О РАЗВИТИИ СВАРКИ В РОССИИ

Международная конференция «Сварка в России–2019: современное состояние и перспективы» проходила в год 100-летия со дня рождения Б.Е. Патона в г. Томске в Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) в период 3–7 сентября 2019 г.

Более 400 участников от 74 организаций из России, Белоруссии, Казахстана, Китая, Ирака представили 96 устных и 45 постерных докладов, из которых 46 на английском языке для публикации в сборнике IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, индексируемом в Scopus.

В пленарных и секционных докладах были отражены современные достижения и тенденции развития сварочных технологий в практике российского и мирового промышленного производства, представлены результаты фундаментальных, ориентированных и прикладных исследований, показаны перспективы их применения в условиях промышленного производства России. Особое внимание было уделено новым сварочным технологиям, развиваемым в научных, учебных и научно-производственных учреждениях России, в том числе: адаптивным импульсно-дуговым методам сварки, сварки в условиях остаточного намагничивания, электронно-лучевой и лазерной сварки, сварки взрывом, аддитивным технологиям, сварке трением с перемешиванием. Были рассмотрены вопросы, связанные с созданием нового поколения источников питания для сварки с цифровым управлением, а также разработки и производства новых перспективных сварочных материалов, современных методов и систем диагностики быстропротекающих процессов.

Участники конференции констатировали, что современное состояние сварочного производства требует реализации высокого уровня применения систем интеллектуального управления. Оно обосновывает необходимость автоматизации производственных процессов, повышение производительности технологий сварки, повышение качества и надежности конструкций ответственного назначения, работающих при экстремальных условиях и низких климатических температурах. Важной составляющей развития современных сварочных технологий является необходимость перехода к передовым цифровым, роботизированным и адаптивным системам, применения новых материалов и способов их конструирования, создания систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

Отмечая значимость развития промышленного производства в РФ на основе необходимости усиления такого важного направления, как Сварка, родственные процессы и технологии, участники конференции считают необходимым:

1. Создать Институт сварки России, которому можно было бы поручить полномочия головной организации в области сварки и родственных технологий. В качестве базовых предприятий могут быть рекомендованы: Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт», С.-Петербург, Россия, научно-производственное объединение «ЦНИИТМАШ», Москва.

2. При президиуме РАН возродить деятельность Национального комитета по сварке с обязательным участием производственных организаций, который до 2015 года возглавлял академик РАН И.В. Горынин.

3. Включить в перечень критических технологий РФ дополнительный пункт:

П. 28. Сварка, родственные процессы и технологии для создания и ремонта технических систем ответственного и специального назначения, в том числе для эксплуатации при экстремальных условиях и низких климатических температурах Арктики и Крайнего Севера.

4. Сформировать государственную научно-техническую программу «Развитие сварочного производства России на основе внедрения в производстве результатов фундаментальных, ориентированных и прикладных исследований, новых импортозаменяющих материалов, оборудования и перспективных технологий».

Участники признали целесообразным ежегодное проведение конференций «Сварка в России: современное состояние перспективы» в мультидисциплинарном формате в различных регионах Российской Федерации.

Подробнее http://www.wr2019.ispms.ru/

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА: ИСТОРИЯ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ОБЛАДАЕТ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ И СТЕПЕНЬЮ АВТОМАТИЗАЦИИ, ВЫСОКИМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ, БЛАГОДАРЯ ЧЕМУ С УСПЕХОМ ПРИМЕНЯЕТСЯ В АВТОМОБИЛЕ- И СУДОСТРОЕНИИ, В АТОМНОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ, В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ И НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, В МАШИНОСТРОЕНИИ И ЭНЕРГЕТИКЕ, В ВПК. БЛАГОДАРЯ ПОЯВЛЕНИЮ МОЩНЫХ СИНИХ И ЗЕЛЕНЫХ ЛАЗЕРОВ ОНА ИМЕЕТ САМЫЕ ШИРОКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ.

А.Г. Игнатов

Лазерная сварка (ЛС) применяется уже более полувека: в 60-х годах это были рубиновые лазеры, а в 70-х — CO_2-лазеры и твердотельные АИГ с неодимом [1, 2]. Наибольшее распространение в России получили российские установки типа «Квант». В конце 80-х в России были созданы технологические CO_2-лазеры (лабораторные) мощностью до 12/15–30/50 кВт в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (г. Ленинград) [3] и промышленные до 20 кВт в КМЗ «Союз» (г. Казань).

Применение CO_2-лазеров мощностью до 25 кВт в промышленности США и ФРГ началось в 80-х годах. Использовались CO_2-лазеры модульной конструкции, например, компании United Technologies Industrial Lasers мощностью 25 кВт (США), мощностью 22 кВт в ФРГ. В 90-х начали применять для сварки наиболее надежные и совершенные лазеры японской фирмы Fanuc (до 6 кВт), немецких фирм: TRUMPF (до 20 кВт) и ROFIN SINAR (до 8 кВт). Во Франции, в исследовательском центре, был запущен пятидесятикиловаттный лазер, а в Японии на металлургическом производстве 2 лазера по 45 кВт. К концу 90-х фирмами ROFIN SINAR и TRUMPF была достигнута мощность 4–6 кВт для твердотельных Nd-YAG и дисковых лазеров.

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Сегодня для сварки поставляются волоконные лазеры мощностью до 30–100 кВт международной корпорацией IPG (**рис. 1**), дисковые лазеры — немецкой компанией TRUMPF, диодные лазеры мощностью до 30–60 кВт — немецкой фирмой Laserline. Необходимо отметить также ведущих мировых производителей лазеров: COHERENT/ROFIN и SPI lasers [5–8]. В ближайшие годы следует ожидать активную экспансию на мировой рынок китайских производителей (**рис. 1г**).

В лазерной резке и сварке, других технологиях обработки материалов идет вытеснение традиционных CO_2-лазеров волоконными и диодными, дисковыми лазерами [5–8].

Для лазерной сварки с качественным сквозным проплавлением необходимо 0,5–1 кВт лучевой мощности на 1 мм толщины провариваемой стали/сплава (**рис. 2–4**) [9–17].

Основные параметры лазерной и лазерно-дуговой сварки, определяющие качество процесса, и, соответственно, сварных соединений, приведены на **рис. 5**.

Дополняет ее классификация технологии лазерной сварки волоконными лазерами IPG Грезева Н.В. [14],

Рис. 1. Промышленные лазеры а) волоконные лазеры НПО «ИРЭ-ПОЛЮС»/IPG мощностью излучения 2–100 кВт (и ≥), б) дисковый лазерный модуль серии TruDisk (мощностью от 1 до 16 кВт и ≥) компании TRUMPF, в) диодные лазеры компании Laserline (до 45 кВт и ≥) , г) 25 кВт китайский лазер компании Maxphotonics Co. Подробнее см. на сайтах компаний.

б)

в)

г)

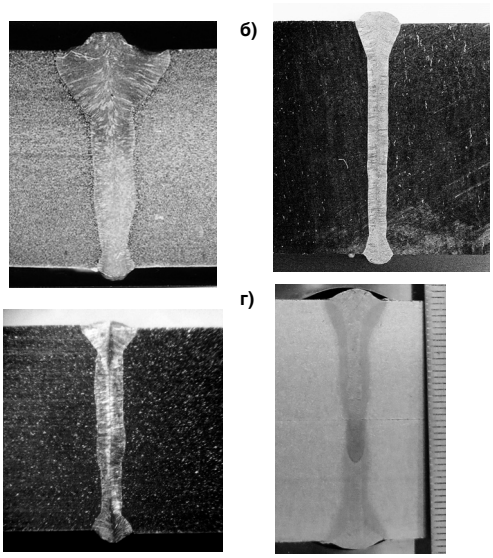


Рис. 2. Макрошлифы, выполненные: а) 15 кВт CO_2-лазером «Ижора-М» (сталь 08Х18Н10 Т, δ = 12 мм, Р = 10,5 кВт, $V_{св}$ = 12 мм/с, гелий) [9–10]; б) 15 кВт волоконным лазером на скорости $V_{св}$ = 50 мм/с, сталь 316L, δ = 7 мм; в) сталь ХМ-19, δ = 10 мм — [11–13]; г) двухпроходной гибридной сваркой (δ = 40 мм) [14]

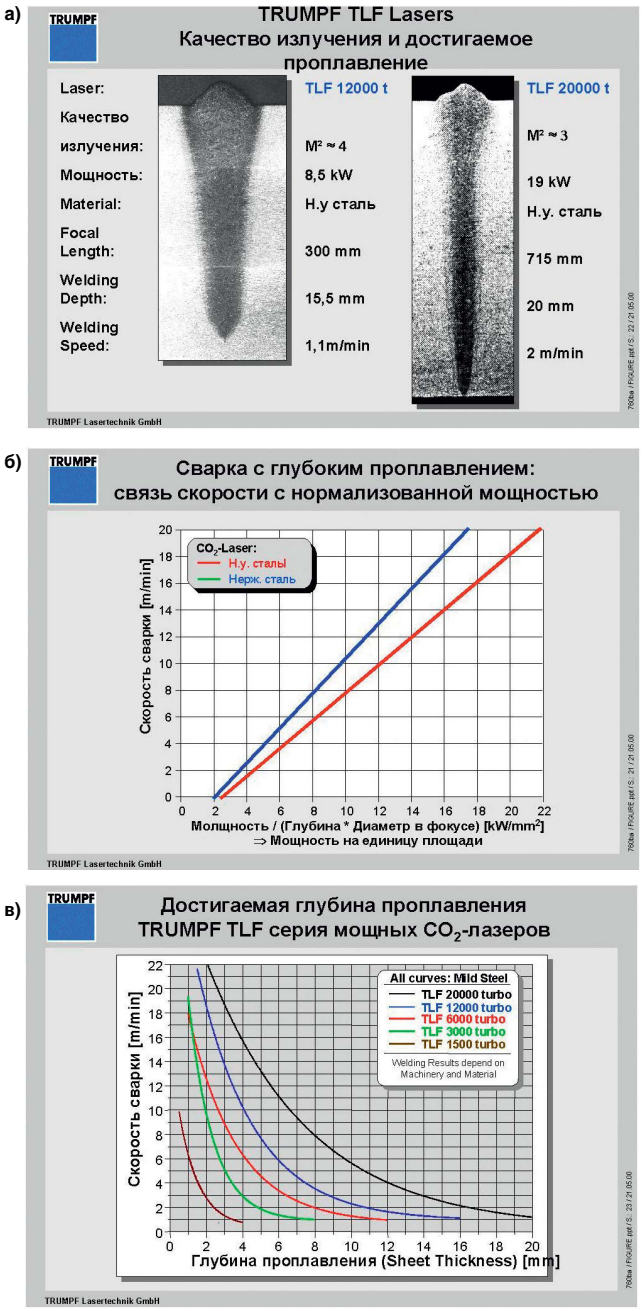


Рис. 3. Влияние качества излучения (а) и мощности излучения, скорости сварки на проплавление (б), с нормализованными параметрами (в) при лазерной сварке CO_2-лазерами большой мощности фирмы TRUMPF (ФРГ, данные 80-х годов)

которая учитывает: наличие дополнительных источников нагрева, количество проходов, типы сварных соединений (**рис. 6, 7**) и сварочных головок, защиты сварных швов, параметров фокального пятна и применяемых присадочных материалов, форму (геометрию) получаемого сварного шва.

