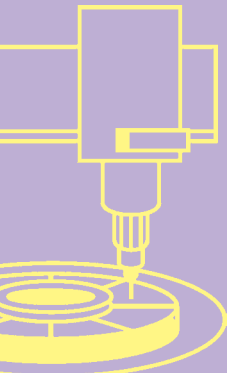


ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СТАЛЕЙ

МОЩНЫМИ CO₂-ЛАЗЕРАМИ

ЧАСТЬ 1



В работе основное внимание уделено сварке излучением мощных CO₂-лазеров (до 12–30 кВт). Приведены результаты практических исследований лазерной сварки сталей различных классов, полученные автором в течение более 20 лет на различных предприятиях Москвы и Санкт-Петербурга. Данный опыт – уникальный и достаточно дорогостоящий – представляет несомненный интерес для специалистов. В первой части работы рассмотрены основные результаты экспериментов, влияние типов защитных газов и методов их подачи на качество сварных соединений, методы увеличения глубины проплавления и т.п.

Лазерное излучение обеспечивает высокую концентрацию энергии, значительно превосходящую другие источники энергии, используемые для сварки [1, 3, 5, 7]. Электролучевая сварка (ЭЛС), также обладая высокой концентрацией энергии электронного луча, наиболее близка к лазерной сварке (ЛС) по своим физическим, технологическим и металлургическим особенностям. Однако ЭЛС осуществляется в вакуумных камерах, что необходимо для устойчивого проведения процесса сварки с глубоким проплавлением. Лазерная сварка принципиально отличается от ЭЛС тем, что в большинстве случаев не требует вакуумных камер, хотя при мощностях более 5–25 кВт местное вакуумирование позволило бы увеличить глубину ЛС в несколько раз и приблизиться к глубине проплавления ЭЛС. Кроме того, при ЛС, в отличие от ЭЛС, нет сильного ионизирующего излучения, намагниченность заготовок не влияет на лазерный пучок, что позволяет более точно наводить его на стык при сварке [3–7]. Воздействие лазерного излучения высококачественно, что определяет ряд особенностей свойств сварных соединений.

ЛС проводится на воздухе, а чаще – в среде защитных газов Ar, He, CO₂, N₂ и др. Благодаря этому лазерную сварку можно без проблем применять для соединения крупногабаритных металлоконструкций (что проблематично для ЭЛС) [1–7]. Лазерный луч с помощью зеркальных оптических систем или по световоду легко транспортируется и направляется в труднодоступные места. При этом обеспечивается надежное и оперативное управление процессом лазерной сварки с регулируемыми энергетическими характеристиками. Благодаря широкому диапазону режимов ЛС реализуется высокопроизводительный процесс соединения различных металлов толщиной от нескольких микрон до десяти и более миллиметров (рис.1–3).

Хотя на лазерный пучок практически не влияют магнитные поля свариваемых деталей (при углах наклона луча к свариваемым пластинам от 90° до 15–30°), но они воздействуют на плазменный факел, способны его отклонять и, соответственно, влиять на формирование сварных швов. Кроме того, вид защитного газа, используемого при сварке (при мощности излучения более 1–3 кВт), в основном и определяет тепло-

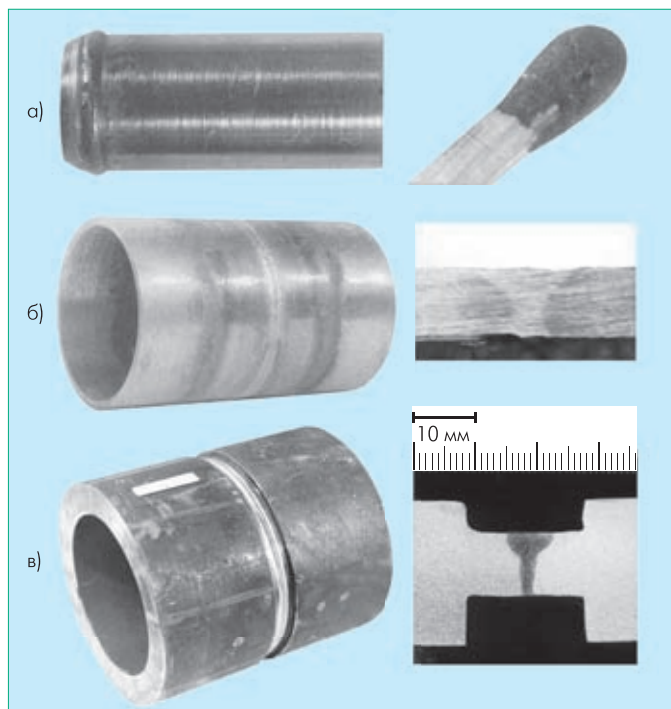


Рис. 1 Внешний вид лазерных сварных соединений и шлифов из труб диаметром 4 (а), 60 (б) и 300 мм (в) из стали 08Х18Н10Т (а, в) и Ст 20 (б). Толщина стенки: а) 0,2мм, б) 3 мм, в) 12 мм. Сварка выполнялась авторами и по методике [11, 19]

физические характеристики плазменного факела, его размеры, температуру и положение и, соответственно, гидродинамику процесса и металлургические особенности, формирование сварного шва [11, 14, 16, 18] (рис.2 г–е, рис.3).

