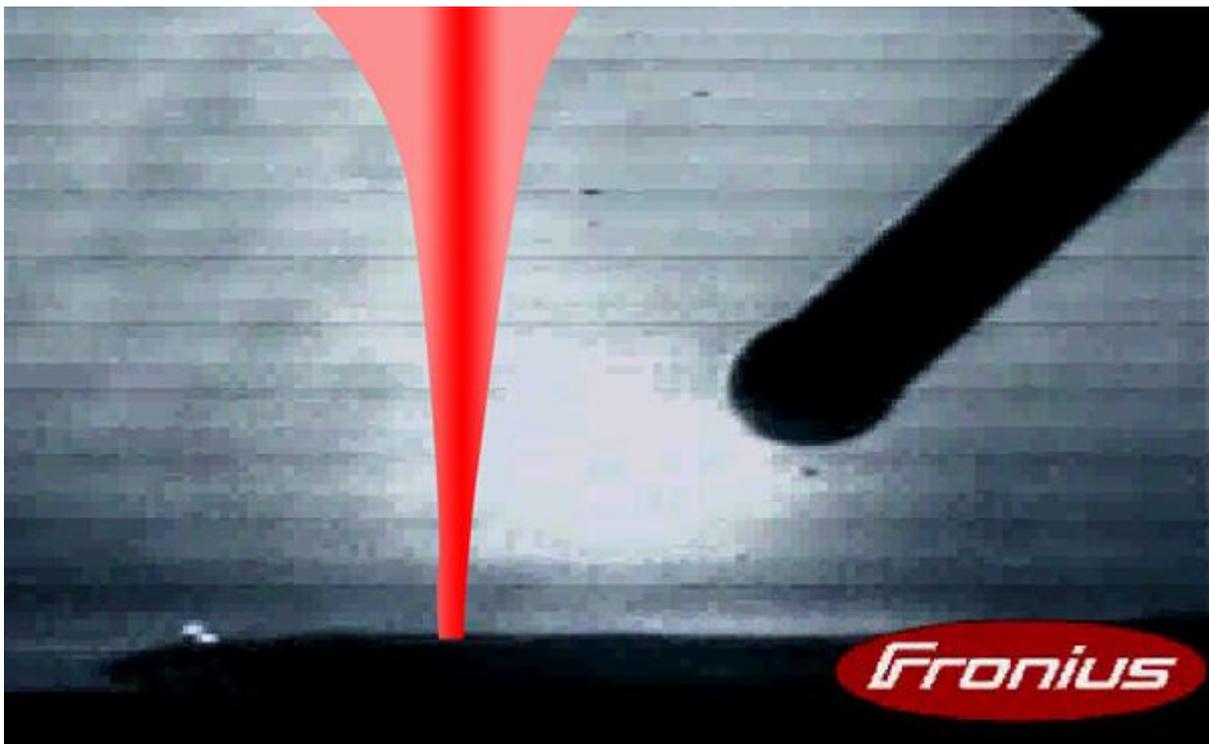


Рис. 1: Схематическое изображение процесса сварки Laser-GMAW

Благодаря сочетанию лазерной и дуговой технологий увеличивается как глубина проплавления, так и скорость сварки (в сравнении с результатами использования любой из указанных технологий по отдельности). Пары металла, выходящие из паровой каверны, воздействуют на плазму дуги. Поглощением лазерного излучения плазмой сварочной дуги можно пренебречь. В зависимости от выбранного отношения мощности на входах двух сварочных аппаратов, характеристики всего процесса могут в большей или меньшей степени определяться воздействием лазера или сварочной дуги.

На поглощение лазерного излучения значительное влияние оказывает температура поверхности заготовки. После достижения температуры испарения образуется паровая каверна, в результате чего практически вся энергия излучения может быть поглощена заготовкой. Таким образом, необходимая для этого энергия определяется температурно-зависимым процессом поглощения и количеством энергии, которая теряется в результате ее переноса в остальную часть заготовки. В процессе сварки по технологии Laser-GMAW испарение происходит не только с поверхности заготовки, но и с поверхности присадочной проволоки; это означает, что количество паров металла увеличивается, что, в свою очередь, способствует поглощению лазерного излучения. Это также предотвращает прерывание процесса.