Лазерная сварка обладает высокой производительностью и степенью автоматизации, высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами, обеспечивает значительное снижение деформаций сварных конструкций. Сварные соединения, как правило, выдерживают статический изгиб на 180° (даже на судокорпусной стали типа АК), а при испытании на растяжение и ударный изгиб образцы разрушаются по основному металлу, поскольку

- Высококачественная размерная обработка: сварка, резка, гравировка, фрезеровка, скрайбирование, прошивка отверстий, наплавка
- Волоконный QCW-лазер мощностью 150, 300 и 600 Вт
- Реализации задач сварки, резки, гравировки и наплавки на одном станке
- Последовательное или одновременное включение координат
- 3, 4 и 5 программируемымх осей
- Размеры рабочей зоны 300×400×250 мм

ГРУППА КОМПАНИЙ ЛАЗЕРЫ И АППАРАТУРА

+7 499 710 00 53 sales@laserapr.ru www.laserapr.ru

lia_laserapr lia_laserapr

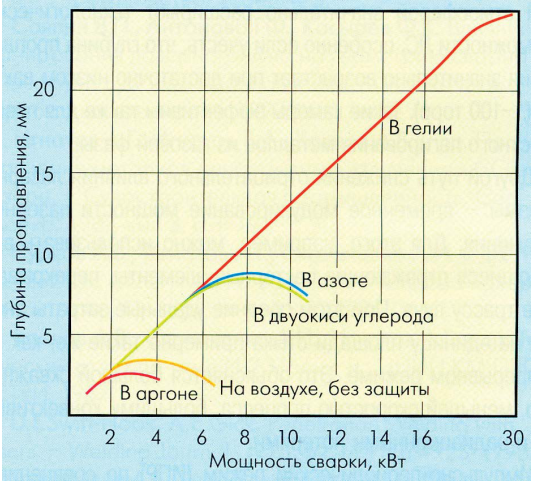


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления стали CO_2-лазерами в 80-х годах [10]

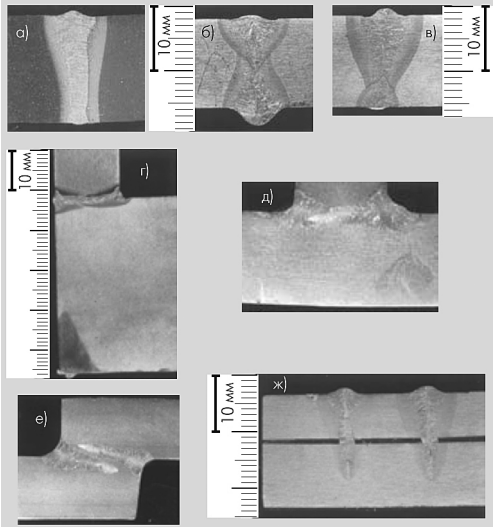


Рис. 6. Макрошлифы сварных соединений: стыкового одностороннего (а), двухстороннего (б), с подваркой корня шва (в), толщиной 12 мм; углового (г), таврового (д), нахлесточного (е), проплавного 3-слойного (ж). Использовалась корпусная сталь 09Г2С (а), высокопрочная сталь 12ХН4МДА (б–г, ж), высоколегированная коррозионностойкая сталь 08Х18Н10Т (д–ж). Сварка выполнялась на CO_2-лазере «Ижора-М» [10, 15]

из-за высокой скорости лазерной сварки шов и ЗТВ имеют мелкозернистую, мелкодисперсную структуру (**рис. 8, 9б, в**) [16,17].

Из-за высокой скорости лазерной сварки, например, в автомобилестроении, при дистанционной сварке (с фокусным расстоянием до 1 м) газовая защита сварных швов не применяется, хотя, казалось бы, невозможно обходиться без защиты сварных швов.

Сложности возникают при лазерной сварке без сквозного проплавления, при сварке двухсторонних, тавровых и нахлесточных (**рис. 6б–ж**), многопроходных соединений (**рис. 10**). В этом случае могут возникать корневые дефекты, поры и трещины [18,19], особенно на трудносвариваемых и «грязных» («кипящих») сталях (**рис. 9а**), хотя, как известно, такие стали не рекомендованы к применению в ответственных сварных конструкциях, но тем не менее иногда применяются, несмотря на запреты.

Авторы [14] для устранения корневых дефектов успешно используют сканирование лазерного пучка — **рис. 9б, в**.

Одним из ограничений применения лазерной сварки является требование качественной сборки — без зазоров. Требования к сборке удается снизить с 0,1 до

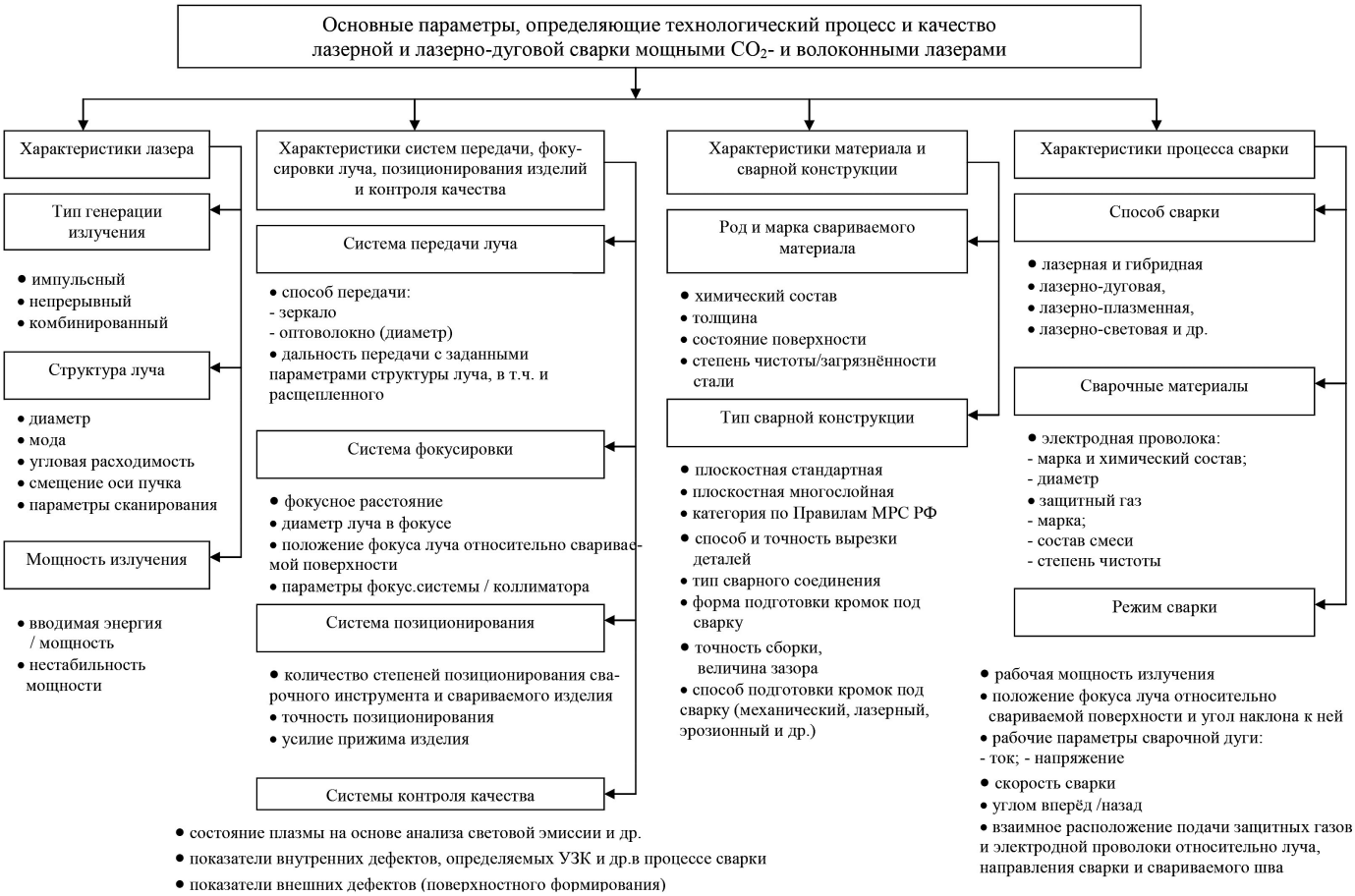
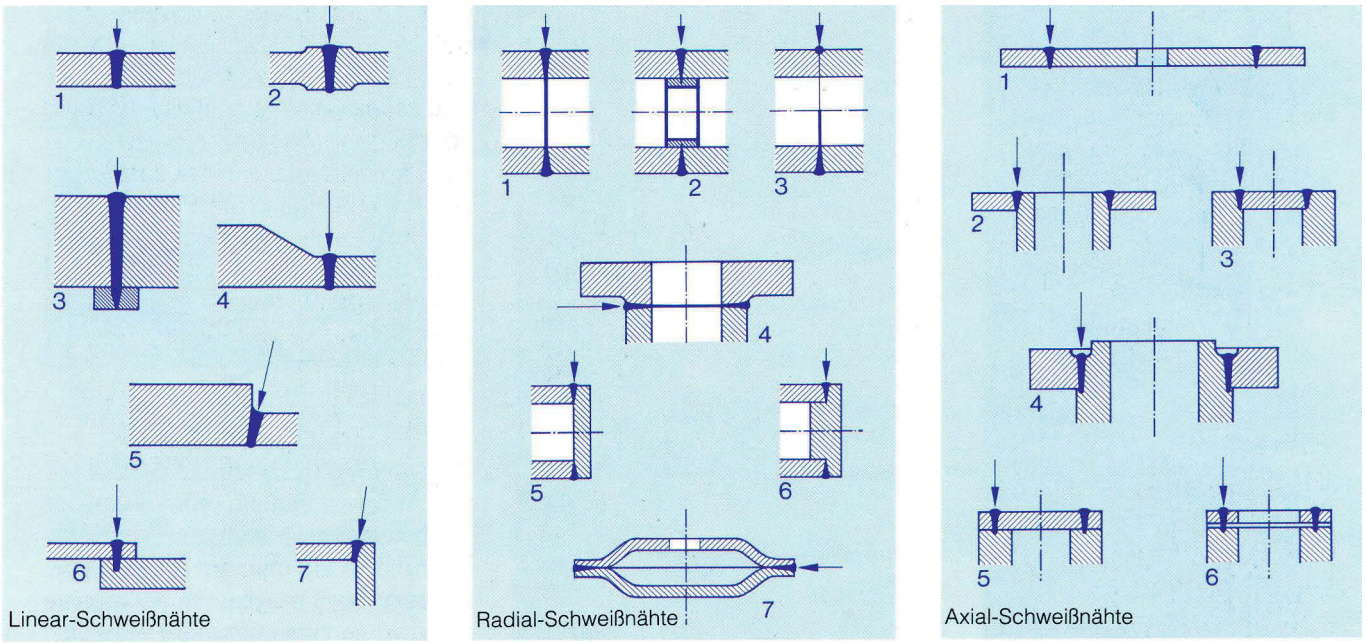
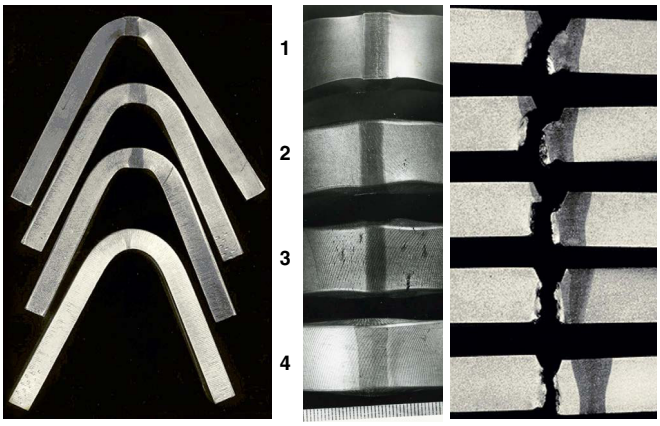