Для сварки металлов используются твердотельные (в том числе волоконные) и газовые лазеры как периодического, так и непрерывного действия [2–8]. Скорости ЛС с непрерывным излучением в несколько раз превышают традиционные методы сварки плавлением – порядка 50–200 и более м/ч. Это означает не только высокую производительность процесса, но и малые затраты энергии, т.е. отношение мощности излучения к скорости сварки, что обуславливает экономическую эффективность ЛС. При лазерной сварке импульсным излучением скорость процесса значительно ниже, чем при сварке непрерывным излучением, и практически сопоставима со скоростями при традиционных методах сварки.

В целом, основные преимущества ЛС перед иными видами сварки [1–24]:

- высокая производительность (цикл при автоматизированной загрузке и выгрузке деталей составляет 0,04–4 мин при скорости сварки 40–1000 м/ч и толщине свариваемого металла за один проход от долей миллиметра до 20 мм и более) и низкая трудоемкость (в 3–20 раз ниже традиционных способов сварки);
- возможность сварки самого широкого спектра марок сталей, сплавов и материалов: от высоколегированных, высоко-

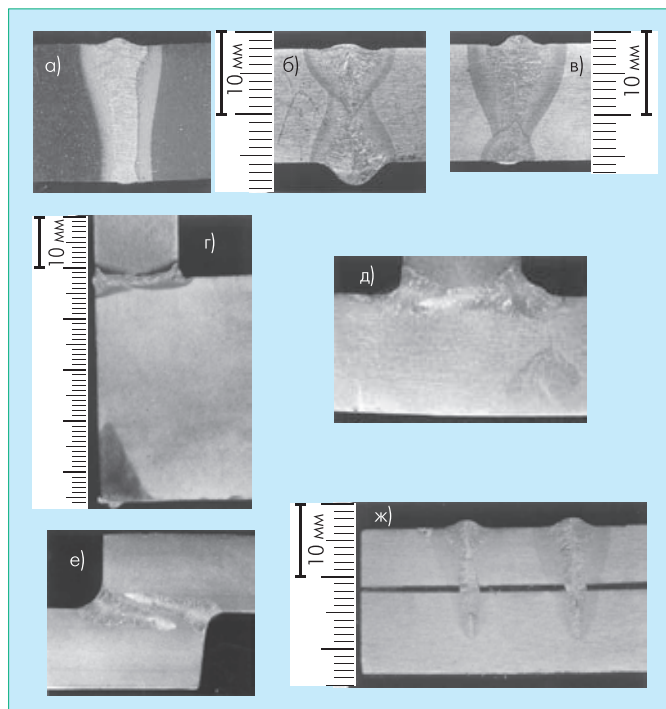


Рис.2 Макрошлифы сварных соединений: стыкового одно-стороннего (а), двухстороннего (б), с подваркой корня шва (в), углового (г), таврового (д), нахлесточного (е), проплавного 3-слойного (ж). Использовалась корпусная сталь 09Г2С (а), высокопрочная сталь 12ХН4МДА (б–г, ж), высоколегированной коррозионно-стойкой стали 08Х18Н10Т (д–ж). Сварка выполнялась на CO₂-лазере "Ижора-М" [11, 19]

коуглеродистых марок стали до сплавов меди и титана, пластмасс, керамики, алмазов, стекла и разнородных соединений;

- высокое качество сварных соединений; во многих случаях механические свойства швов оказываются на уровне основного материала;
- нагрев деталей и деформации минимальны – в 3–5 раз ниже, чем при дуговой сварке (что наиболее характерно для импульсно-периодических режимов);
- возможность сварки в труднодоступных местах и разных пространственных положениях с углом наклона лазерного пучка к поверхности детали до 15–30°, где сварка традиционными способами в ряде случаев невозможна (см. рис.2, 3);
- возможность сварки без изменения режима комбинированных изделий с переменной толщиной в 3–5 и более раз (рис.3);
- гибкость процесса, возможность быстрой автоматической программируемой и дистанционной перенастройки и переналадки на другие режимы или технологические процессы;
- экономия электроэнергии и присадочных материалов;
- хорошие, комфортные условия труда, экологическая чистота.

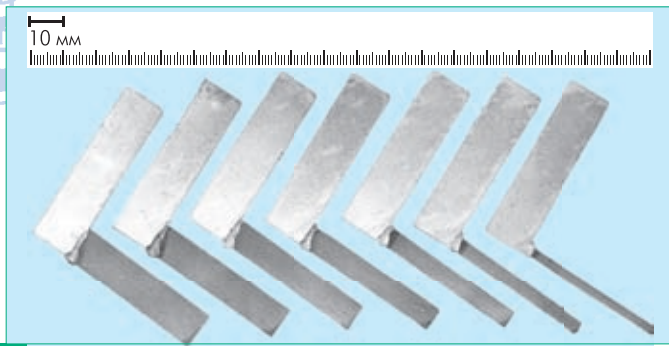


Рис.3 Макрошлиф углового разностенного соединения из высокопрочной судкорпусной стали 12ХН4МДА и коррозионно-стойкой нержавеющей стали 08Х18Н10Т. Сварка выполнялась на CO₂-лазере "Ижора-М" [11, 19]

