ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-143-156

DEVELOPMENT OF HIGH-EFFICIENT LASER WELDING AND CLADDING TECHNOLOGIES FOR THE CURRENT SHIPBUILDING

V. V. Veselkov[1], N. A. Afanasev[1, 2], A. G. Zhmurenkov[1, 2]

[1] Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation.
[2] JSC "Shipbuilding & Shiprepair Technology Center",
St. Petersburg, Russian Federation.

Analysis of marine diesel engines shows, that high-loaded parts, uses in their constructions (pistons, valves, valve lands) and in constructions of coolers (tube plates of heat exchangers), can break before the planning engine overhaul. For this purpose, it is necessary to withdrawal these constructions for repairing high-loaded parts and as result is a financial loss. JSC SSTC engineers set the tasks for the development of high-efficient technologies based on the production tasks for quality development of engine and related systems. One of the ways of solving these tasks was the laser technologies application. Main advantages of laser technologies comparing to conventional arc techniques are high processing speed, minimal heat affected zone, low requirement of welding consumables and practical absence of welding deformations, which considerably reduced due to low heat input (several times less, than with conventional arc method). Although laser technologies are a complicated multi-parameter process, their massive implementation is one of the ways to improve quality in shipbuilding and heavy engineering production. The article describes the experience of Laser Shipbuilding Centre in technological development of tube plates laser welding and engines valves laser cladding, and in particular divulges: equipment's capabilities, specifics and principles of operation; the procedure of technologies development; technological innovations allow to reach a solution of the tasks; the effects of technological parameters on the features of the processes; results of the researches.

Keywords: laser welding, laser cladding, shipbuilding, marine engineering, heat exchanger, tube plate.

For citation:
Veselkov, Vyacheslav V., Nikolay A. Afanasev, and Artem G. Zhmurenkov. "Development of high-efficient laser welding and cladding technologies for the current shipbuilding." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-143-156.

УДК 621.791

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО СУДОСТРОЕНИЯ

В. В. Веселков[1], Н. А. Афанасьев[1, 2], А. Г. Жмуренков[1, 2]

1 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация.
2 АО «Центр технологии судостроения и судоремонта»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Анализ использования судовых дизельных двигателей показывает, что многие машиностроительные элементы, применяемые в их конструкции (поршни, клапаны, седла клапанов и т. п.) и конструкции элементов охлаждения (трубные решетки теплообменных аппаратов) зачастую выходят из строя до запланированного капитального ремонта. Возникает необходимость их вывода из эксплуатации, что приводит к значительным финансовым потерям. Для обеспечения необходимых показателей работоспособности элементов двигателей и сопутствующих систем специалистам АО «ЦТСС» была поставлена задача по разработке высокопроизводительных и эффективных технологий их изготовления, исходя из конкретных задач производства. Одним из путей решения поставленной задачи стало применение лазерных технологий, отличающихся от традиционных более высокой скоростью процесса, минимальными тепловыми вложениями в обрабатываемое изделие, минимальным расходом присадочных материалов и практически полным отсутствием термических деформаций, которые сокращены благодаря низким значениям погонной

энергии процесса (в несколько раз меньше, чем при сварке традиционными дуговыми способами). Несмотря на то, что лазерные технологии являются сложными многопараметрическими процессами, их комплексное применение является одним из путей повышения качества судостроительной и машиностроительной продукции. В статье описан опыт сотрудников «Лазерного центра судостроения» в отработке технологий лазерной сварки трубных решеток и наплавки клапанов судовых двигателей и, в частности, отражены: принципы работы, возможности и особенности применяемого оборудования; последовательность действий при отработке технологий; технологические аспекты, позволяющие достичь решения поставленной задачи; влияние различных параметров на технологические особенности процессов; результаты проведенных исследований.

Ключевые слова: лазерная сварка, лазерная наплавка, судостроение, судовое машиностроение, теплообменный аппарат, трубная решетка.

Для цитирования:

Веселков В. В. Разработка высокопроизводительных технологий лазерной сварки и наплавки для современного судостроения / В. В. Веселков, Н. А. Афанасьев, А. Г. Жмуренков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-143-156.

Введение

Современный этап развития машиностроительной отрасли и судостроения в частности характеризуется началом внедрения на ведущих судостроительных предприятиях мира технологий, кардинально меняющих облик этой достаточно консервативной отрасли. Данные изменения обусловлены возрастающими требованиями к работоспособности и надежности изделий при сохранении их конкурентоспособной стоимости. Комплексное применение современных лазерных технологий является одним из путей повышения качества судостроительной и машиностроительной продукции и, при условии высокой степени загрузки производства, способно обеспечить стоимость, сопоставимую со стоимостью таких же изделий, изготовленных традиционными методами. Стоит отметить, что в промышленно развитых странах лазерная сварка и наплавка успешно используется уже в течение многих лет [1], [2].

Распространенной проблемой отечественного судостроения является применение технологий, не отвечающих современным требованиям к качеству готовой продукции. Ярким примером являются теплообменные аппараты типа ВХД, снабженные трубными решетками с плоскими трубками. При изготовлении данных узлов применить автоматизированные дуговые процессы весьма проблематично, поэтому для их изготовления использовалась технология пайки в печах, являющаяся наименее трудоемким способом изготовления трубных решеток. Необходимость индивидуального соединения трубки с трубной доской отсутствует, операция по изготовлению сводится к расплавлению припоя на фланце доски, фиксируя тем самым установленные с выпуском трубки. К сожалению, у данной технологии был выявлен существенный недостаток — низкая работоспособность паяных изделий в условиях интенсивных вибрационных нагрузок. Практика показала, что теплообменные аппараты типа ВХД, изготовленные методом пайки в печах, выходили из строя ранее, чем через 2000 ч работы. Ремонт вышедших из строя изделий являлся весьма трудоемким и приводил к значительным финансовым потерям. Выходом из данной ситуации стало применение на заводах-изготовителях ручной аргоно-дуговой сварки. Данная технология обеспечила требуемое качество изделий, но вследствие высокой трудоемкости процесса существенно выросло время изготовления (не менее 20 ч на сварку трубной решетки) и стоимость изделий.