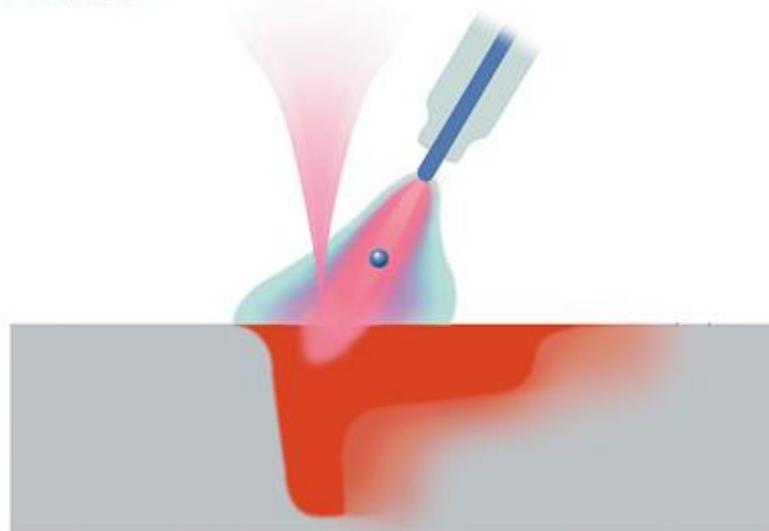
Одним из предварительных условий применения гибридной сварки в судостроительной отрасли является достаточная способность по перекрытию зазора. По этой причине исследование было направлено на достижение максимальной способности по перекрытию зазора. В случае с переменным зазором возникает необходимость изменения нескольких технологических параметров. Более жесткие допуски для корневого зазора требуют обязательного регулирования мощности источника лазерного излучения. Кроме того, скорость сварки или скорость подачи проволоки необходимо отрегулировать в соответствии с фактическим объемом зазора, который меняется в зависимости от угла раскрытия кромок и корневого зазора.

#### **ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА**

Большая глубина проплавления  
Высокая скорость сварки  
Малое тепловложение  
Высокая прочность на разрыв

#### **ДУГОВАЯ СВАРКА**

Недорогой источник энергии  
Способность по перекрытию зазора  
Возможность влияния на микроструктуру



#### **ГИБРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ**

Улучшенные физико-химические свойства  
Повышенная скорость сварки, большая толщина шва  
Экономия затратной энергии лазерного излучения  
Малая деформация, повышенная способность по  
перекрытию зазора

*Рис. 2: Эффект совместного использования двух технологий*

## 4. Экспериментальное исследование и сравнение технологии LaserHybrid с другими технологиями сварки

### Исследование с использованием углекислотного лазера

Высокая квантовая эффективность углекислотного лазера, обеспечивающая КПД до 20 %, относительная простота технической реализации и масштабируемость являются основными причинами того, что данный лазер является наиболее важным в сфере промышленной обработки материалов. Для углекислотных лазеров характерны высокая выходная мощность; при этом обеспечиваемая коммерческая мощность на входе достигает 50 кВт.

Приведенные ниже результаты (таблица 3) были получены при использовании углекислотного лазера (12 кВт) компании Trumpf Laser technology и микропроцессорного источника электропитания Fronius TPS 5000 от Meyer Werft. Рабочая зона данной лабораторной установки составляет 4,5 x 13 м. Используемый зажимной механизм позволил сваривать образцы размером 2000 x 300 мм. В качестве материала использовалась судостроительная сталь марки А со стандартной грунтовкой (Lindokote Shopprimer). Испытания сварных соединений проводились на стыковом соединении с подготовкой таврового соединения в положениях РА и РВ и без опорной подкладки.