Исследования лазерной сварки сталей разных классов (судкорпусной 09Г2С, углеродистой котельной 22К, теплоустойчивой низколегированной 10ГН2МФА, коррозионно-стойкой высоколегированной 08Х18Н10Т, высокопрочной среднелегированной стали 12ХН4МДА) в течение более 20 лет выполнялись на предприятиях Москвы и Санкт-Петербурга: в НПО "ЦНИИТМАШ", ПО "Ижорский завод", в ЦНИИ КМ "ПРОМТЕЙ", НИИЭФА им.Д.В.Ефремова, ЦНИИТС (рис.1–4). Сварку со сквозным проплавлением выполняли горизонтальным пучком 15-кВт CO₂-лазера "Ижора-М" и 30-кВт CO₂-лазера "Титан" (НИИЭФА им. Д.В.Ефремова) перемещением образцов сверху вниз со скоростью 10–20 мм/с (т.е. сваривая вертикальные швы "на подъем") при $q_{0,5} = 3,8\text{--}4,2 \text{ МВт/см}^2$ (9–10,5 кВт) по схеме, приведенной на рис.5, $q_{0,5}$ – средняя мощность по эффективному диаметру пучка, ограничивающему 50% подводимой к образцу лучевой мощности. Выполняли сварку также и перемещением образцов в горизонтальном направлении, тоже горизонтальным пучком. Лазерный пучок (при мощности до 10,5 кВт и скорости сварки 10–20 мм/с, в гелиевой среде) фокусировался оптической системой Кассегрена на поверхность заготовки, расплавлял металл в зоне воздействия, образуя при этом глубокий парагазовый канал.

При проведении экспериментов и исследований использовали оптические устройства и средства измерения, оснастку – разработки Скрипченко А.И. (последние 10 лет он возглавляет лабораторию "ЛазерСофт"). Для сварки

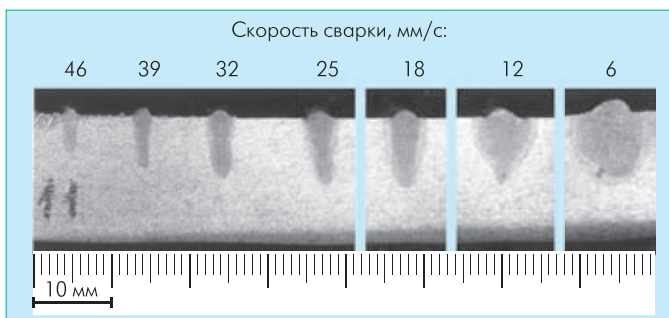


Рис.4 Поперечный макрошлиф из коррозионностойкой стали 08Х18Н10Т. Сварка выполнялась на цилиндрическом образце, в гелии, "на подъем"

использовали, как правило, плоские образцы, размером (12–15)×(50–120)×240 мм, фрезерованные с чистотой обработки R_z 40 – R_z 160 и собранные на прихватках, встык, без зазора (после их протирки ветошью, смоченной в ацетоне) (рис.6, 7), или точеные цилиндрические образцы диаметром до 300 мм и толщиной стенки до 12 мм. Глубина проплавления, как правило, составляла 1–1,3 мм на киловатт лучевой мощности. Скорость выбиралась минимальная, чтобы обеспечить максимальное проплавление при удовлетворительном формировании шва (но не менее 10 мм/с), поскольку надо было сварить сталь толщиной 12 мм (для механических стандартных испытаний), а максимальная мощность луча CO₂-лазера "Ижора-М" – до 10,5 кВт (редко, нестабильно – до 12 кВт). Для зарубежных и некоторых отечественных лазеров с более качественным излучением (в первую очередь – для моды TEM₀₀) глубина проплавления, как правило, достигает 1,3–2,0 мм/кВт.

При ЛС с глубоким проплавлением в большинстве случаев требуется защита шва, подбираемая в зависимости от свариваемого материала. Сварной шов защищается с одной или с двух сторон гелием или гелиево-аргоновой смесью. С обратной стороны рекомендуется поддувать аргон или азот (особенно для высоколегированных сталей типа 08Х18Н10Т),

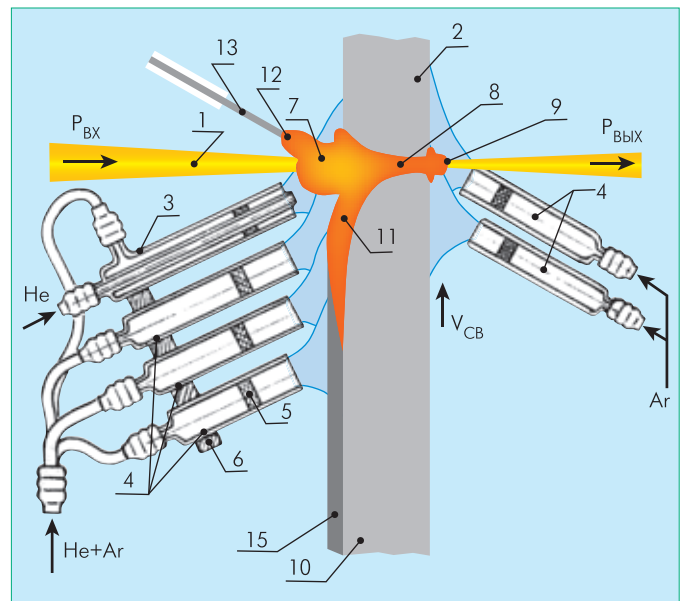


Рис.5 Схема лазерной и лазерно-дуговой сварки излучением до 10–30 кВт, разработана авторами [11, 19]: 1 – лазерный пучок, 2 – свариваемое изделие, 3 – защитное комбинированное цилиндрическое сопло для подачи гелия и гелиево-аргоновой смеси, 4 – защитные цилиндрические сопла для подачи гелиево-аргоновой смеси и Ar, 5 – пористые керамические вставки-рассекатели, 6 – кронштейн для крепления сопел, 7 – плазменный факел с лицевой стороны шва, 8 – "плазменная шуба" внутри парагазового канала, 9 – плазменный факел с наружной стороны шва (в случае защиты ее аргоном), 10 – сварочная ванна, 12 – сварочная дуга (в случае использования ее для лазерно-дуговой сварки), 13 – плавящийся (или неплавящийся) электрод, 15 – усиление сварного шва