Ещё одним примером применения традиционных технологий является плазменная наплавка клапанов судовых двигателей, способная обеспечить высокую твердость наплавленного слоя при сохранении пластичности основного металла, что положительно сказывается на работоспособности элемента и двигателя в целом. Основным её недостатком является деформация штока клапана вследствие высоких тепловложений и неравномерного нагрева в процессе наплавки. Зачастую пластические деформации штока настолько велики, что даже последующая механическая обработка припуска не позволяет добиться необходимых геометрических размеров, заложенных

в чертеже. В этом случае приходится применять технологии термической правки изделия, что является весьма трудоемким процессом.

С целью сокращения трудоемкости изготовления и повышения качества изделий судового машиностроения, АО «ЦТСС» была поставлена задача по разработке современных высокопроизводительных технологий лазерной сварки и наплавки.

Лазерная сварка трубных решеток теплообменных аппаратов сканирующим лучом

Отечественные предприятия, основываясь на опыте зарубежных коллег, все чаще отказываются от кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, оснащенных трубками круглого сечения, в пользу пластинчатых или плоскотрубчатых вследствие более высокого КПД последних. Но, несмотря на более низкую энергоэффективность, на данный момент кожухотрубчатые теплообменные аппараты с трубками круглого сечения все еще занимают большую долю рынка благодаря своей надежности и простоте изготовления.

Основным технологическим процессом при изготовлении кожухотрубчатых теплообменных аппаратов является соединение трубок с трубной доской (изготовление трубной решетки). С целью реализации данной операции в автоматическом / полуавтоматическом режиме наиболее часто используется оборудование для дуговой сварки различной конфигурации — это орбитальные TIG (TIG — сварка неплавящимся электродом в среде защитного инертного газа) головки и сварочные колонны. Лидерами по производству такого рода оборудования являются такие европейские компании как *Orbitalum Tools GmbH* (Германия), *Polysoude* (Франция), *MAUS* (Италия) (рис. 1).

а) б) в)

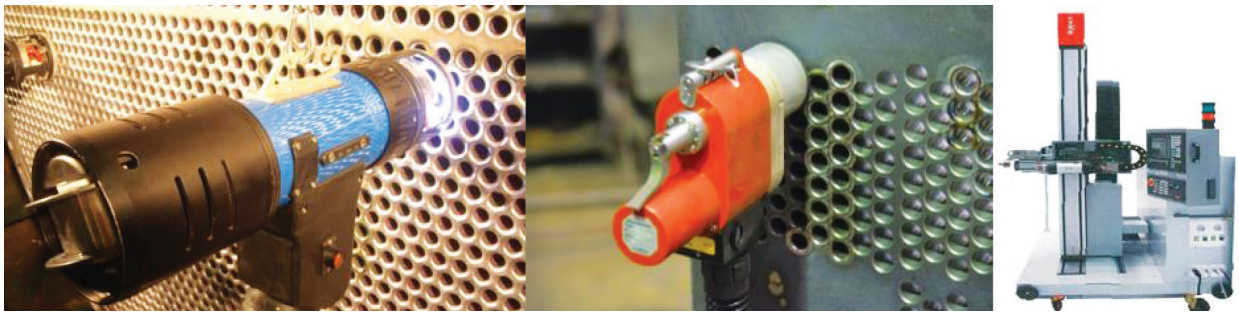


Рис. 1. Оборудование для сварки струбных решеток:
а — орбитальная головка *Orbitalum Tools GmbH* (Германия);
б — орбитальная головка *Polysoude* (Франция); *в* — сварочная колонна *MAUS* (Италия)

Данное оборудование позволяет производить, как правило, вварку трубок только круглого сечения, при этом внутренний диаметр трубки ограничен фиксирующим центратором и не может составлять менее 6 мм. Отечественных аналогов оборудование не имеет, а основной его недостаток — отсутствие универсальности.

Помимо орбитальных головок для TIG сварки, применяются дуговые горелки в сочетании с различным механизированным оборудованием, в том числе роботизированным, при помощи которого возможна реализация технологии вварки трубок различного поперечного сечения в трубную доску, но основными недостатками, как и при орбитальной TIG сварке, остаются относительно большие тепловложения, малая глубина проплавления и сложность реализации технологии сварки малых толщин.

С целью устранения проблем, возникающих при традиционных методах изготовления трубных решеток, АО «ЦТСС» совместно с ФГАОУ ВО «СПбПУ» была предложена технология роботизированной лазерной сварки, являющаяся «универсальной» — для вварки трубок с различным поперечным сечением (рис. 2), а также сварки иных тонкостенных изделий.