Исследование относится к упомянутым стыковым соединениям материала толщиной до 15 мм. Было проведено сравнение технологии дуговой сварки под флюсом, LaserHybrid и лазерной сварки с присадочной проволокой. Технология дуговой сварки под флюсом обеспечивает перекрытие зазора от 2 до 5 мм при толщине материала до 12 мм. При использовании технологии Laser Hybrid становится возможным достичь способности к перекрытию зазора до 1 мм при толщине материала до 15 мм, но при этом скорость сварки в 3 раза превышает скорость дуговой сварки под флюсом и в два раза скорость лазерной сварки с присадочной проволокой. Использование технологии лазерной сварки с присадочной проволокой позволяет достичь способности к перекрытию зазора до 0,4 мм при толщине материала до 15 мм. Для оценки максимальной скорости сварки при максимальной величине зазора использовались материалы толщиной 5, 8, 12 и 15 мм. Влияние защитных газов гелия и аргона на технологию гибридной сварки исследовалось стандартными методами. Для сварки высокомоощными углекислотными лазерами необходима, главным образом, гелиевая фракция защитного газа.

Технология	Дуговая сварка под флюсом	LaserHybrid	Лазерная сварка с присадочной проволокой
Скорость	100%	300%	150%
Толщина	< 12 мм	< 15 мм	< 15 мм
Зазор	2 – 5 мм	0 – 1 мм	0 – 0,4 мм
Деформация	< 1,5 мм/м	< 0,2 мм/м	< 0,1 мм/м
Металлургия	некритично	некритично	критично
Усталостные свойства	хорошие	отличные	критично

Таблица 1: сравнение технологии сварки Laser-Hybrid с другими технологиями

В судостроении технология сварки Laser-GMA-hybrid используется с применением сварочных станков с подвижным порталом на верфи компании Meueg в городе Папенбург, Германия. Здесь на этапе предварительной сборки палубы изготавливаются полностью автоматическим способом с использованием технологии, разработанной верфью. Высокое качество данной методики позволяет соединить 20 секций палубы длиной 20 м без необходимости переворота заготовок. В зоне предварительной сборки устанавливаются две станции для сварки встык. Методика позволяет сваривать пластины толщиной до 15 мм со скоростью до 3,0 м/мин. На следующем этапе устанавливаются две станции для сварки тавровых швов. Привариваются элементы жесткости для палуб и переборок длиной до 20 м и толщиной до 12 мм. Перед сваркой соединяемые детали фрезеруются, чтобы обеспечить точность подгонки.

## Исследование с использованием волоконного лазера

В настоящее время в сфере обработки материалов значительное количество высокомогущных лазерных установок мощностью до 10 кВт поставляется компанией IPG Photonics, имеющей штаб-квартиру и завод в городе Оксфорд, штат Массачусетс, и два производственных предприятия в Европе. Основным элементом технологии являются фирменные активные волокна и патентованная технология накачки, которая позволяет использовать многомодовые диоды большой площади вместо диодных матриц. Это обеспечивает чрезвычайно продолжительный срок службы диодов. Устройство может изготавливаться из бухт легированного иттербием волокна с многослойной оболочкой, обеспечивающего длину волны излучения 1,07 – 1,08 микрона. В качестве альтернативного варианта, волокно может быть легировано тулнием и обеспечивать длину волны 1,8 – 2,0 микрона или легировано эрбием и обеспечивать длину волны 1,54 – 1,56 микрона. Энергия диодной накачки передается активному веществу через многомодовые волокна, уложенные в бухты с многослойной оболочкой. Лазерный резонатор создается непосредственно в активном волокне. Лазерное излучение выходит из волоконного лазера через пассивное одномодовое волокно, диаметр жилы которого обычно составляет 6 микрон. Результирующий лазерный луч, главным образом, дифракционно ограничен и, при наличии встроенного коллиматора, производит луч с высокой степенью направленности. К примеру, полное угловое отклонение лазера с одномодовым волокном мощностью 100 Вт составляет 0,13 миллирадиана в половинном угле с сужением пучка до 5 мм в диаметре.