Рис.6 Внешний вид стыкового сварного соединения (а) и макрошлифа (б) из стали 22К толщиной 12 мм. Сварка выполнялась на CO₂-лазере "Ижора-М" [11,19]. Мощность 9 кВт, V_{св} = 55 м/ч, гелий

которые существенно улучшают формирование шва за счет образования плазменного факела и с обратной стороны [11] – тогда плазменный факел горит с лицевой стороны, внутри канала и с обратной стороны шва (рис.5, 8, 9). При сварке деталей малых толщин из низкоуглеродистой стали и некоторых других материалов дополнительная защита зоны сварки не обязательна, что значительно упрощает технологический процесс. Защита корня шва не обязательна при сварке низко- и среднелегированных швов. Она нужна в основном при сварке высоколегированных сталей, титановых и алюминиевых сплавов или для улучшения формирования обратного валика шва (рис.8) [11, 19].

При лазерной и лазерно-дуговой сварке в качестве присадочного материала, для легирования металла шва или для снижения требований по точности сборки, применяют порошок или тонкую проволоку диаметром 0,8–1,2 мм и менее. При этом необходима точная подача проволоки в зону плавления.

Для получения качественных сварных швов без корневых дефектов предпочтительна сварка со сквозным проплавлением [11, 13]. Чтобы исключить поры в корневой части, рекомендуется превышать мощность излучения на 15–30% относительно необходимой для проплавления. При этом ширина обратного валика должна быть 0,8–1,5 мм при условии точности сборки и перемещения изделия или лазерной головки не хуже 0,3–0,5 мм. Скорость сварки при излучении порядка 10–20 кВт должна быть не менее 12–20 мм/с, также необходима гелиево-аргоновая защита и фокусировка луча на поверхности образца. Нагрев и расплавление стенок кана-

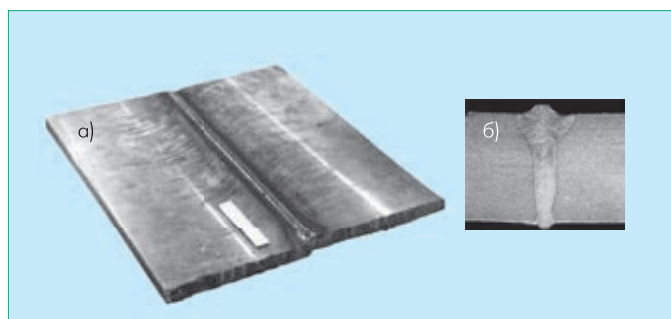


Рис.7 Сварное соединение (а) и поперечный макрошлиф (б) из стали 08X18H10Т толщиной 12 мм. Мощность 10,5 кВт, V_{св} = 12 мм/с, гелий. Сварка выполнялась авторами и по методике [11, 19]

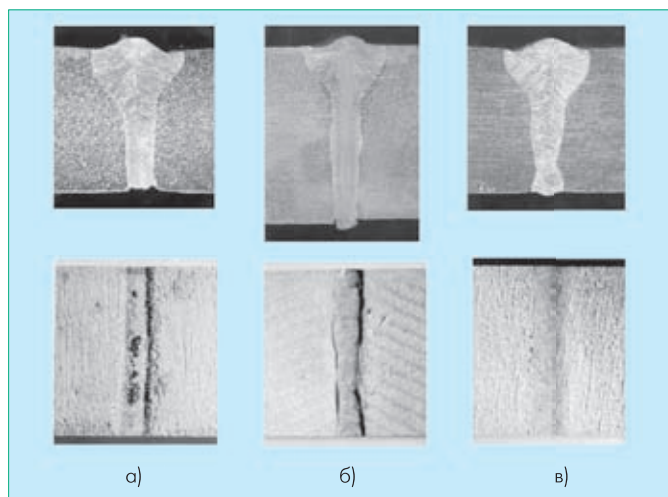


Рис.8 Макрошлифы и внешний вид поверхности обратного валика сварных швов, выполненных а) без его защиты, б) с защитой гелием и в) аргоном. Сталь марки 08X18H10Т толщиной 10 мм (а,б) и 12 мм. Сварка выполнялась по технологии [11,19]