Рис. 5. Основные параметры лазерной и лазерно-дуговой сварки



а) б) в)

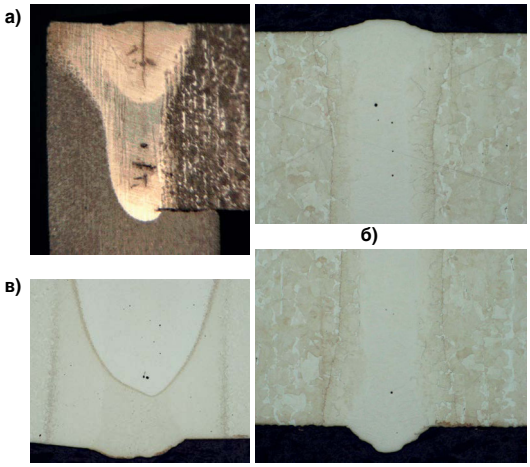
Рис. 7. Типы лазерных сварных соединений на плоских (а) и цилиндрических деталях (б, в), по данным фирмы Messer C & W



а) б)

Рис. 8. Внешний вид образцов после испытания на статический изгиб; образцы изготовлены из сварных соединений, выполненных из стали 12ХН4МДА (1), 09Г2С (2), 22 К (3), 08Х18Н10Т (4) (& = 1800, а = 2δ = 20 мм) — а. Образцы после испытания на ударный изгиб по Шарпи (KCV, ГОСТ 6996–66, тип IX, 10×10×55 мм) из сварного соединения толщиной 12 мм, сталь 10ГН2МФА — б. Сварка выполнялась CO_2-лазером «Ижора-М» в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова: Р = 10–10,5 кВт, Vсв =12 мм/с, гелий, Δ = 0 [16].

Рис. 9. Поперечный шлиф сварного соединения типа «вал–диск» без сквозного проплавления (диск из «кипящей» стали), без сканирования — а [19] и двухстороннего сварного шва «кипящей» стали, со сканированием лазерного пучка — б, в [14]. Сталь 40ХН2МА.



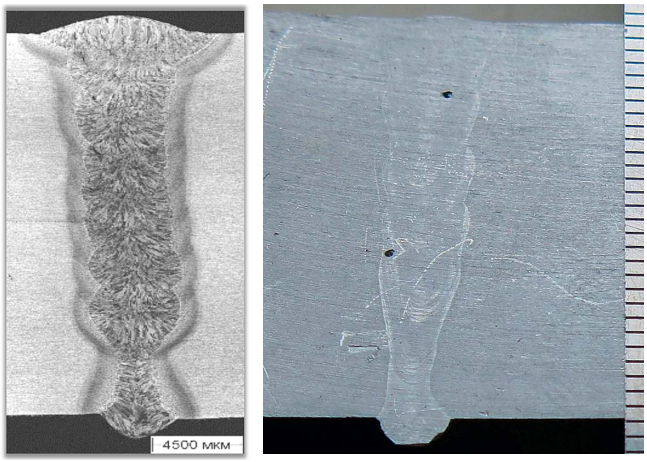
0,5–1 мм за счет применения гибридных методов сварки, в т. ч. лазерно-дуговой, а также за счет применения сканирования лазерного пучка.

Другим ограничением применения лазерной сварки является достаточно высокая стоимость оборудования. Поэтому ее применение целесообразно в массовом и крупносерийном производстве, а также в случаях, когда сварка другими методами нецелесообразна или невозможна.

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ В РОССИИ

Благодаря своим уникальным свойствам лазерная сварка (ЛС) с успехом применяется в автомобиле- и судостроении, в атомной и химической, в аэрокосмической и нефтегазовой промышленности, в машиностроении и энергетике, в ВПК [9–15,17,19–26].

Применение ЛС в российской промышленности, увы, сегодня носит единичный характер, в отличие от массового применения лазерной сварки за рубежом, и по масштабам значительно уступает доперестроечному советскому периоду, когда разработкой технологии ЛС занимались



а) б)

Рис. 10. Поперечные шлифы многопроходной гибридной лазерной сварки с присадочной проволокой трубной стали 08ГФБАА — а [20] и алюминиевого сплава толщиной 30 мм — б [4].

Рис. 11. РЦЛТ применяет лазерную сварку при изготовлении титановых балок и обечаек, контейнеров, теплообменников и др. крупногабаритных изделий [22–24]

многочисленные советские НИИ и заводские лаборатории сварки, оборудование предлагали и лучшие зарубежные компании, такие как TRUMPF, ROFIN SINAR, MESSER GRIESHEIM, ESAB, LASAG и другие, которые остались на российском рынке и присутствуют сегодня уже более 40 лет.

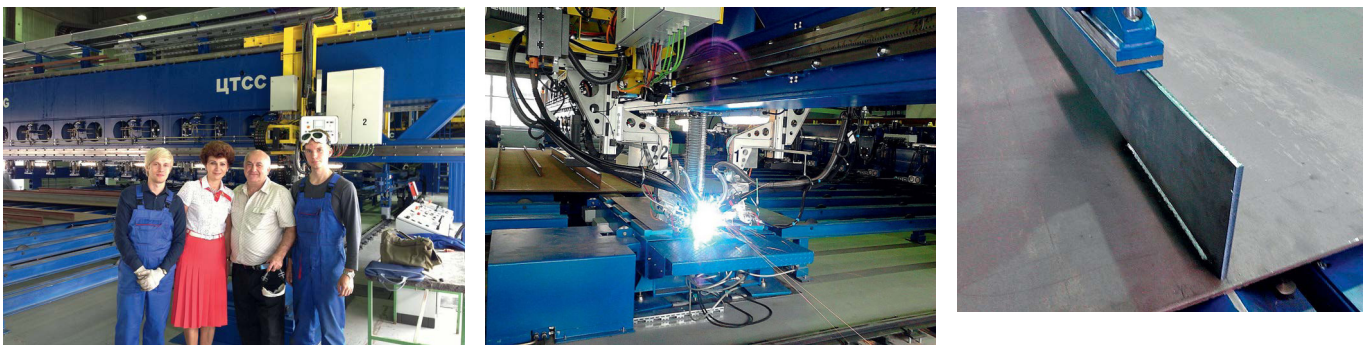
Рассмотрим несколько характерных примеров российского применения лазерной сварки.