а) б) в)

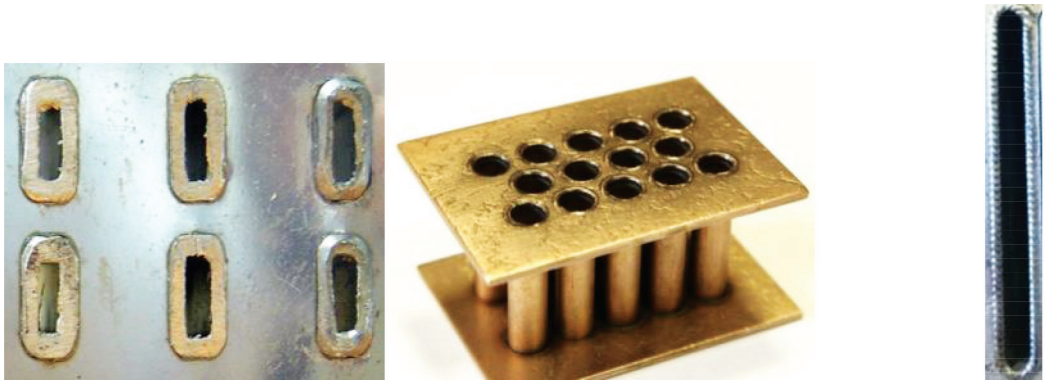


Рис. 2. Трубные решетки различной конфигурации:
а — с трубками прямоугольного сечения; *б* — с трубками круглого сечения; *в* — с плоскими трубками

На основе предложенной технологии и учитывая опыт зарубежных коллег [3] – [5] был создан опытный образец роботизированного комплекса оборудования для лазерной сварки элементов теплообменных аппаратов (рис. 3), оснащенный иттербиевым оптоволоконным лазером и высокотехнологичной оптической головкой, предназначенной не только для фокусировки лазерного излучения, но и для отклонения луча при помощи управляемых подвижных зеркал.

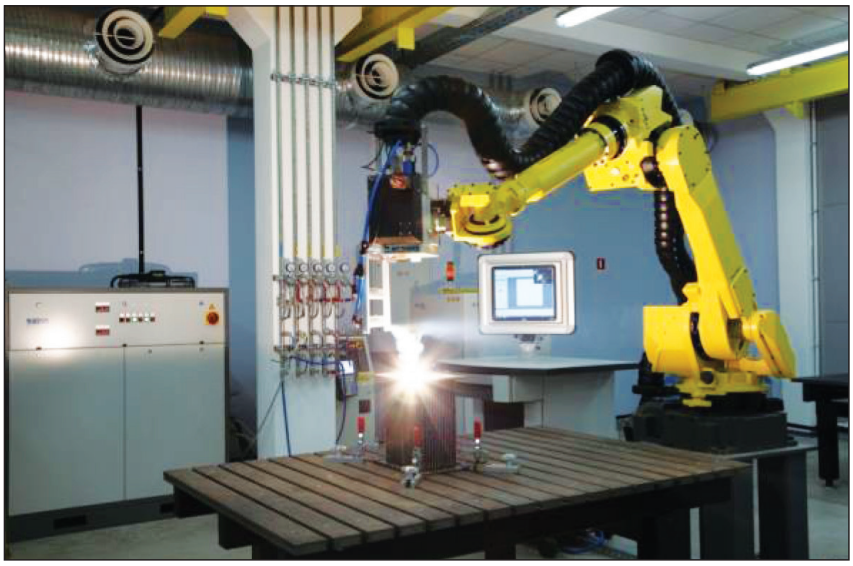


Рис. 3. Роботизированный комплекс
для лазерной сварки элементов теплообменных аппаратов

Принцип работы роботизированного комплекса при сварке трубных решеток заключается в следующем: иттербиевый волоконный лазер генерирует высококонцентрированный поток лазерного излучения (лазерный луч), передающийся по транспортному волокну к оптической головке, где он коллимируется, проходит через систему управляемых отражающих зеркал, расположенных внутри, и фокусируется на изделии. Управляемые зеркала позволяют произвести развертку луча по двум взаимно перпендикулярным осям в плоскости сварки и, соответственно, повторить контур любой сложности, ограничиваясь полем действия лазерной головки. При помощи робота, а также заложенной в комплекс оборудования программы управления имеется возможность разбить рабочую зону на несколько участков и произвести сварку каждого отдельного сегмента в заданной последовательности. Функциональная схема роботизированного комплекса для лазерной сварки представлена на рис. 4.

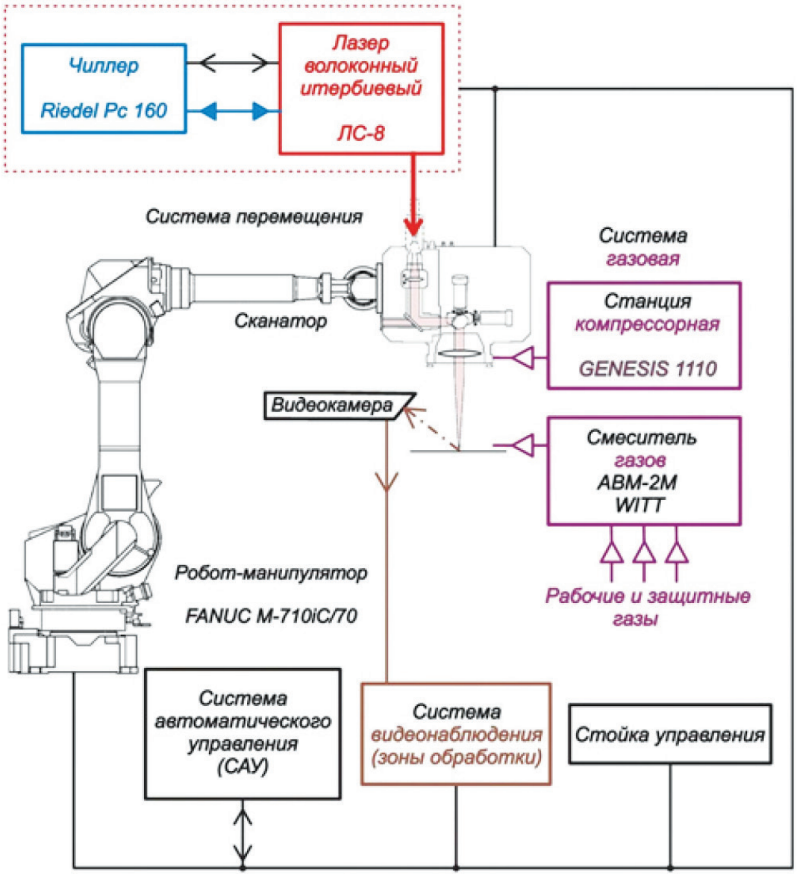


Рис. 4. Функциональная схема роботизированного комплекса для лазерной сварки трубных решеток

Благодаря тому, что траекторией движения луча по стыку управляют зеркала, нет необходимости в перемещении рабочего инструмента во время процесса сварки, что позволяет избавиться от инерционности комплекса и добиться высоких скоростей сварки.