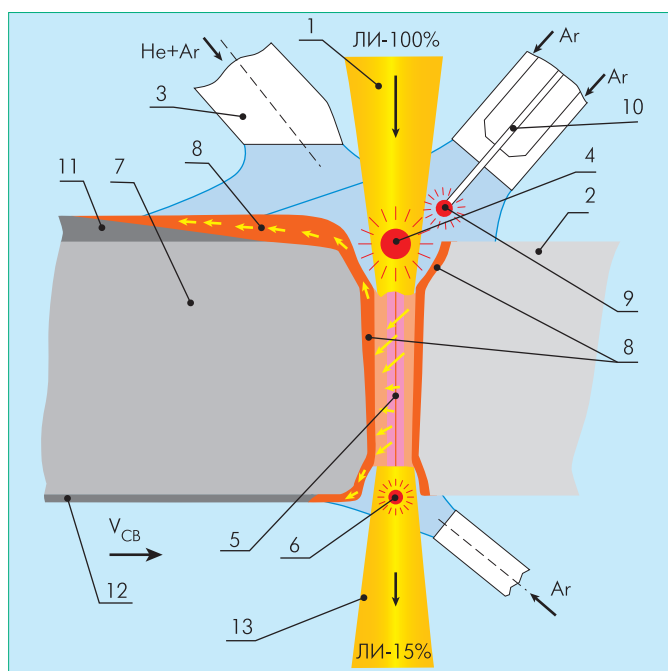


Рис.9 Схема физической модели процесса лазерной и лазерно-дуговой сварки [5, 7]: 1 – лазерный пучок ЛИ, 2 – свариваемое изделие, 3 – защитное сопло для подачи гелия и гелиево-аргоновой смеси, 4 – плазменный факел с лицевой стороны шва (точечный тепловой источник), 5 – "плазменная шуба" внутри парогазового канала (линейно распределенный тепловой источник), 6 – плазменный факел с наружной стороны шва (в случае защиты ее аргоном, точечный тепловой источник), 7 – сварной шов, 8 – сварочная ванна, 9 – сварочная дуга (в случае использования ее для лазерно-дуговой сварки, точечный тепловой источник), 10 – плавящийся (или неплавящийся электрод), 11 – выпуклость сварного шва с лицевой стороны, 12 – выпуклость сварного шва с обратной стороны, 13 – выходящее лазерное излучение

ла в этом случае происходит за счет плазменного точечного источника в верхней части и распределенного линейного плазменного источника ("плазменной шубы") в его средней и

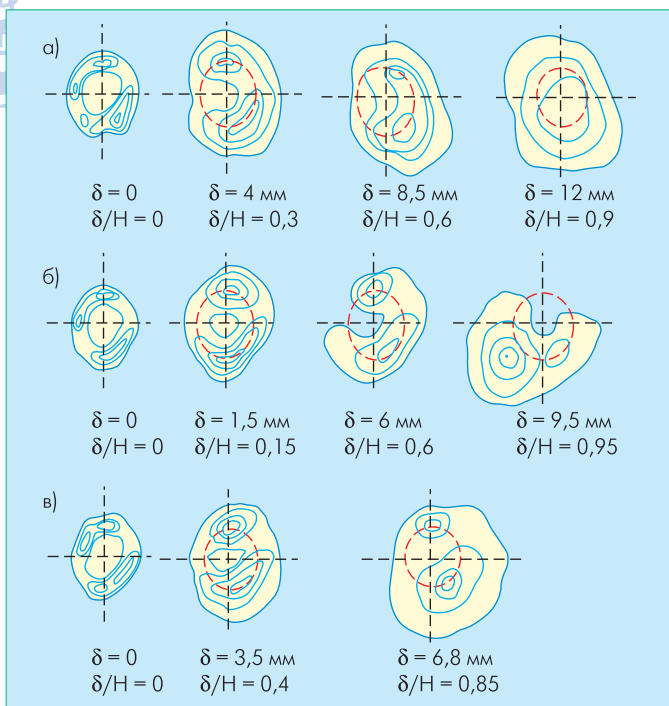


Рис.10 Термограммы прошедшего через металл излучения, полученные на расстоянии 200 мм от точки фокуса при мощности пучка 8 кВт и скорости сварки 6 мм/с (а), 12 мм/с (б), 20 мм/с (в) для разных значений приведенной толщины металла (приведенная толщина металла равна отношению толщины проплавляемого образца δ к максимальному значению глубины проплавления H)

корневой частях (см. рис.9). В случае поддувания с обратной стороны шва аргона точечный плазменный источник нагрева формируется и со стороны корневой части шва. При лазерно-дуговом процессе добавляется еще один точечный источник нагрева, что очень усложняет проблему расчетов и моделирования, особенно если учесть и множество других факторов, влияющих на физику процесса (рис.5, 9, 10).

Эксперименты, проведенные авторами [11, 19] на десятках клиновидных образцов и пластинах, показали, что в стационарном, установившемся процессе взаимодействия лазерного пучка с металлом образуется и поддерживается парогазовый канал (воронка) диаметром до 1–2 мм в средней части (рис.5, 9, 11–13). Давлением паров расплавленный металл удерживается на стенках канала с некоторым перемещением вниз в верхней части и вверх в нижней части – и весь металл переносится в хвост ванны (рис.9, 11). При этом, при низкой скорости сварки, расплавленный металл может частично или полностью закрывать этот канал и, соответственно, проходить лучу. В этом случае происходит "взрывное вскипание" и испарение неметаллических включений в металле, и образуются поры. При нестабильном переносе металла ширина средней части шва может колебаться до 50–100%.