В настоящее время максимальная мощность промышленного лазерного модуля с одномодовым IPG волокном составляет 200 Вт. Большая мощность достигается при использовании нескольких модулей. Излучение лазера фокусируется с помощью фирменного устройства сведения пучков, создающего один высококачественный пучок. Например, модуль мощностью 1 кВт будет состоять из 10 отдельных волоконных лазеров, объединенных в общем корпусе. Хотя пучок больше не является одномодовым, результирующий показатель M2 в диапазоне 7–10 превосходит соответствующий показатель высокомогущных твердотельных лазеров. Пучок волоконного лазера мощностью 7 кВт может передаваться по волокну толщиной 300 микрон. Возможно создание выходных пучков разного профиля, включая форму, близкую к четырехугольной.

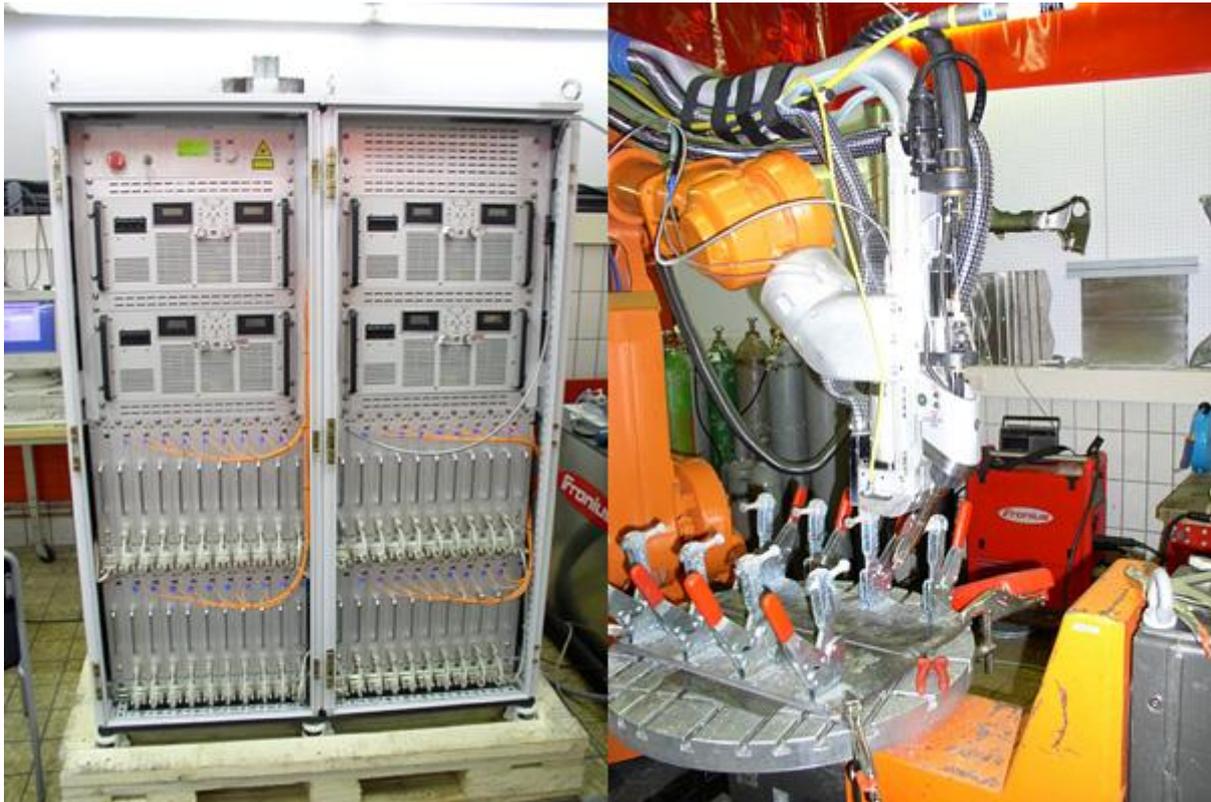
Лазер с легированным иттербием волокном обладает степенью преобразования электрической энергии в оптическую в диапазоне 16 – 20 процентов. Лазеры с волокном, легированным