Для апробации технологии была проведена работа по сварке макетов трубок и трубных решеток теплообменных аппаратов типа ВХД (рис. 5), применяемых для охлаждения дизельных двигателей. Работа проводилась совместно с АО «Завод «Буревестник», предоставившим материалы для отработки технологии.

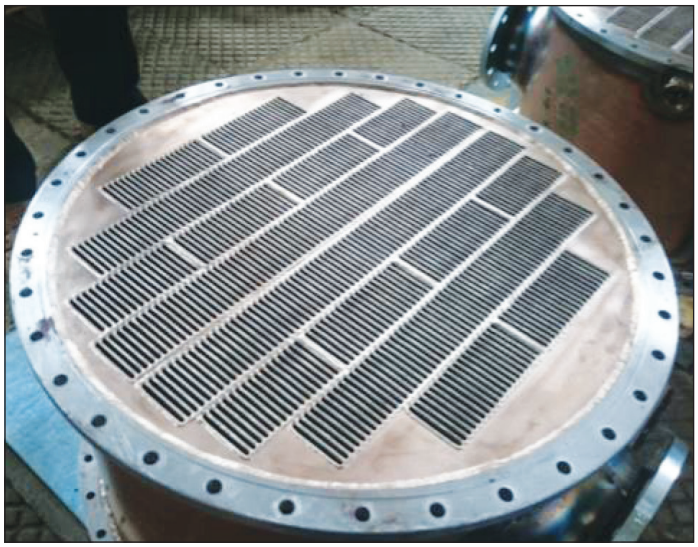


Рис. 5. Корпус теплообменного аппарата типа ВХД

При сварке трубок с трубной доской основной проблемой были неравномерные зазоры в стыках соединений, которые могли при этом изменяться в хаотичном порядке в процессе сварки из-за тепловых деформаций материала (рис. 6).

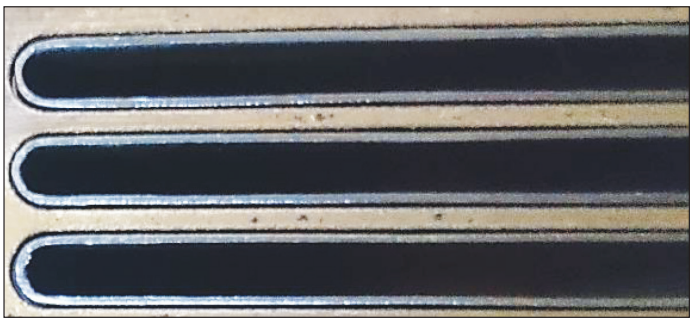


Рис. 6. Внешний вид зазоров между трубками и трубной доской

Лазерный луч, имея пятно в перетяжке фокуса 0,6 мм, при прохождении зазора в 0,5 мм по прямолинейной траектории не всегда сплавлял кромки, а при повторном проходе мог образовать прожог (рис. 7).



Рис. 7. Прожог стенки трубки в результате сварки в несколько проходов

Для решения проблемы сварки увеличенных зазоров и снижения требований к позиционированию рабочего инструмента была применена нестандартная траектория перемещения луча по стыку (рис. 8).

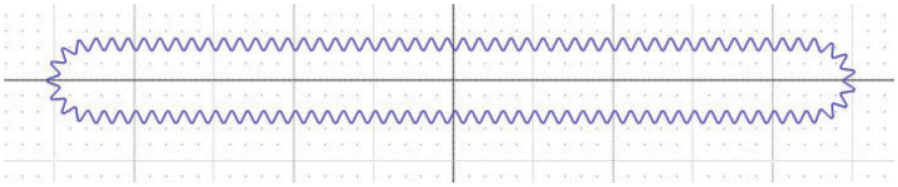


Рис. 8. Траектория перемещения луча по стыку

Примененная траектория движения лазерного луча не повторяла с точностью форму стыка, а проходила вдоль него с поперечными колебаниями. Данное решение позволило получать сварное соединение гарантированного качества за один проход (рис. 9) даже в том случае, если перед сваркой зазор составлял 0,5 мм.

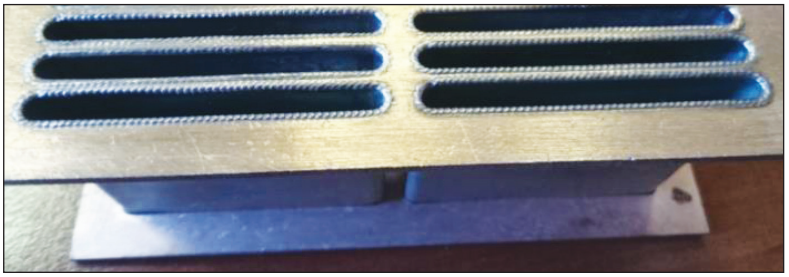


Рис. 9. Соединения, сваренные по траектории с поперечными колебаниями

После апробации технологии с её помощью были изготовлены образцы трубных решеток и проведены их испытания на герметичность методом избыточного гидравлического давления 15 бар. Образцы успешно прошли испытания, что подтвердило возможность использования данной технологии в промышленных целях. Помимо этого, данное технологическое решение было перенесено на процессы сварки трубок круглого сечения с трубной доской, где также получило положительные эффекты от применения (рис. 10).