Лазерный пучок при сквозном проплавлении и величине проходящей мощности более 10–25% сохраняет все свои характерные особенности по распределению плотности (рис.10). И только при уменьшении доли проходящей мощности до 10% и менее перекрывается путь прохождения

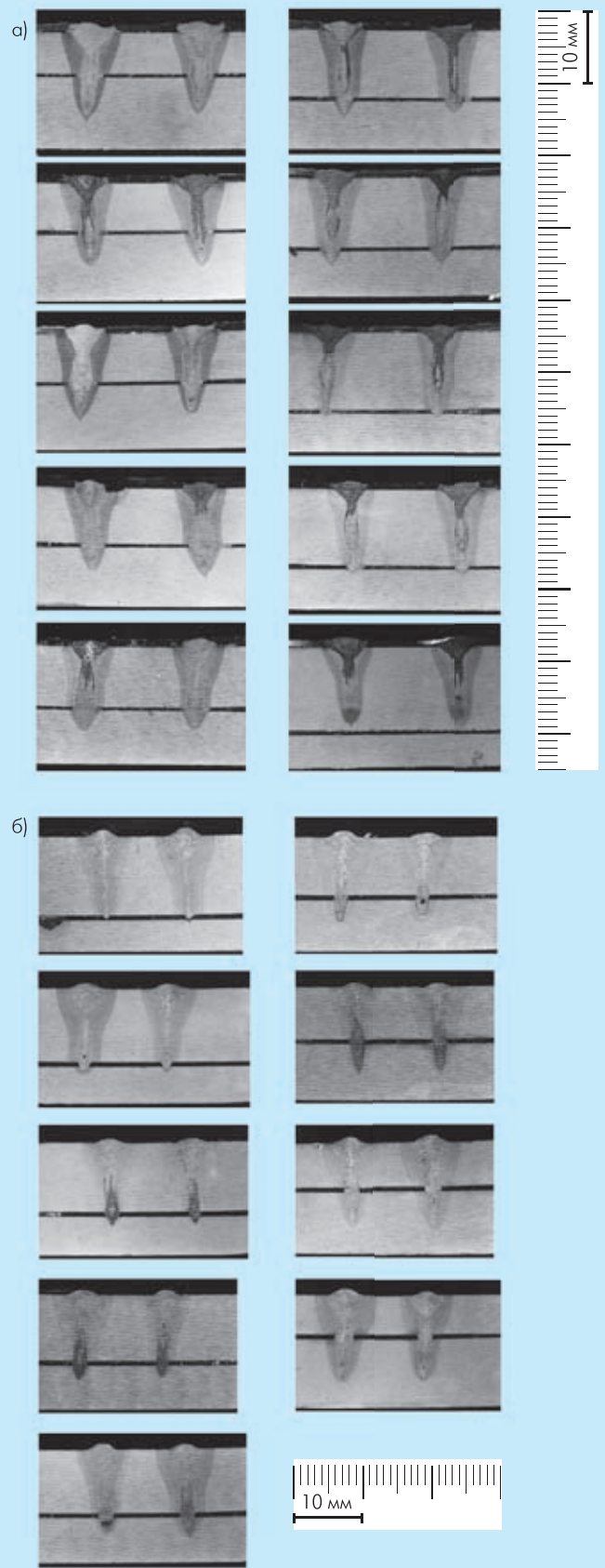


Рис.11 Макрошлифы образцов сварных соединений для гидродинамических исследований: высоколегированная лента из 08X18H10T (на фото темная полоса), приваренная с двух сторон к клиновидному образцу (а) и приваренная между двумя клиньями (б) из углеродистой стали (светлые полосы шлифа) лазерными проплавленными швами

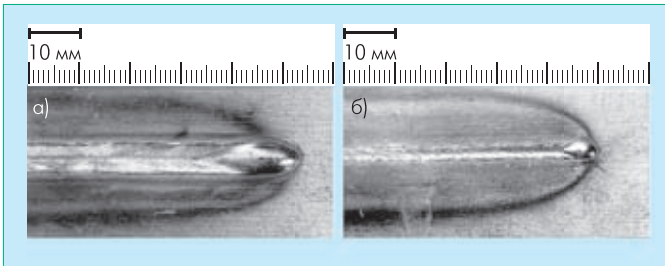


Рис.12 Внешний вид сварочной ванны при резке выключении лазерного пучка с лицевой стороны (а) и с обратной стороны (б) шва на стали 12ХН4МДА при проплавлении пластины толщиной 12 мм с мощностью 10,5 кВт и скоростью сварки 10 мм/с

лазерного пучка через канал в его нижней части и происходит размывание его характерных особенностей, т. е. начинается процесс переотражения луча в корневой части канала. Прямое взаимодействие лазерного пучка с металлом очень вредно с технологической точки зрения: при сквозном проплавлении возникают поры, при несквозном – корневые дефекты. Модели "переотражения в парогазовом канале" многих исследователей [22–24] в 1970–1980-х годах были неточны, относились только к частному случаю физики процесса лазерной сварки в корневой части шва и при диаметре канала меньше критического [5, 7]. Для качественных сварных швов необходим стабильный перенос металла из канала в хвост ванны, без прямого взаимодействия с пучком, т. е. без механизма переотражения в центральной его части.

При мощности излучения более 1–2 кВт (сварка в непрерывном режиме генерации излучения) лазерная плазма снижает пропускную способность лазерного излучения (рис.14). Необходимость подавления плазмы возникает, как правило, при мощности более 1–3 кВт в аргоне и на воздухе, более 7–9 кВт – в среде N₂ и CO₂, более 20–25 кВт – в He. При мощности излучения до 1–2 кВт для защиты сварного шва от атмосферного воздействия можно использовать более дешевый газ, подходящий по технологическим и металлургическим соображениям, например Ar, а при мощностях до 8 кВт – N₂ и CO₂.