эрбием и тулнием, демонстрируют меньшую степень преобразования электрической энергии в оптическую, но при этом являются более эффективными, чем стандартные лазеры YAG. В некоторых областях применения длины волн излучения, характерные для данных лазеров, являются оптимальными. Данная установка разрабатывается в связи с существующим в отрасли спросом на лазер, производительность которого будет соответствовать классу Nd:YAG, а безопасность для глаз – классу углекислотных лазеров. Одномодовые системы непрерывного излучения компании допускают модуляцию до уровня 50 000 Гц с длительностью импульса всего 10 микросекунд. В настоящее время существуют три суперимпульсные модели с продолжительностью импульса всего 1 наносекунда или энергией импульса до 1 миллиджоуля для импульса продолжительностью 100 нсек и многомодовые версии непрерывного излучения мощностью от 300 Вт до 10 кВт.

Технология волоконных лазеров предлагает промышленному потребителю несколько преимуществ. Диаграмма направленности излучения волоконного лазера мощностью 4 кВт составляет 0,5 м<sup>2</sup> по сравнению с 11 м<sup>2</sup> для стандартного лазера Nd:YAG с ламповой накачкой, и при этом данный тип лазера не требует системы охлаждения. Он практически не требует обслуживания в течение всего срока службы, в связи с отсутствием необходимости в замене импульсных ламп или диодов. Высокий электрический КПД позволяет снизить эксплуатационные расходы. Лучшее качество пучка обеспечивает пользователю возможность достижения диаметра фокального пятна значительно меньшего, чем у стандартных лазеров, с достижением высокой плотности потока и/или большего рабочего расстояния (пучок мощностью 1 кВт может быть сфокусирован до диаметра 50 микрон с помощью линзы диаметром 4 дюйма).

Стоимость использования волоконного лазера мощностью до 1 кВт не превышает стоимости использования YAG-лазера с ламповой накачкой. В настоящее время стоимость приобретения волоконного лазера мощностью более 1 кВт выше. Однако при учете всех факторов – площадь помещения, охладители, обслуживание и т.п. – использование таких лазеров должно быть более экономичным, чем использование лазеров Nd:YAG аналогичной мощности. За последние шесть месяцев на европейских предприятиях на испытательном стенде были испытаны несколько волоконных лазеров мощностью несколько киловатт. Данные лазеры безукоризненно работали в течение нескольких смен и демонстрировали надежность и производительность, которую можно достичь только при использовании лазеров значительно большей мощности. Образец мощностью 2 кВт использовался для сварки внахлестку листов оцинкованной автомобильной стали толщиной 1,2 мм со скоростью 5 м/мин. Качество сварки и КПД сопоставимы с показателями Nd:YAG лазера с ламповой накачкой мощностью 4 кВт. Волоконный лазер мощностью 2 кВт с окончательным диаметром волокна 300 микрон разрезает оцинкованную сталь толщиной 4 мм со скоростью 10 м/мин с образованием ровных кромок без скола. Максимальная скорость резки достигает 16 м/мин. [5].

Исследования использования волоконного лазера мощностью 7 кВт вместе с дуговым сварочным аппаратом в лаборатории LaserHybrid в отделе исследований и разработки компании Fronius-Wels демонстрируют возможность сварки нелегированных и высоколегированных видов стали толщиной до 8 мм. На рис. 3 показана лабораторная установка LaserHybrid в комбинации с волоконным лазером IPG.