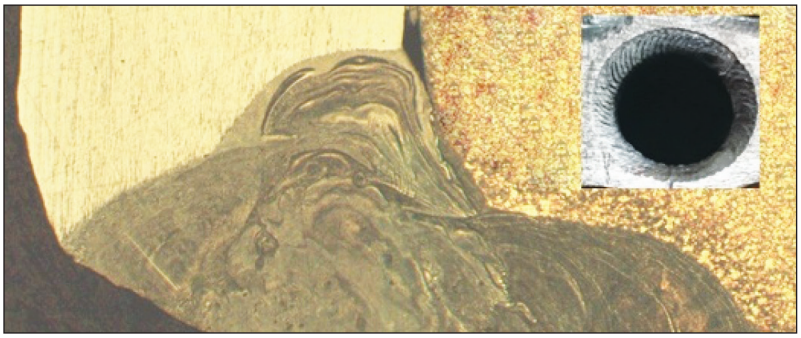


Рис. 10. Внешний вид и микрошлиф
сварного соединения трубки круглого сечения с трубной доской

Лазерная наплавка клапанов судовых двигателей

В настоящее время разработаны и широко применяются в промышленности различные способы наплавки металлических материалов: электродуговая, плазменная, газовая, лазерная, электроконтактная и др. Основными требованиями, предъявляемым к процессу наплавки являются: высокие физико-механические свойства поверхностного слоя (твердость, теплостойкость, жаропрочность и др.), обеспечение прочного и надежного сцепления металла основного и присадочного металла, исключение образование пор и трещин, снижение остаточных напряжений и деформаций, увеличение коэффициента использования присадочного материала, снижение стоимости процесса [6].

Существует много традиционных способов наплавки, предназначенных для восстановления геометрических размеров изношенных изделий и придания заданных функциональных свойств поверхностному слою, но ни один из них не является универсальным, так как функциональные и / или геометрические характеристики наплавленных слоев и изделий в целом не всегда удовлетворяют техническим требованиям эксплуатации машин и механизмов. Так, например, плазменная наплавка (рис. 11) не позволяет в полной мере решить задачи, которые ставятся на современном этапе развития производства. Это связано с высокими деформациями изделий, низкой производительностью процесса наплавки, образованиями трещин в наплавленном слое, ухудшениями свойств наплавленного металла из-за перемешивания с основой, а также с ограниченной возможностью контроля геометрических параметров наплавленного слоя, что делает невозможным обработку малогабаритных изделий и наплавку в труднодоступных местах.

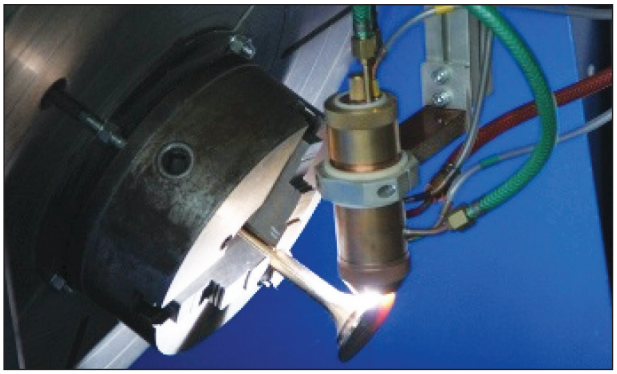


Рис. *11.* Плазменная порошковая наплавка клапана

Ключ к решению данных проблем лежит в разработке и внедрении принципиально новых эффективных автоматизированных технологий лазерной наплавки. Лазерные технологии (рис. 12) позволяют получить детали требуемого качества, увеличить точность обработки, уменьшить деформации наплавляемых изделий, снизить трудозатраты на последующую обработку, а также наносить наплавочные слои на поверхность сложных изделий с минимальным тепловложением, что делает возможным локальную наплавку участков деталей без перегрева основы.

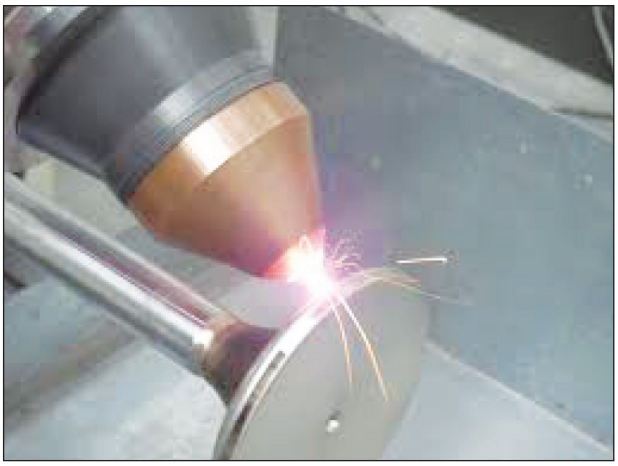


Рис. 12. Лазерная порошковая наплавка клапана

Лазерная порошковая наплавка может быть весьма эффективна как при восстановлении изношенных деталей, так и при изготовлении изделий с улучшенными или принципиально новыми свойствами прежде всего в тех случаях, когда другие методы обработки либо неприемлемы, либо не обеспечивают требуемого качества и свойств наплавочных слоев.

Лазерная наплавка, как технология ремонта, востребована компаниями, которые занимаются ремонтом и восстановлением ответственных деталей и узлов в двигателестроении. Лазерные технологии применяются при восстановлении лопаток компрессоров газотурбинных двигателей и парогенераторов [7], изготовлении и ремонте деталей авиационных двигателей [8], ремонте пресс-форм [9], восстановлении изношенных поверхностей шеек осей вагонных колесных пар [10]. В судовом машиностроении технологии лазерной наплавки целесообразно применять при ремонте и изготовлении ответственных дорогостоящих деталей и узлов из современных сплавов, работающих в агрессивных средах и / или при повышенных механических нагрузках. С целью реализации технологии лазерной наплавки изделий судового машиностроения был разработан и изготовлен роботизированный комплекс (рис. 13).