Титановые сплавы находят широкое применение для изготовления сварных конструкций разнообразного назначения, они характеризуются сочетанием малой плотности с высокой прочностью и коррозионной стойкостью. Основные трудности, возникающие при сварке титана и его сплавов, определяются такими свойствами, как высокая химическая активность металла при высокой температуре, особенно в расплавленном состоянии, что предъявляет высокие требования к оборудованию и оснастке, защите сварных швов и их околошовной зоны при температуре выше 400–500°С [22]. Региональный центр лазерных технологий («РЦЛТ», Россия, г. Екатеринбург) применяет лазерную сварку при изготовлении титановых изделий [13, 21–24] (**рис. 11**). Например, из титановых сплавов ПТ3-В, ВТ-20, ОТ4 изготавливались рамы для радиолокационных комплексов размером 3824×1314×287 мм из прямоугольных сварных труб 281×30 мм с толщиной стенок 3–5 мм, с допусками по неплоскостности 0,3 мм на всю длину сборки и неперпендикулярности — 0,2 мм. Сварка производилась на лазерном комплексе TLC 1005 фирмы TRUMPF мощностью излучения 5 кВт и на роботизированном лазерном комплексе для сварки FLW-10-01 в составе волоконного лазера мощностью 10 кВт и робота KUKA KR120 [22]. На этом же оборудовании «РЦЛТ» изготавливались аутригеры (специальные выносные опоры) из листового проката титанового сплава VST-2 толщиной 7 мм с габаритами конструкции 3886×120×101 мм [23]. Результаты испытаний показали полное соответствие требованиям к сварным соединениям, заложенным в технической документации на изделия.

«РЦЛТ» изготавливались также теплообменники из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, из панелей размером 1600×2750 мм толщиной 4 и 1,5 мм, с применением технологий лазерного раскроя и сварки заготовок. По запрограммированной схеме, в заданном порядке, в поле листа выполнялись проплавные замкнутые круговые швы диаметром 16 и 20 мм в количестве 1996 шт. [24]. Разработана технология изготовления теплообменников шахтной печи. Воздушные и газовые панели рекуператоров были изготовлены из тонких листов нержавеющей стали с применением лазерной сварки, обеспечивающей надежное и герметичное соединение ребер и листа при отсутствии значительных деформаций. Изготовлено четыре типоразмера теплообменников разной мощности.

Центр технологии судостроения и судоремонта (ЦТСС, Россия, СПб) разработал для судостроения технологию и оборудование (совместно с IMG) — портальную крупногабаритную установку с рабочей зоной 12×12 м для лазерной сварки листовых полотнищ и судовых наборов с ребрами жесткости [13, 25], **рис. 12**.

В современном судостроении для изготовления корпусов судов в зависимости от назначения судна, района



а) б) в)

Рис. 12. Портальная крупногабаритная система ЦТСС и IMG для лазерной гибридной сварки и резки судокорпусных конструкций.
Фото: А. Игнатова

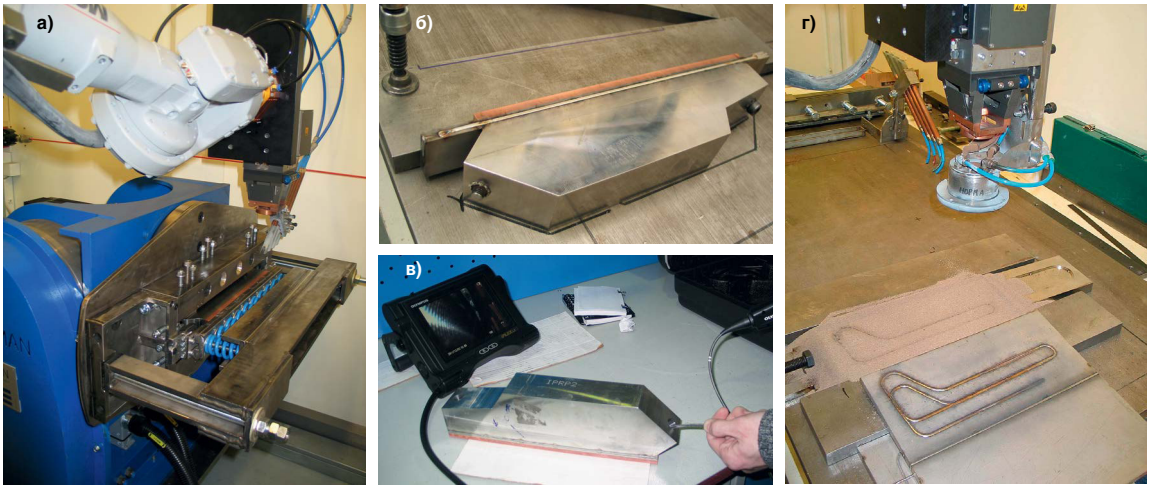


Рис. 13. Лазерная сварка на флюсовой подушке прямолинейных швов корпусов в оснастке (а) и без нее (б), контроль качества обратной стороны швов с помощью эндоскопа (в) и отработка технологии сварки коллекторов с криволинейными швами (г) ЦСД ИТЭР [12,13]. ***Фото: А. Игнатова***

плавания, водоизмещения и др. факторов используются стали регистровского класса нормальной и повышенной прочности, относящиеся к углеродистым и низколегированным системам легирования на основе кремния и марганца в толщинах от 3 до 50 мм.

Ориентировочное распределение объема металла по толщинам оценивается следующими данными:

1) 25–30% обрабатываемого металла составляют листы толщиной от 3 до 6 мм;

2) 50–60% — листы толщиной от 8 до 16 мм;

3) около 10% — листы толщиной от 18 до 24 мм;

4) 5–10% — листы толщиной свыше 24 мм.

В настоящее время на отечественных судостроительных предприятиях основными технологическими процессами раскроя листового и профильного проката являются кислородно-ацетиленовая резка и плазменная резка в среде воздуха и кислорода. В технологии сварки преобладающее значение имеют дуговые процессы: ручная дуговая сварка покрытыми электродами и аргоно-дуговая неплавящимся электродом, механизированная сварка в защитных газах плавящимся электродом и автоматическая под флюсом. Лазерные технологии сварки и резки сегодня вполне могли бы применяться для обработки 70–90% судостроительных листовых и профильных материалов.

На базе пятнадцатикиловаттного волоконного лазера в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова специалистами «Лазер-ИнформСервис» и Лазерного регионального северо-западного центра (ЛРСЗЦ) НИИЭФА разработана технология и выполнена лазерная сварка корпусов и коллекторов макета внешней отражающей мишени дивертора ЦСД ИТЭР из коррозионностойкой стали 316L и ХМ-19 толщиной до 11 мм по международному проекту создания термоядерного ректора ИТЭР (во Франции). В том числе разработана уникальная технология лазерной сварки на флюсовой подушке (**рис. 13г**). Свойства сварных соединений исследованы и описаны в [26]. Оборудование, технология и персонал аттестованы международной организацией «БЮРО ВЕРИТАС» [12,13].

Другой пример внедрения «ЛазерИнформСервис» (Россия, СПб) — лазерная сварка волоконным лазером мощностью 5 кВт (**рис. 14**) трудносвариваемой стали 40ХН2МА. Так в 2010–2012 годах была разработана технология лазерной сварки вала промежуточного для ОАО НТЦ «Завод Ленинец». Были выполнены металлографические исследования, контроль визуальный, УЗД и радиографический, а также по новейшей методике — коэрцитиметрический неразрушающий контроль напряженного состояния и усталости металла в зоне сварного соединения, в соответствии с нормативными документами и требованиями Росгостехнадзора (**рис. 14**). В соответствии с актом заказчика муфты дисковые с промежуточными валами из стали 40ХН2МА с лазерными швами отстояли при производственных испытаниях без разрушения 4938 и 3937 часов при 15 пусках [19].

На **рис. 15** показаны серийные изделия различного назначения после сварки в непрерывном и импульсном режимах волоконным двухкиловаттным лазером в СП «Лазертех» (ЛРСЗЦ, СПб).

На **рис. 16** показаны трубные изделия различных диаметров, сваренные CO_2-лазерами в 80-х годах: для ПО «Ижорский завод» (изделия 1 контура АЭС), для теплообменников Таганрогского и Бийского котельных за-

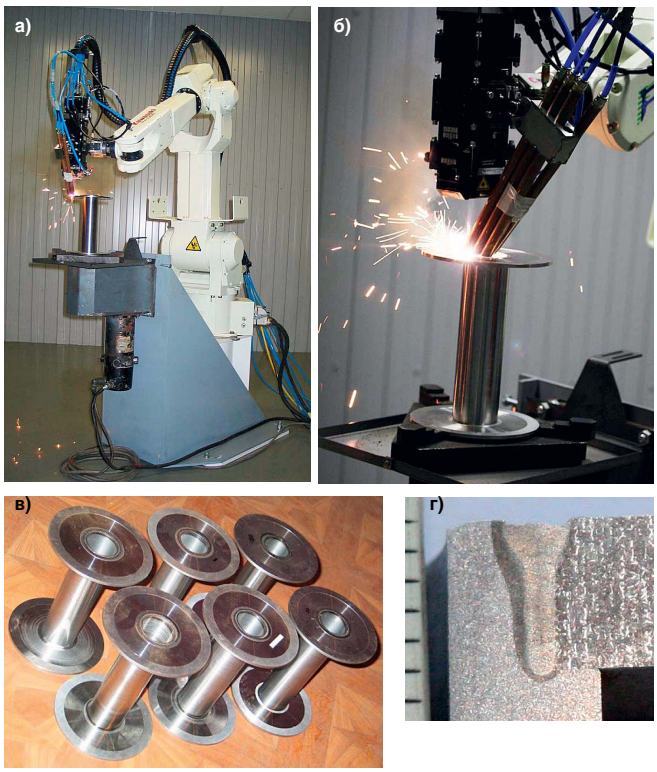


Рис. 14. Лазерная сварка (а, б) дисковых муфт (а–в) из стали 40ХН2МА в ЛРСЗЦ (СПб), поперечный шлиф (г) [19]. ***Фото: А. Игнатова***

Рис. 15. Серийные изделия различного назначения, выполненные лазерной сваркой волоконным лазером в СП «Лазертех»/ЛРСЗЦ (СПб). *Фото: А. Игнатова.*

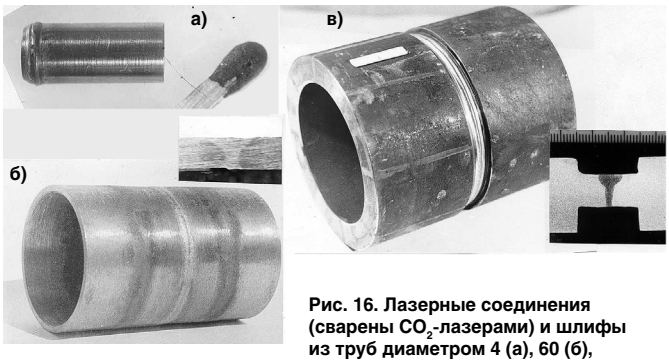


Рис. 16. Лазерные соединения (сварены CO_2-лазерами) и шлифы из труб диаметром 4 (а), 60 (б), 300 мм (в) из стали 08Х18Н10Т (б, в), ст 20 (а). Толщина датчика давления — 0,2 мм (а), трубы теплообменника — 3 мм (б), трубы СУЗ для АЭС — 12 мм (в) [14,18].