При увеличении мощности до 2–7 кВт могут применяться лазерные головки со встроенными соляными линзами. Но в связи с увеличением размеров сварочной ванны необходимо увеличивать диаметр сопла. При мощностях более 3–5 кВт используются, как правило, зеркальные системы. Кроме того, применение чистого аргона невозможно, поскольку лазерная плазма не позволяет повысить глубину про-

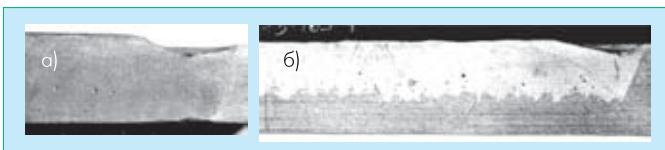


Рис.13 Продольные осевые макрошлифы сварных швов, вырезанные по центру кратера, при резке выключении мощности излучения: а) со сквозным проплавлением, $\delta = 12$ мм, сталь 22 К, защитный газ – гелий, $P = 10$ кВт, $V_{св} = 12$ мм/с, б) без сквозного проплавления, $\delta = 20$ мм, сталь 09Г2С, защитный газ – CO₂, $P = 8$ кВт, $V_{св} = 12$ мм/с

плавления более 1–3 мм, несмотря на увеличение мощности. В интервале мощностей 7–8 кВт допустимо использование N₂, CO₂ или смесей газов на основе гелия с добавлением Ar, N₂, CO₂. Смесей, как правило, более предпочтительны, поскольку позволяют добиться формирования шва без подрезов, а также более экономичны. При коаксиальной конструкции сопла необходимо принудительное охлаждение.

С увеличением мощности лазерного излучения свыше 7–8 кВт глубина проплавления в среде N₂ и CO₂ не возрастает из-за экранирующего воздействия плазмы, поэтому при сварке лазерным излучением мощностью 7–11 кВт чаще всего применяют гелий или смеси на его основе.

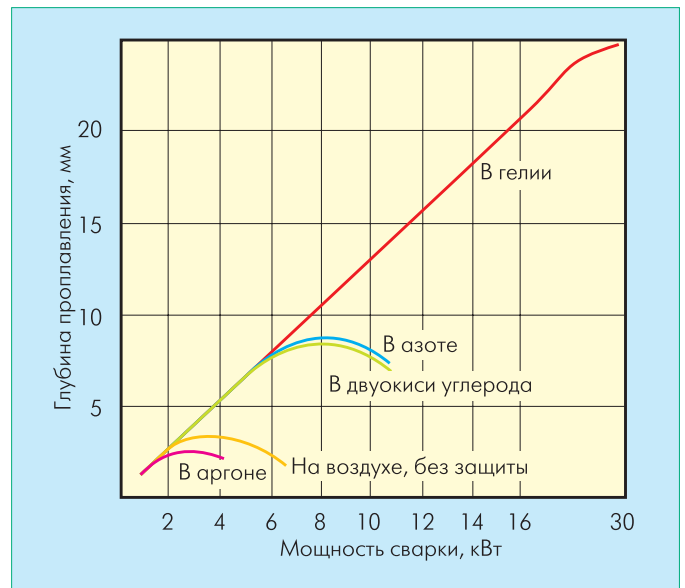


Рис.14 Зависимости глубины проплавления при лазерной сварке в различных защитных средах при изменении мощности

При выборе защитного газа гелиевая среда (или смеси на его основе) более предпочтительны не только для максимального проплавления, но и для более качественного формирования сварного шва (рис.15).

При конструировании защитных устройств и лазерных головок для мощности ~10 кВт следует учитывать, что высота плазменного факела над поверхностью сварочной ванны составляет 45 и 55 мм (в гелии) для мощностей 8–10 кВт и 11–13 кВт, соответственно. Попытка применения цилиндрических сопел с аксиальным расположением при сварке с излучением 5–10 кВт привела к увеличению диаметра сопла до 36 мм, расход гелия возрос до 80 л/мин, что экономически нецелесообразно. Устранить этот недостаток позволили специальные защитные устройства конструкции Э.И.Явно (см. рис.5).

Повышение мощности свыше 15–25 кВт приводит к усилению процессов экранирования излучения и интенсификации процессов плазмообразования, поэтому увеличение глубины проплавления свыше 25 мм вызывает серьезные трудности. Необходимы дополнительные меры для подавления плазмо-

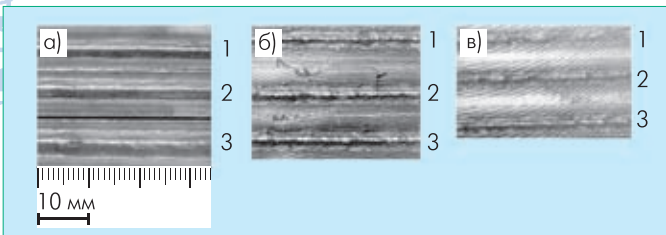


Рис.15 Лицевая поверхность сварных швов на низколегированной стали, выполненных в гелии (а), в азоте (б), в двуокиси углерода (в) при мощности излучения 8 кВт и скорости сварки 20 (1), 16 (2), 12 (3) мм/с. Сварка выполнялась авторами [11, 19]

образования. Одним из таких способов может быть местное низкое вакуумирование, хотя экономически это и не очень привлекательно. Однако вакуумные камеры с контролируемой атмосферой значительно расширяют технологические возможности ЛС, особенно если учесть, что глубина проплавления значительно возрастает при достаточно низком вакууме (1–100 торр). Такие камеры эффективны также для поверхностного легирования металлов из газовой фазы.