Рис. 13. Роботизированный комплекс лазерной порошковой наплавки

Комплекс построен на модульном принципе, позволяющим изменять число модулей, входящих в состав комплекса путем увеличения, уменьшения или их замены, что дает возможность адаптировать комплекс для решения различных задач — как исследовательских, так и практических, с применением лазерных технологий.

Одним из направлений экспериментальных исследований являлось выявление возможности применения лазерной газопорошковой наплавки для упрочнения клапанов судовых двигателей, с целью увеличения их работоспособности при циклических нагрузках. Основной задачей при этом было получение упрочненной поверхности тарелки клапана, торцевая поверхность которой подвергается большому влиянию механических и тепловых нагрузок, и подвержена износу (рис. 14).



Рис. 14. Поврежденная поверхность клапана

Для исследований использовался клапан из стали 45, химический состав которой представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали 45

Материал клапана	Химический состав сплава, %													Габаритные размеры, мм		
	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo	Ti	Co	Fe	Cu	Al	S	P	*L*	*D*1	*D*2
Сталь 45	0.42 – 0,50	0,17 – 0,37	≤ 0,25	≤ 0,3	0,5 – 0,8	–	–	–	Основа	≤0,3	–	≤ 0,04	≤ 0,035	150 – 1100	8 – 50	50 – 200

Изначально был выполнен комплекс предварительных экспериментальных исследований и определены оптимальные диапазоны рабочих параметров лазерной газопорошковой наплавки с учетом технологических особенностей процесса. На первом этапе выполнялась лазерная наплавка на пластину из стали 45 (рис. 15), с использованием металлического порошка на кобальтовой основе EuTroLoy 16006 производства *Castolin Eutectic*. Химический состав порошка приведен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав и твердость металлического порошка, используемого в исследовании

Тип порошка	Массовая доля элементов, %;								Твердость порошка HV
	C	Si	Cr	W	Ni	Mo	Fe	Co	
EuTroLoy 16006	1,2	1,23	28,7	4,7	1,9	0,01	1,9	основа	425

Гранулы порошка EuTroLoy 16006 имеют сферическую форму, размер частиц — от 50 до 150 мкм. Порошок имеет высокую стойкость к абразивному износу в условиях давления и ударов, имеет стойкость к высокой температуре и коррозии, применяется при температурах до 750 °С, имеет низкий коэффициент трения, является стойким к адгезионному износу.

Перед процессом наплавки порошок подвергался сушке в шкафу при температуре плюс 300 °С в течение 30 мин. Процесс сушки является неотъемлемой операцией, проводимой перед процессом порошковой наплавки. Использование порошка с повышенным содержанием влаги ведет к росту порообразования и снижению качества восстановленного участка. Пластина также была предварительно нагрета до температуры 250 – 300 °С. Соблюдение этого условия необходимо для исключения образования трещин в процессе остывания изделия, вследствие усадки присадочного материала.

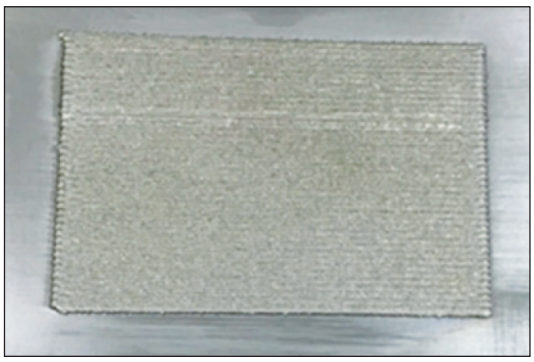


Рис. 15. Пластина с наплавленными слоями

Для обеспечения требуемой геометрии рабочей поверхности после лазерной порошковой наплавки необходима ее механическая обработка. Первичная механическая обработка наплавленной пластины была проведена на токарном станке. Припуск на механическую обработку наплавленного слоя составлял от 0,1 до 0,3 мм. Завершающей обработкой было выполнено шлифование наплавленной поверхности пластины. Толщина наплавленного слоя после всех шагов механической обработки составила 4,2 мм.

Для подтверждения качества наплавленной лазерной порошковой наплавкой поверхности были выполнены следующие исследования:

– визуальная оценка качества наплавленной поверхности;

– металлографическое исследование наплавленной поверхности в поперечном сечении и на границе с основным металлом;

– определение значений микротвердости наплавленной поверхности в поперечном сечении и на границе с основным металлом.

Визуальный осмотр и металлографические исследования не выявили наличие поверхностных или внутренних дефектов в наплавленном слое.

Исследование микротвердости наплавленной поверхности пластины показало существенное увеличение твердости в зоне термического влияния, при сохранении пластичности основного материала (рис. 16).

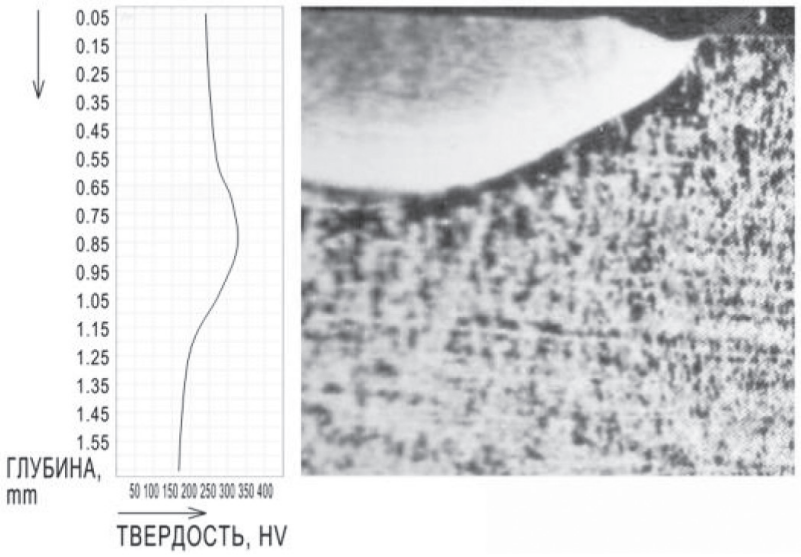


Рис. 16. Исследование микротвердости наплавленного слоя

Результаты исследований показали отсутствие дефектов в наплавленных слоях и подтвердили их высокие механические свойства. В табл. 3 представлены технологические режимы, на которых отрабатывалась технология наплавки на плоскую пластину из стали 45.