водов, датчики давления для ЦНИИ КМ «Прометей» [10].

НПК «УТС-Интеграция» несколько лет разрабатывает технологию лазерной сварки мощными волоконными лазерами неповоротных стыков труб большого диаметра (**рис. 10а, 17**). Получены уникальные результаты [20].

Другой пример — НТО «ИРЭ-Полюс» разработало в 2012 году технологию лазерной сварки волоконным лазером изделий из алюминиевого сплава АМг6, которая значительно превзошла аргонодуговую сварку: на порядок производительнее; практически без остаточных деформаций; с более высоким качеством сварных соединений (**рис. 18**) [27].

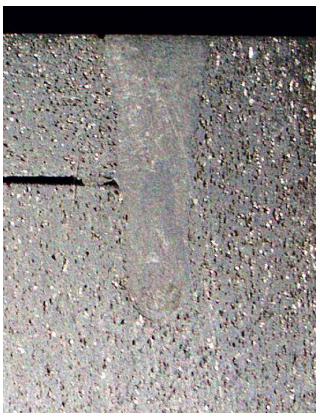


Рис. 18. Лазерная сварка изделия из сплава АМг6 — макрошлиф сварного шва [27]

Богатый опыт сварки алюминиевых сплавов накоплен в МГТУ им. Н. Э. Баумана [28], в т. ч. авиационного назначения [29]. Исследованиями лазерной сварки высокопрочных, термически упрочняемых алюминиевых сплавов занимаются в Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича (ИТПМ РАН) в Новосибирске [30], а также ЛС разнородных соединений: сталь–титан.

Значительный вклад в разработку гибридной лазерно-дуговой сварки сделал коллектив профессора Г. А. Туричина (ИЛИСТ, СПб) [31].

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ЗА РУБЕЖОМ

Масштабы применения лазерной сварки за рубежом на порядки значительнее, чем в России. Мировой рынок промышленных лазеров в 2018 году достиг 5059 млн долл. [5,7], систем для обработки материалов — 19,8 млрд долл. [32], при этом доля промышленных лазеров, поставляемых для сварки и наплавки, составляет 13% [6,7] (доля российского рынка сварки и наплавки здесь весьма незначительна).

Применение в автомобилестроении лазерных технологий, и в т. ч. лазерной сварки, практически всеобъемлющее — как отмечал Клаус Эммельман еще в 1997 году [33], а сегодня диапазон и возможности лазеров и установок нового поколения значительно расширились. Его пример применения лазерной сварки Nd: YAG и CO_2-ла-

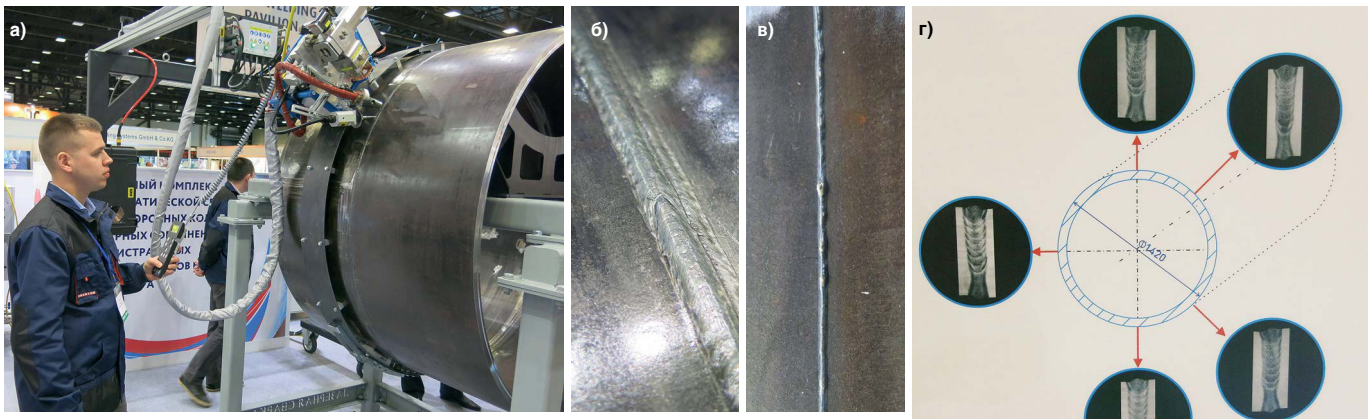


Рис. 17. Передвижная установка УЛСТ-1 для лазерно-дуговой сварки труб большого диаметра (а), внешний вид лицевого (б) и обратного (в) валиков, а также шлифов, вырезанных из различных участков кольцевого сварного шва (г). *Фото: А. Игнатова*

зерами при изготовлении кузова (с анализом преимуществ ЛС перед традиционными технологиями) потрясает и сегодня. Например, это: сварка датчиков подушки безопасности (малое тепловое воздействие), сварка деталей двигателя (высокое качество и производительность), сварка радиаторов (высокое качество), сварка амортизаторов и их стоек (высокая производительность), сварка деталей автоматической коробки передач (высокое качество и производительность), сварка боковой части кузова и крыши, дверных конструкций (высокая жесткость), сварка листовых деталей сложной конфигурации (высокая жесткость при малом весе), сварка бака (высокая стабильность и безопасность), сварка труб глушителя (малая склонность к коррозии, высокая деформируемость изделия).

Сегодня внедрение новых лазерных технологий часто не требует списания традиционного оборудования и оснастки (морально устаревших, но не физически), а сразу внедряется новое оборудование, поскольку эволюционное развитие автомобилестроения, замена двигателей внутреннего сгорания на электрические и газовые источники требует применения новых конструкций дифференциалов трансмиссий (**рис. 19**), аккумуляторов и других деталей автомобиля [34–36], не говоря уже о многообразии их новых моделей и относительно малой их серийности, что исключает применение традиционных технологий — штамповки и литья, требующих значительных временных и материальных затрат.

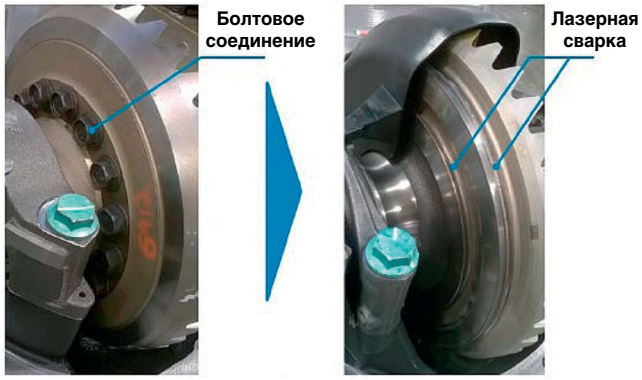


Рис. 19. Дифференциал трансмиссии / Daimler Trucks [34].
Фото: Daimler

Компания IPG разработала и внедряет в отечественном и зарубежном автомобилестроении, вагоно- и судостроении технологию «клещевой» лазерной сварки нахлесточных многослойных соединений волоконными лазерами взамен контактной сварки [4, 37, 38], **рис. 20**. Уникальная технология может применяться также в авиации и других отраслях промышленности, в роботизированном и ручном вариантах.

По данным европейских и японских судостроителей, исправление деформаций и дефектов корпуса занимает до 30–50% трудоемкости при постройке судов [39, 40]. На **рис. 21** приведен сравнительный анализ ЦНИИ ТС (СПб) структуры затрат лазерных и традиционных технологий в судокорпусостроении.

В 1996 г. завершился четырехлетний европейский проект, посвященный изучению возможностей использования лазерной сварки в судостроительной промышленности, закончившийся одобрением этой технологии национальными отраслевыми организациями

ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ **“РАПИД”**

- ✓ *Комплектующие лучших мировых производителей, ЧПУ и сервоприводы “Mitsubishi”*
- ✓ *Поддержка изготовителя на протяжении всей жизни станка*

ЛАЗЕРНЫЕ РАСКРОЙНЫЕ СТАНКИ С ВОЛОКОННЫМИ ЛАЗЕРАМИ IPG

ДЛИННОМЕРНЫЕ И КРУПНОФОРМАТНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ

ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ С ВОЛОКОННЫМИ ЛАЗЕРАМИ IPG МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РАСКРОЯ ТОНКОЛИСТОВОЙ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

ЛАЗЕРНЫЕ РАСКРОЙНЫЕ КОМПЛЕКСЫ С МОЩНЫМИ CO_2-ЛАЗЕРАМИ ROFIN-SINAR

ЛАЗЕРНЫЕ СТАНКИ С CO_2-ЛАЗЕРАМИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РЕКЛАМНОГО, ШВЕЙНОГО, МЕБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

СКОРОСТНЫЕ СТАНКИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ “РАПИД Плазма”

КООРДИНАТНЫЕ СТОЛЫ С ЧПУ ПОЗИЦИОНЕРЫ

КРУПНОФОРМАТНЫЕ ПЛАНШЕТНЫЕ ПЛОТТЕРЫ, ГРАФОПОСТРОИТЕЛИ, КООРДИНАТОГРАФЫ

Телефон: +7 (903) 651-67-49
Телефон: +7 (473) 202-92-60
Тел./факс: +7 (473) 241-94-50

394033, г. Воронеж
ул. Ильюшина, дом 3
E-mail: npkrapid@yandex.ru
http://www.npk-rapid.ru

Рис. 20. Поперечный шлиф шва на алюминиевом сплаве (а), сварные швы на высокопрочной стали (б), алюминиевом (в) и нержавеющем сплавах (г). Аппарат «клещевой» лазерной сварки (д). Лазерная сварка корпусов автомобиля (е) [4,37,38]

и давший зеленый свет коммерческому использованию лазерной сварки в судостроении. Координатор проекта EurpoLASER D. Rassel отметил, что уже 3 судостроительных завода установили у себя лазерные сварочные системы, а 17 ведущих мировых компаний из тяжелого машиностроения (транспортное и энергетическое) проявили активный интерес к результатам проекта и его продолжению [39].