*Рис. 3: Сварка Laser Hybrid с использованием волоконного лазера (Pl: 6,5 кВт, s: 8 мм, основной материал: S235JR, присадочная проволока: G3Si1).*

## Исследование с использованием на заготовке твердотельного лазера с ламповой накачкой мощностью 4 кВт

В связи с выходной мощностью Nd:YAG лазера, превышающей 4 кВт, и сопутствующей простотой эксплуатации таких систем, исследуются их технические средства. Во всех рассмотренных видах применения и исследованиях использовались углекислотные лазеры и/или лазеры с активной средой из иттриево-алюминиевого граната, легированного ионами неодима (Nd:YAG). Неблагоприятными условиями является использование плазменной защиты в связи с длиной волны 10,6 мкм и систем точного наведения пучка с помощью негибкой системы зеркал, что делает мобильную систему с углекислотным лазером практически нереализуемой. Роботизированное или мобильное применение возможно, главным образом, благодаря использованию лазеров Nd:YAG. За последнее десятилетие промышленная значимость этого типа твердотельных лазеров возросла. Благодаря длине волны 1,06 мкм, лазерный пучок можно направлять по гибкому оптическому волокну даже на расстояния, превышающие 70 м, что позволяет выполнять роботизированную сварку трехмерных конструкций. Эффект плазменной защиты отсутствует, в связи с чем для сварки в среде защитных газов могут использоваться газы, наилучшим образом подходящие для обеспечения стабильности горения дуги, лучшего отделения капель, защитного эффекта, а также предотвращения брызгообразования. С помощью системы управления лазером несколько технологических установок могут использовать один источник лазерного излучения.

Таким образом, продолжительность работы источника электропитания и непосредственные расходы могут быть оптимизированы. Высокомощные лазеры Nd:YAG закрепились на рынке

недавно, и их цена относительно высока (€/кВт) в сравнении с углекислотными лазерами. Их выходная мощность сравнительно низкая и находится в диапазоне до 6 кВт. В Японии предпринимаются попытки использования лазера мощностью 10 кВт. При этом не следует недооценивать опасность отраженного излучения, которое может представлять угрозу для незащищенных органов зрения даже на расстоянии несколько метров.

Три основных области применения:

- выполнение длинных линейных тавровых сварных швов с помощью системы тракторного типа,
- сварка прихваточными швами с помощью механической системы,
- ручная сварка/резка в процессе достройки судов.

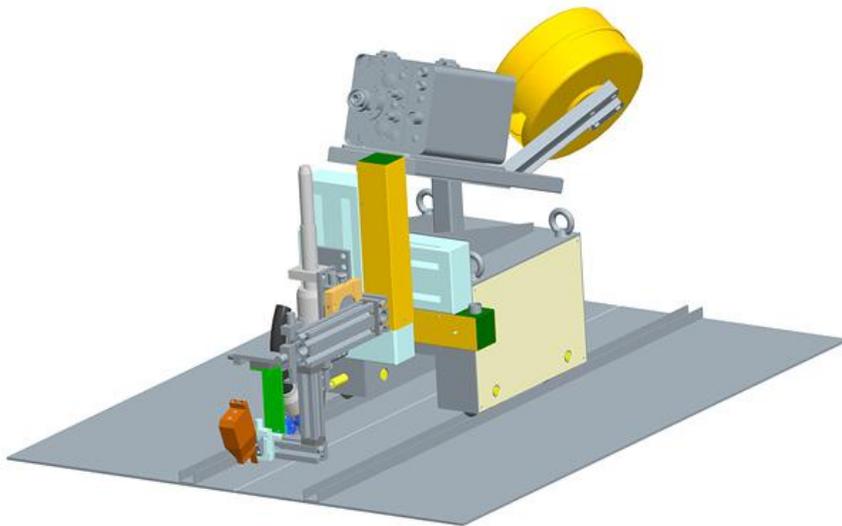


Рис. 4: Схематическое изображение системы тракторного типа для выполнения длинных линейных сварных швов встык.