Таблица 3

Технологические режимы лазерной наплавки на плоские пластины

Номер пластины	Мощность излучения, кВт	Скорость наплавки мм/с	Скорость подачи порошка, г/мин	Скорость подачи газа, л/мин	Положение фокуса, мм	Примечания
1	1,3	22	55	10	+1	Плохое формирование
2	1,2	22	55	10	+4	Нестабильное формирование
3	1,2	20	50	10	+8	Ровный высокий валик
4	1,2	20	50	10	+12	Хорошее формирование
5	1,1	18	45	10	+16	Отсутствие формирования

По результатам экспериментальных исследований определены диапазоны рабочих параметров процесса, которыми следует руководствоваться при лазерной наплавке на клапан судового двигателя.

Лазерная наплавка рабочей поверхности клапана из стали 45 производилась в горизонтальном положении по круговой траектории изношенной торцевой поверхности тарелки клапана (рис. 17). Диаметр тарелки — 75 мм, толщина — 8 мм. Восстанавливаемая поверхность клапана перед наплавкой была механически обработана на глубину до 1 мм (рис. 18).

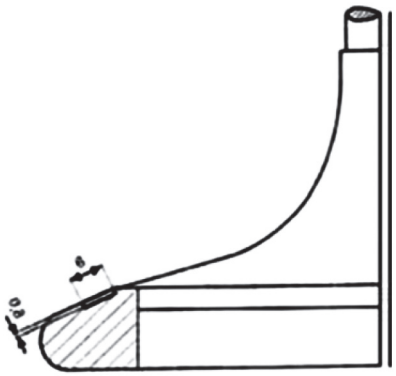


Рис. 17. Торцевая поверхность тарелки клапана для лазерной порошковой наплавки

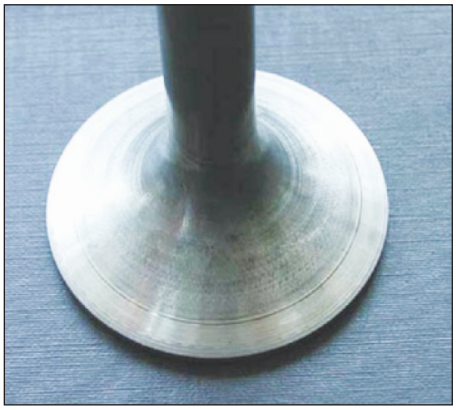


Рис. 18. Подготовленная поверхность тарелки клапана для лазерной порошковой наплавки

Затем клапан был установлен и закреплен в горизонтальном положении на позиционере, входящем в состав модуля перемещения. Манипулятор обеспечивал точное положение оптической головки относительно поверхности клапана. Наплавка слоев осуществлялась внахлест с перекрытием предыдущего слоя примерно на 25 – 30 %. Вид первого слоя наплавленной поверхности клапана, полученной при восстановлении рабочей поверхности клапана с использованием металлического порошка EuTroLoy 16006, изображен на рис. 19.



Рис. 19. Вид наплавленной поверхности клапана

Проведенные исследования наплавленных на клапан слоев также подтвердили их высокие механических свойства, что позволит существенно увеличить его работоспособность при циклических нагрузках.

Таким образом, технология лазерной наплавки, за счет высококонцентрированного точечного ввода тепла, позволила избавиться от проблем, присущих традиционным методам, и обеспечила изготовление клапанов двигателей с необходимыми свойствами практически в чистый размер.

Заключение

Основываясь на положительных результатах, полученных в процессе работ, специалистами АО «ЦТСС» сделан вывод, что оборудование и технологии лазерной сварки и наплавки имеют высокую гибкость и «универсальность» в применении, обладают большими потенциальными возможностями, могут быть использованы на предприятиях-изготовителях упомянутой продукции и способны поднять на качественно новый уровень процессы ремонта и восстановления изделий судового машиностроения.

Перспективность применения лазерных технологий обработки материалов — одно из стратегически важных направлений развития современного мира. Их эффективность доказана использованием в различных отраслях промышленности. Комплексное внедрение высокоэффективных лазерных технологий в судостроительную отрасль позволит промышленным предприятиям выйти на качественно новый уровень производства, сохранив при этом низкую себестоимость изготовления изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Москвитин Г. В.* Применение методов лазерной сварки в современном промышленном производстве (обзор) / Г. В. Москвитин, А. Н. Поляков, Е. М. Биргер // Сварочное производство. — 2012. — № 6. — С. 36–47.

2. *Лопота В. А.* Новые технологии термообработки, сварки и наплавки материалов с использованием волоконных лазеров большой мощности / В. А. Лопота, Г. А. Туричин, И. А. Цибульский [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. — 2012. — № 10. — С. 6–13.

3. *Schulze V. B.* Remote welding with 3D scanners / V. B. Schulze, M. Lingner // Laser+Photonics. — 2013. — No. 3. — Pp. 38–40.