На ряде зарубежных верфей, таких как Meyer Werft (Германия), Vosper Thornycroft (Великобритания), Fincantieri (Италия), Odense Lihdo Steel Shipvard (Дания), Mare Island Naval Shipyard (США), в 1994–98 годах, было изготовлено с помощью лазерной резки и сварки большое количество плоскостных многослойных («сэндвичевых») конструкций длиной до 10–20 м (настилов, палуб, платформ), в т. ч. и для боевых кораблей, см. [17].

Как показал технико-экономический анализ, комплексное применение технологий резки и сварки в судокорпусостроении позволяет снизить суммарные затраты на постройку корпусов судов более чем в 2 раза и существенно сократить сроки их постройки. Например, за счет использования лазерных технологий сроки постройки корветов на верфи Vosper Thornycrof (Великобритания) были сокращены на год [40].

В конце 90-х годов основные параметры лазерной сварки (в т. ч. комбинированной лазерно-дуговой) были согласованы с Морским регистром «Ллойда», норвежским «Веритасом», Итальянским морским регистром и германским «Ллойдом». На верфи Odense (Дания) необходимые испытания по сварке угловых швов производились в начале 1998 г. Соответствующий сертификат был получен в марте этого же года. Технология лазерной сварки к 2000 году была внедрена тремя ведущими европейскими верфями: Odense (Дания) — на автоматизированном участке изготовления плоских секций; Meyer (Германия) — для изготовления сотовых панелей; Fincantieri (Италия) — для сварки стыковых швов [40].

Опыт применения лазерных и гибридных технологий сварки в судостроении Германии показал возможность

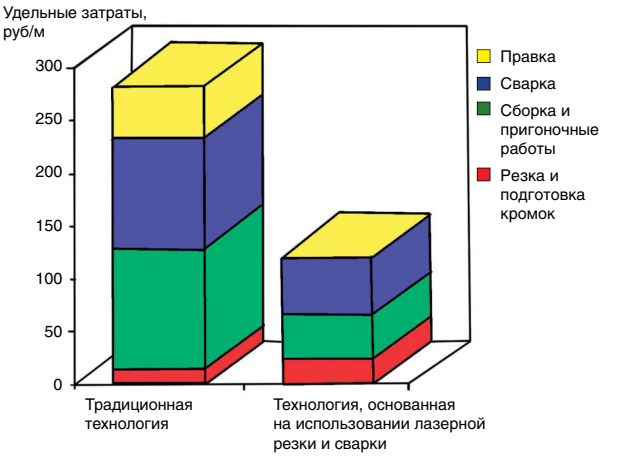


Рис. 21. Структура и средние значения удельных затрат на изготовление судокорпусных металлических конструкций при использовании различных вариантов технологии [40]

уменьшить вес судна до 30%. Это достигается за счет облегчения внутренних конструкций без потери прочности [41].

На судостроительной верфи Meyer Werft (Papenburg, Germany) работа над внедрением лазерных технологий продолжается, и в ближайшие годы планируется внедрить лазерную сварку стальных листов толщиной до 30 мм шестидесятикиловаттным диодным лазером немецкой компании Laserline по проекту DIOMAR — Laser Zentrum Hannover (LZH) совместно с производителем электроники Held Systems Deutschland (Heusenstamm, Germany), **рис. 22**. Процесс лазерной сварки отличается высокой надежностью и экологичностью и должен обеспечить снижение издержек производства и повышение производительности труда. Традиционный, наиболее часто используемый процесс дуговой сварки под флюсом отличается низкой производительностью и большими деформациями сварных заготовок [42].

Целью проекта DIOMAR также является достижение высокого качества сварного соединения при высокой скорости сварки, а партнеры хотят сократить расходы на подготовку кромок листовых заготовок под сварку и уменьшить количество дополнительного, присадочного материала по сравнению с традиционными методами [42].

Одна из крупнейших в мире судостроительных компаний FINCANTIERI, базирующаяся в Италии, уже имеющая опыт применения лазерных технологий (см. выше), приобрела линию по производству тонких плоских панелей с использованием гибридной лазерной сварки у финской фирмы PEMAMEK. Производственная линия общей длиной 300 м включает в себя одностороннюю сварочную станцию, фрезерную станцию, станции сборки и сварки профилей (обе с использованием гибридной лазерной сварки), линию обработки профилей, станок для обрезки панелей и несколько роботизированных сварочных систем, которые могут приваривать Т-образные балки к панели [43].

Ранее компания PEMAMEK также снабжала верфи компании роботизированными сварочными станциями, установкой для односторонней гибридной лазерной сварки, линией обработки профиля и еще одной комплектной линией плоских панелей [43].

Усовершенствованная производственная линия полностью адаптирована к потребностям FINCANTIERI для

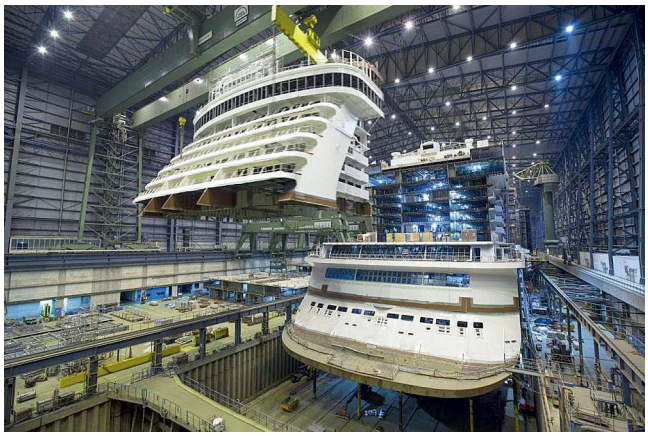
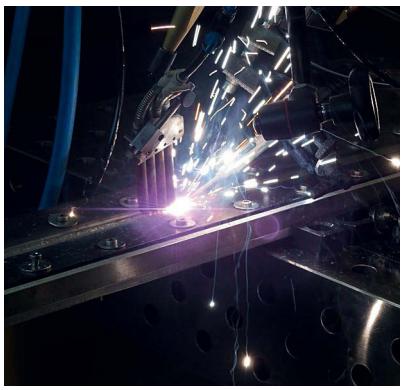
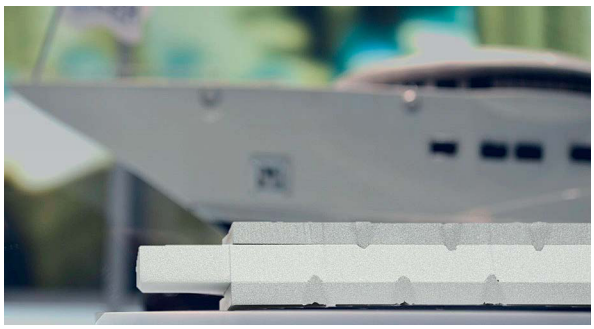


Рис. 22. Диодный лазер компании Laserline мощностью до 60 кВт должен обеспечить более экономичную сварку толстолистового металла толщиной до 30 мм на немецкой судостроительной верфи Meyer Werft [42]. ***Фото: Meyer Werft/M. Wessels***





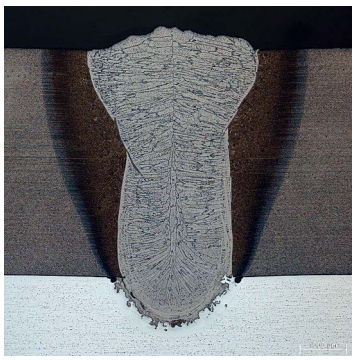


Рис. 23. Корпуса судов из стали и алюминиевых сплавов, сваренные лазером, используются в яхтостроении [44]

производства высококачественных панелей и блоков круизных судов. Благодаря минимальным деформациям на производимых панелях FINCANTIERI сможет изготавливать панели с лучшим качеством и производительностью. Уровень автоматизации во всей линии оптимизирован для достижения высокой производительности, с минимальным использованием ручного труда и рабочей силы. Полная линейка тонколистовых панелей PEMA Laser-Hybrid будет запущена в 2020 году [43].

Легкие сварные сталеалюминиевые конструкции, сваренные лазером, сегодня начинают применяться в автомобильной и судостроительной промышленности для снижения веса изделий и, соответственно, расхода топлива и выбросов углекислого газа. Корпуса судов из стали и алюминиевых сплавов, сваренные лазером, используются в яхтостроении и, например, в совместном исследовательском проекте LaSAAS и лазер Zentrum Hannover e. V. (LZH) [44], **рис. 23**.

Технологии соединения/сварки в значительной мере участвуют в создании добавочной стоимости. Развитие технологий соединения гарантирует образование и сохранение рабочих мест. В таких технологиях есть потенциал роста и развития. Соединительные/сварочные технологии обеспечивают высокую конкурентоспособность производства [45].