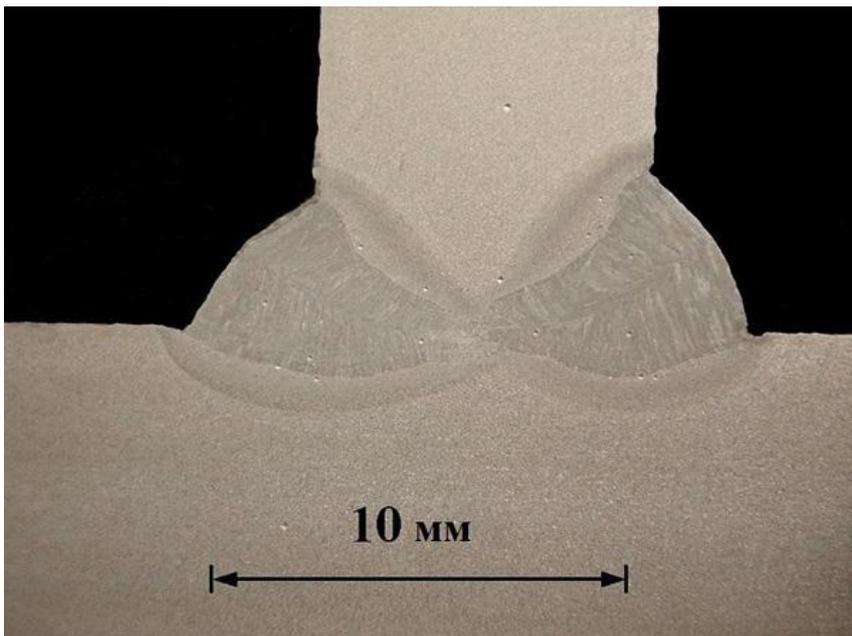


Рис. 5: Тавровое соединение со сваркой с обеих сторон. Толщина: 8 мм, лазер типа Nd-YAG, мощность 4,2 кВт, скорость сварки 2 м/мин [4]

Мобильный трактор для перемещения сварочной головки LaserHybrid обладает рядом преимуществ. Изменение ориентации может производиться вручную. Необходимое для работ пространство чрезвычайно мало в сравнении с системой с подвижным порталом. В результате снижения количества перемещений оптической системы, на оптоволокно, по которому передается лазерный пучок, не действуют механические напряжения. Регулировка процесса необходима только для источника питания сварочного аппарата, т.к. характеристики дуговой сварки в среде защитных газов не оптимальны для гибридной технологии. Существует возможность очень точной настройки системы отслеживания шва, лазерного пучка и сварочной горелки. Благодаря использованию специальной лазерной оптики, тавровый шов можно также выполнять с помощью модифицированного сварочного трактора. Для защиты оптоволоконной оболочки от отражений из технологической зоны оси лазерного луча могут быть смещены на несколько градусов по направлению сварки. Это практически не оказывало влияния на результат сварки.

## Заключение

Сварка Laser-GMAW представляет собой совершенно новую технологию, которая обеспечивает объединение различных технологий для многих сфер применения в судостроительной отрасли, в частности, если соблюдение допусков составных деталей, необходимых для сварки лазерным лучом, невозможно или нерационально с финансовой точки зрения. Гораздо более широкий спектр областей применения и высокие показатели комбинированного процесса приводят к увеличению конкурентоспособности благодаря снижению размера капиталовложений, более короткому времени изготовления, более низким затратам на производство и более высокому КПД. Большим преимуществом сварки LaserHybrid является низкий уровень деформации свариваемых деталей и малая потребность в доработке после сварки.

Данное исследование показывает возможности технологии Laser-GMA LaserHybrid с применением высокоомощных углекислотных, волоконных или YAG лазеров для сварки листов различной толщины. Обсуждаются такие достоинства гибридной технологии сварки, как хорошая способность к перекрытию зазора и малое количество энергии на единицу длины. В сравнении с технологией лазерной сварки с присадочной проволокой, скорость сварки по технологии Laser Hybrid выше в два раза. Максимальная способность к перекрытию зазора при использовании технологии LaserHybrid достигает 1 мм при толщине материала до 15 мм.