4. *Туричин Г. А.* Особенности формирования структуры сварных соединений при лазерной сварке разнородных материалов систем Al – Cu, Al – Ti / Г. А. Туричин, О. Г. Климова, К. Д. Бабкин // Цветные металлы. — 2014. — № 4 (856). — С. 45–50.

5. *Regaard B.* Seam-tracking for high precision laser welding applications - Methods, restrictions and enhanced concepts / B. Regaard, S. Kaierle, R. Poprawe // Journal of Laser Applications. — 2009. — Vol. 21. — Is. 4. — Pp. 183–195. DOI: 10.2351/1.3267476.

6. *Григорьянц А. Г.* Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 663 с.

7. *Земляков Е.* Перспективы использования технологии лазерной наплавки для восстановления лопаток компрессоров газотурбинных двигателей / Е. Земляков, К. Бабкин, Р. Корсмик [и др.] // Фотоника. — 2016. — № 4 (58). — С. 10–25. DOI: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.10.22.

8. *Ермолаев А. С.* Лазерные технологии и процессы при изготовлении и ремонте деталей газотурбинного двигателя / А. С. Ермолаев, А. М. Иванов, С. А. Василенко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. — 2013. — № 35. — С. 49–63.

9. *Смелов В. Г.* Технология импульсной лазерной наплавки при ремонте пресс-форм / В. Г. Смелов, А. В. Сотов, Р. Р. Кяримов [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2015. — Т. 14. — № 3–2. — С. 432–437. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-432-437.

10. Пат. 2107598 Российская Федерация, МПК B 23 K 26/00, B 23 P 6/00. Способ восстановления изношенных поверхностей шеек осей вагонных колесных пар путем лазерной наплавки / В. С. Глазков, И. Д. Козубенко, Ю. С. Радионов [и др.]; заявитель и патентообладатель В. С. Глазков, И. Д. Козубенко, Ю. С. Радионов [и др.]. — № 96101610/02; Заявлено 29.01.1996; Опубл. 27.03.1998.

REFERENCES

1. Moskvitin, G. V., A. N. Polyakov, and Ye. M. Birger. “Application of laser welding methods in modern industrial production (review).” *Svarochnoe proizvodstvo* 6 (2012): 36–47.

2. Lopota, V. A., G. A. Turichin, I. A. Tsibul’sky, E. V. Zemlyakov, and E. A. Valdaytseva. “New technologies of heat treatment, welding and materials surfacing using high power fiber lasers.” *Zagotovitel’nye proizvodstva v mashinostroenii* 10 (2012): 6–13.

3. Schulze, V. B., and M. Lingner. “Remote welding with 3D scanners.” *Laser+Photonics* 3 (2013): 38–40.

4. Turichin, G. A., O. G. Klimova, and K. D. Babkin. “Specifics of structure formation of welded joints during laser welding of dissimilar materials of Al - Cu and Al - Ti-systems.” *Tsvetnye Metally* 4(856) (2014): 45–50.

5. Regaard, Boris, Stefan Kaierle, and Reinhart Poprawe. “Seam-tracking for high precision laser welding applications—Methods, restrictions and enhanced concepts.” *Journal of Laser Applications* 21.4 (2009): 183–195. DOI: 10.2351/1.3267476.

6. Grigor’yants, A. G., I. N. Shiganov, and A. I. Misyurov. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki*. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2006.

7. Zemlyakov, E., K. Babkin, R. Korsmik, M. Sklyar, and M. Kuznetsov. “Prospects of Use of Laser Cladding Technology for Restoration of Compressor Blades of Gas Turbine Engines.” *Photonics* 4(58) (2016): 10–25. DOI: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.10.22.

8. Ermolaev, A. S., A. M. Ivanov, and S. A. Vasilenko. “Laser technology and processes when manufacturing and repair of details of the gas-turbine engine.” *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin* 35 (2013): 49–63.

9. Smelov, V. G., A. V. Sotov, R. R. Kyarimov, and A. V. Agapovichev. “Technology of pulsed laser surface coating in pressing tool repair.” *Vestnik of Samara university. Aerospace and mechanical engineering* 14.3-2 (2015): 432–437. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-432-437.

10. Glazkov, V. S., I. D. Kozubenko, Yu. S. Radionov, A. P. Korchagin, et al. RU 2 107 598 C1, IPC B 23 K 26/00, B 23 P 6/00. Sposob vosstanovleniya iznoshennykh poverkhnostei sheek osei vagonnykh kolesnykh par putem lazernoi naplavki. Russian Federation, assignee. Publ. 27 March 1998.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Веселков Вячеслав Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: *VeselkovVV@gumrf.ru*

Афанасьев Николай Александрович —
ведущий инженер-технолог, аспирант
Научный руководитель:
Веселков Вячеслав Васильевич
АО «Центр технологии судостроения
и судоремонта»
198095, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Промышленная 7
e-mail: *3221@sstc.spb.ru*

Жмуренков Артем Германович —
инженер-технолог 1-й кат., аспирант
Научный руководитель:
Веселков Вячеслав Васильевич
АО «Центр технологии судостроения
и судоремонта»
198095, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Промышленная, 7
e-mail: *armet27@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Veselkov, Vyacheslav V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *VeselkovVV@gumrf.ru*

Afanasev, Nikolay A. —
lead production engineer, postgraduate
Supervisor:
Veselkov, Vyacheslav V.
JSC “Shipbuilding & Shiprepair
Technology Center”
7 Promyshlennaya Str., St. Petersburg, 198095,
Russian Federation
e-mail: *3221@sstc.spb.ru*

Zhmurenkov, Artem G. —
production engineer, postgraduate
Supervisor:
Veselkov, Vyacheslav V.
JSC “Shipbuilding & Shiprepair
Technology Center”
7 Promyshlennaya Str., St. Petersburg, 198095,
Russian Federation
e-mail: *armet27@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2016 г.
Received: December 21, 2016.