Airbus начал применять CO_2-лазеры для сварки стрингера и обшивки фюзеляжа на панелях самолетов в начале 2000-х (Schumacher et al., 2002; Vollertsen et al., 2004). Это было достигнуто благодаря развитию лазерных сварочных модулей, а также благодаря созданию сплава Al-Mg-Si-Cu. Вместо обычной клепки стрингеры соединяют с обшивкой путем одновременной лазерной сварки с обеих сторон, как показано на **рис. 24**. Снижение веса, высокая производительность, улучшение коррозионной стойкости и хорошие экономические характеристики являются основными преимуществами замены традиционного процесса клепки лазерной сваркой [17]. По данным [46], фирма Airbus использовала лазерную сварку для соединения стрингеров с обшивкой при производстве нижней части фюзеляжа аэробусов A318, A340-60 и A380, в результате чего было достигнуто существенное сокращение производственных расходов. Впервые в мировой авиационной практике в Гамбурге, в реальных полетных условиях, были протестированы возможности использования лазерной сварки при сборке самолета Airbus A318. Передача первого самолета в эксплуатацию планировалась на конец 2003 г. [47].

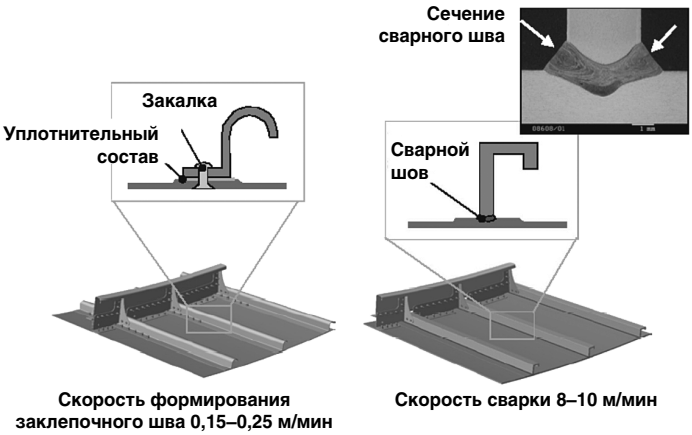


Рис. 24. Сравнение процессов клепки и лазерной сварки при соединении стрингера и пластины (Vollertsen et al., 2004) [17]

По данным [41] об экономических показателях применения лазерной и гибридной сварки при изготовлении аэробуса А380, это уменьшение веса самолета на 15% по сравнению с А340, снижение расхода керосина за один трансатлантический перелет на 750 кг, а экономия за 25 лет эксплуатации самолета составит 9 млн евро. В данном случае осуществляется переход от классических клепочных соединений к лазерным и гибридным сварочным технологиям, обеспечивающим значительное снижение веса.

Для создания и применения легких конструкций сегодня есть уникальные возможности. Появились достаточно технологичные алюминиево-литиевые сплавы. Здесь не все хорошо обстоит с технологиями, и есть над чем потрудиться материаловедам и технологам. Прежде всего, проблему представляет пористость, которая возникает в материалах [41].

В ракетостроении очень остро стоит вопрос снижения веса ракеты-носителя и увеличения полезной нагрузки с 1,2 до 2–3% от массы ракеты, для чего идет поиск применения новых материалов в объемных конструкциях — от кевлара и карбона до стекла [17, 48], сплавов магния и интерметаллидов.

Трудно переоценить перспективы лазерной сварки (и лазерных технологий) при увеличивающихся объемах применения композитов и пластиков [49] в аэрокосмической и транспортной промышленности. Например, самолет А380 на 25% изготавливается из композитов, и их долю в А350 планируется увеличить до 50%.

а)

б)

в)

г)

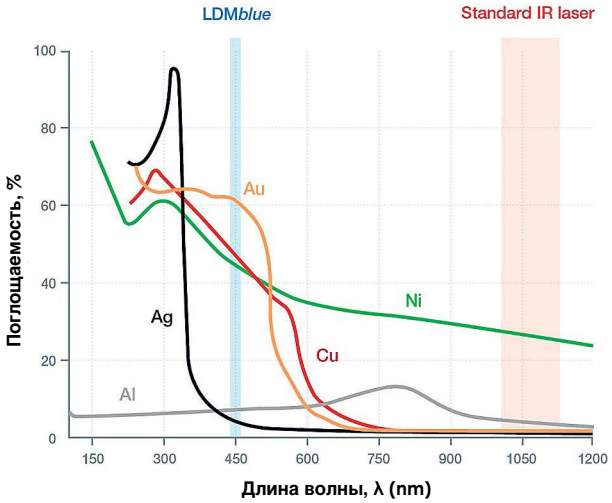


Рис. 25. Поперечный шлиф сварного соединения из меди (а), сваренного синим диодным лазером Laserline с длиной волны 450 nm (б) с повышенным коэффициентом поглощения (г) и отсутствием зависимости от состояния поверхности обрабатываемой детали (в) [50,51]

Для сварки меди и других цветных металлов (особенно тонких листов и фольг) в электронике и электротехнике начинают применять мощные синие диодные лазеры [50–53], **рис. 25**, зеленые дисковые [54] и диодные [55], волоконные лазеры мощностью до 1,5 кВт. Необходимая мощность для проплавления снижается на порядок по сравнению с IR-лазерами из-за лучшего поглощения цветными металлами, например медью и золотом, в 7–20 раз [51]. BLUE-лазер AO-150 NUBURU в последние годы продемонстрировал эффект этого физического преимущества, демонстрируя как увеличенную в 2–10 раз скорость сварки (до 25 м/мин), так и улучшенное качество, например, медных сварных швов [52].

Синие лазерные диоды входят в эпоху массового производства с большими перспективами в лазерной обработке во многом благодаря высокой яркости и эффективности / КПД, стойкости против отраженного излучения и хорошей абсорбции обрабатываемым металлом по сравнению с традиционными лазерами и источниками света. Синий лазерный диод по яркости уже превосходит инфракрасный лазерный диод (IR). За прошедшее десятилетие их выходная мощность выросла на порядок, а эффективность увеличилась вдвое. Синие лазерные диоды имеют большой срок эксплуатации — более 10 000 часов, и меньшие размеры, по сравнению с лампами [53].

Только около 5% лазерной энергии может использоваться для нагрева меди при сварке ИК лазерами. Высокая интенсивность необходима, чтобы инициировать процесс сварки, а поглощение лазерного излучения медью при комнатной температуры является низким. Поверхность меди отражает почти всю мощность лазера в окружающую среду, включая оптику. Это очень неэффективно с точки зрения передачи энергии, а также повреждает некоторые оптические элементы. Поглощение ИК лазерного излучения увеличивается до 15% (и более) с повышением температуры меди до температуры плавления, но этот переход трудно контролировать. Этот процесс нуждается в высокой интенсивности в начале, но с увеличением абсорбции, материал может перегреваться. Глубокое проплавление проблематично, особенно при низкой скорости, возникают дефекты сварного шва. Из-за поверхностного натяжения и вязкости, характерных для меди, по сравнению со сталью, расплав сварочной ванны является нестабильным. Поглощение же излучения, например, зеленого лазера с длиной волны 515 нм для меди составляет 35–40%, поэтому процесс сварки может быть очень стабильным, без проблем с начальным поглощением и последующим перегревом. Полученное лазерное излучение по волокну легко передается в сварочную установку. Благодаря хорошему поглощению зеленого лазерного луча медью появилась возможность сварки даже фольги и мелких медных деталей толщиной до 0,4 мм. И даже при отсутствии парогазового канала швы свободны от брызг. Зеленые лазеры компании Trumpf основаны на лазерной технологии тонких дисков, и лазерные системы уже готовы для промышленного использования [54].

Создание лазеров со сверхкороткими (пико- и фемтосекундными) импульсами позволило сваривать керамику [56] не только для медицины, но и открывало новые перспективы для лазерной сварки, резки и сверления разнородных и трудносвариваемых материалов в авиации

и ракетной технике, ВПК и других отраслях промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лазерная сварка имеет множество преимуществ и широкие перспективы развития, однако ограничивают ее применение: достаточно высокая стоимость оборудования, высокие требования к подготовке заготовок и сборок под сварку (в т. ч. необходимость минимизации зазора), а также вопросы аттестации и сертификации [57]. Тем не менее появляются новые производители волоконных и диодных лазеров, их мощность постоянно повышается, а цена снижается, что способствует их более широкому внедрению в промышленности в будущем.

С целью повышения качества и производительности лазерной сварки, расширения ее областей применения продолжаются исследовательские работы по совершенствованию лазерных источников с разными длинами волн и длительностью импульсов — от милли- до пико- и фемтосекундных. Ведется разработка многопроходной и многолучевой, гибридной сварки с применением вставок и присадочных материалов, сканирования по различным траекториям лазерного пучка, а также для сварки разнородных и трудносвариваемых материалов, толстостенных соединений.

А. Г. Игнатов, эксперт МИНобра в научно-технической сфере, член КНЭ по лазерам и лазерным технологиям: 2005–2021 гг., ведущий научный сотрудник АО «Ленинградские лазерные системы» (СПб)
www.lenlasers.ru, laseris-spbo@yandex.ru

Литература

1. Рэди Дж. Промышленные применения лазеров. М.: МИР, 1981. 638 с.
2. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн.5.: Лазерная сварка металлов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов. М.: Высшая школа, 1988. 207 с.
3. Баранов Г. А., Астахов А. В., Зинченко А. К. Мощные технологические CO_2-лазерные комплексы на основе поперечного самостоятельного разряда. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2005. 236 с.
4. Грезев Н. В. Доклад на выставке «WELDEX–2016»: Технологии и оборудование на базе волоконных лазеров. 20 слайдов.
5. What goes up ANNUAL LASER MARKET REVIEW & FORECAST 2019 / G. OVERTON, A. NOGEE, D. BELFORTE, J. WALLACE, B. GEFVERT // Laser Focus World. January 2019. P. 40–45, 47, 49–54, 56–58, 60–61, 64–65.
6. BELFORTE DAVID A. 2018 was another record year, contending with turmoil // Industrial Laser Solutions. 2019. JANUARY/FEBRUARY. P. 9–11.
7. Буров Н. В., Игнатов А. Г. Мировой рынок фотоники и лазерных технологий: 2010–2019 // РИТМ машиностроения. 2019, № 4. С. 60–67.
8. Буров Н. В., Игнатов А. Г. Рынок лазеров в России и странах СНГ // Ритм машиностроения. 2019. № 5. С. 32–43.
9. Лазерная сварка со сквозным проплавлением сталей различных классов // А. Г. Игнатов, А. В. Козлов, А. И. Скрипчеко и др. // Автоматическая сварка. М., 1987. С. 26–29.
10. Игнатов А. Г. Лазерная сварка сталей мощными CO_2-лазерами. Часть 1. Особенности лазерной сварки // Фотоника. 2008. № 6. С. 10–17.
11. Игнатов А. Г. Особенности сварки волоконными лазерами // Ритм машиностроения. 2017. № 3. С. 20–25.
12. Лазерная сварка для термоядерной энергетики / А. Г. Игнатов, А. Н. Маханьков, С. Н. Мазаев и др. // РИТМ машиностроения. 2016. № 6. С. 20–25.
13. Игнатов А. Г. Российские лазерные технологии: состояние и перспективы применения // РИТМ машиностроения. 2016. № 1. С. 26–40.
14. Грезев Н. В., Шамов Е. М., Маркушов Ю. В. Сварка волоконными лазерами // РИТМ машиностроения. 2016. № 7. С. 38–44.

15. Игнатов А.Г. Работы по лазерной сварке энергомашиностроительных и судостроительных сталей и сплавов больших толщин в России и за рубежом // Лазер-Информ № 13–14, июль 1998. М., ЛАС. С. 10–13.
16. Игнатов А.Г. Лазерная сварка сталей мощными CO_2-лазерами. Часть 2. Свойства сварных соединений // Фотоника. 2009. № 3. С. 22–24.
17. Справочник по лазерной сварке / под ред. С. Катаяма / М.: Техносфера, 2015. 704 с.
18. Игнатов А.Г. Лазерная сварка сталей мощными CO_2-лазерами. Часть 3. Дефекты сварных соединений // Фотоника. 2009. № 4. С. 12–16.
19. Оценка напряженного состояния и качества лазерных сварных соединений из стали 40ХН2МА магнитным методом / А.Г. Игнатов, В.И. Криворотов, Р.Ч. Муратов, А.Н. Калинин, В.Н. Шестов // Megatech. 2011. № 4. С. 8–15.
20. Шамов Е.М. Технология и оборудование лазерной сварки неповоротных кольцевых стыковых соединений труб. Доклад на международной конференции «Сварка в России 2019: Современное состояние и перспективы». г. Томск. 03–07.09.2019. 20 слайдов.
21. Игнатов А.Г. Лазерные технологии: задачи и решения // РИТМ машиностроения. 2018. № 6. С. 30–33.
22. Сухов А.Г., Малыш М.М., Шанчуров С.М. Лазерная обработка титановых сплавов // РИТМ машиностроения. 2016. № 5. С. 34–37.
23. Сухов А. Г., Малыш М. М., Шанчуров С. М. Применение лазерных технологий при изготовлении теплообменного оборудования // «Сварочное производство». 2018. № 1. С. 34-38.
24. Сухов А.Г., Малыш М.М., Шанчуров С.М. Промышленное применение лазерных технологий. LAP Lambert Academic Publishing, 2018. 86 с.
25. Афанасьев Н.А., Носырев Н.А. Лазерные технологии на службе у судостроителей // Лазер-Информ. 2013. № 15 (510). С. 9–11.
26. Игнатов А.Г., Криворотов В.И., Миргородский В.А. Лазерные сварные соединения из коррозионностойких сталей / Фотоника. 2010. № 2. С. 18–21.
27. Технологические особенности лазерной сварки алюминиевых сплавов мощными волоконными лазерами / Игнатов А.Г. (докладчик), Криворотов В.И., Вечернин А.В., Ворончук С.Д., Успенский С.А., Маланиченко С.В., Нужин А.Н. // The 2-nd International Conference and Exhibition «Aluminum — 21 / Welding and Brazing». 20–22 November 2012. St.Petersburg. Russia. С. 28.
28. Шиганов И., Холопов А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов // Фотоника. 2010. № 3. С. 6–10.
29. И.Н. Шиганов, С.В. Шахов, А.А. Холопов. Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. С. 34–50.
30. Маликов А.Г., Оришич А.М. Лазерная сварка высокопрочных термически упрочняемых алюминиевых сплавов // РИТМ машиностроения. 2018. № 3. С. 34–36, 38, 40.
31. Гибридная лазерно-дуговая сварка / Г.А. Туричин, Е.В. Земляков, Е.А. Валдайцева и др. // РИТМ. 2014, июнь. С. 76–83.
32. Мировой рынок систем лазерной обработки материалов достиг рекордных $ 19,8 млрд // URL: https://www.lasersystemseurope.com/11/04/2019
33. Эммельман К. Лазерная сварка при изготовлении кузовов легковых автомобилей. Сегодняшнее состояние дел и перспективы на будущее // Лазер-Информ, 1997. № 128–129. С. 2–7. / Перевод из «EuroLaser». 1997. № 2.
34. Fast Laser Beam Characterization/C. Dini, A. Bünting, M. Brčina // Laser Technik Journal. 4 / 2018, P. 26–28.
35. Advanced manufacturing solutions for automotive powertrain production/ANDREAS MOOTZ // Industrial Laser Solutions, 2019. JANUARY/FEBRUARY. P. 33–34.
36. The Welding of Differential Gears for e-mobility Applications // URL: https://www.spilasers.com/case-study-e-mobility/the-welding-of-differential-gears-for-e-mobility-applications/23/09/2019
37. Siewert A., Krastel K. Fiber Laser Seam Stepper Replasing Resistance Spot-Welding / Laser Technik Journal, 4/2014. 52–55.
38. Wiener M. Laser Seam Stepper takes on conventional welding / Industrial Laser Solutions. 2015. JULY/AUGUST. P.17–18.
39. CO_2-лазеры в судостроении / Лазер-Информ, 1997. № 127. С. 4–7. / Перевод из EuroLaser. 1997. № 1.
40. Опыт использования лазерных технологий в судостроении / В.Д. Горбач, О.Г. Соколов, В.М. Левшаков, В.Л. Чабан, А.А. Васильев, А.Г. Игнатов // Судостроение. №1. 2000. С. 49–53.
41. Лопота В.А. Легкие конструкции в современном машиностроении // Сварка и диагностика. 2008. № 4. С. 11–12.
42. Project works to develop laser welding processes for thick metal sheets/Laser Zentrum Hannover (LZH) // Industrial Laser Solutions. 2019. JANUARY/FEBRUARY. P. 5.
43. Italian shipbuilder places large order for laser welding line / Industrial Laser Solutions. 2019. № 7–8. P.6.
44. Heavyweight in lightweight construction: steel-aluminum laser welding for shipbuilding // URL: https://www.lzh.de/en/publications/pressreleases/2019/heavyweight-in-lightweight-construction 05/27/2019.
45. Миддельдорф К. Тенденции и создание стоимости в соединительных технологиях // Сварка и диагностика. 2008. № 4. С. 12–13.
46. Применение технологий лазерной сварки в процессе изготовления интегральных конструкций обшивки фюзеляжа гражданских крупногабаритных самолетов / Berndt Brenner, Dirk Dittrich, Jens Standfu и др. // Лазер-Информ., 2010. № 22 (445). С. 5–9.
47. Лазерная сварка — теперь и в самолетостроении / Лазер-Информ. 2003. № 21–22. С. 7.
48. Технологии соединения стекла и примеры их применения / Г. Келер, Г. Мюллер, У. Баслер и др. / Автоматическая сварка. 7/2006. С. 44–48.
49. Москвитин Г.В., Поляков А.Н., Биргер Е.М. Лазерная сварка пластических материалов (обзор) / Сварочное производство. 2012. № 9. С. 21–33.
50. High-power blue laser improves fabrication throughput / JEAN-MICHEL PELAPRAT, ROBERT FRITZ, MATT FINUF, MARK ZEDIKER / Industrial Laser Solutions JANUARY/FEBRUARY 2018, p. 17–20.
51. Лазерная сварка меди и др.цветных металлов и сплавов синими диодными лазерами мощностью до 1,5 кВт // URL: https://www.laserline.com/en-int/laser-welding-copper/09/08/2019.
52. NUBURU has invented and is manufacturing the world's first revolutionary high-power blue laser // URL: http://www.nuburu.net/markets/31/01/2019.
53. Japan develops blue laser for advanced materials processing / KOJI TOJO, SHINICHIRO MASUNO, RITSUKO HIGASHINO, AND MASAHIRO TSUKAMOTO; Shimadzu Corporation // Industrial Laser Solutions. 2018. September/October. P. 27–31.
54. Laser welding at the green wavelength benefits electrified mobility applications / HENRIKKI PANTSAR, EVA-MARIA DOLD, MARC KIRCHHOFF, OLIVER BOCKSROCKER // Industrial Laser Solutions, 2019, JANUARY/FEBRUARY, P. 30–32.
55. Кузнецов С. Сокращение зеленого разрыва: тенденции в твердотельных зеленых излучателях // URL: https://android-robot.com/sokrashhenie-zelenogo-razryva-tendencii-v-tverdotelnyx-zelenyx-izluchatelyax/09/01/2019.
56. Laser welding technology for ceramics is furnace-free / Industrial Laser Solutions. 2019. SEPTEMBER/OCTOBER. P. 4–5.
57. Стандартизация в области лазерных производственных технологий / С.М. Шанчуров, Л.Б. Жирнова, А.Г. Сухов, М.М. Малыш // РИТМ машиностроения. 2019. № 2. С. 24–28.