Другой путь снижения отрицательного влияния лазерной плазмы – временное модулирование мощности лазерного излучения. Для этого, например, можно использовать вращающиеся отражающие секторные элементы, перекрывающие трассу луча. При этом средние удельные затраты энергии на единицу площади стыка примерно такие же, как и в непрерывном режиме. Это объясняется большой скажностью, меньшей скоростью процесса, большими конвективными и радиационными потерями.

Импульсно-периодический режим (ИПР) по сравнению с непрерывным обладает значительно большей термической эффективностью процесса проплавления, т. е. более полным использованием энергии луча. Однако проявляется это на длительности импульса излучения. Но при ИПР сложнее добиться качественного формирования обратной стороны шва, хотя бы с небольшим перекрытием (нахлестом) свар-

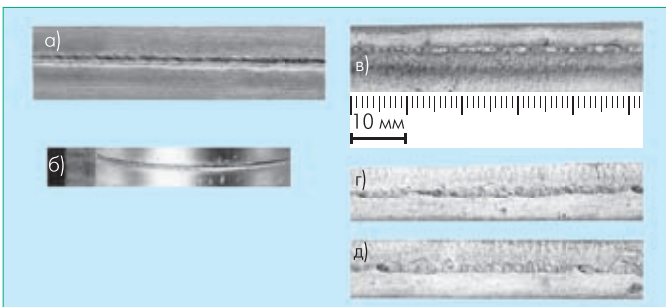


Рис.16 Обратная сторона сварного шва при сварке в непрерывном (а, б) и в импульсно-периодическом режимах (в, г, д) на стыковых плоских (а, в, г, д) и кольцевом (б) соединениях, на стали 12ХН4МДА (а, в, г, д) и титановым сплавом (б): а, б – удовлетворительное и качественное формирование обратной стороны сварных швов, в, г, д – дефекты сварных швов, вызванные низкой средней мощностью ИПР (в), нестабильной средней мощностью (г), одновременно нестабильной средней мощностью лазерного излучения и смещением луча относительно стыка (д)

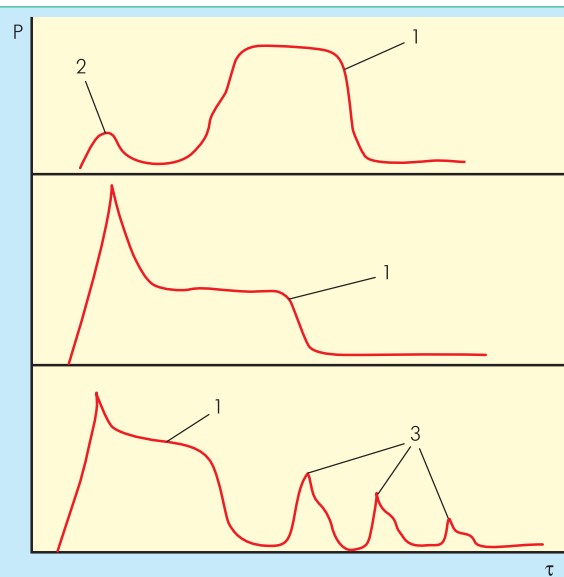


Рис.17 Примеры модуляции мощности лазерного излучения с заданными передним и задним фронтами сварочного импульса (1) и введением дополнительных импульсов: (2) предварительного и (3) последующих

ных точек. Поэтому непрерывный режим (или близкий к нему) при сварке более предпочтителен, поскольку обеспечивает более гарантированный провар и качество сварных соединений (рис.16).

Таким образом, временное модулирование мощности целесообразно при прецизионной лазерной сварке или если необходимо ограничивать нагрев изделия по конструктивным или технологическим соображениям. Кроме того, временное модулирование позволяет регулировать тепловложение и управлять переносом жидкого металла из пароголового канала в хвостовую часть сварочной ванны. В этом случае большое значение имеет не только частота следования импульсов и скажность, пиковая и средняя мощность излучения, но и форма импульсов – крутизна, характер переднего и заднего фронтов и соотношение их величины (рис.17). Таким образом, временная модуляция лазерного излучения при сварке значительно расширяет технологические возможности. Она особенно актуальна при сварке цветных металлов, сплавов меди и алюминия, а также при решении сложных технологических задач.

Автор искренне благодарит А.В.Суркова, А.В.Козлова, Г.А.Баранова, И.С.Ледевича и А.К.Зинченко за помощь при проведении экспериментов и исследований.

В следующей части обзора мы обсудим результаты механических испытаний и металлографических исследований сварных соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дж. Рэди.** Действие мощного лазерного излучения – М.: Мир, 1974, 468 с.
2. **Игнатов. А.Г.** Работы по лазерной сварке энергомашиностроительных и судостроительных сталей и спла-

вов больших толщин в России и за рубежом. – ЛазерИнформ, 1998, N 148–149, с.10–13.

3. **Игнатов А.Г., Козлов А.В., Скрипченко А.И. и др.**

Лазерное технологическое оборудование для обработки материалов. – Л.: ЦНИИ РУМБ. 1988, 118 с.

4. **Игнатов А.Г., Суздалев И.В.** Состояние и перспективы применения лазерного технологического оборудования. – Судостроительная промышленность. Серия: Сварка, 1989, вып.7, с.3–18.

5. **Игнатов А.Г., Скрипченко А.И., Лукьянов В.И. и др.**

Лазерное технологическое оборудование для обработки материалов в СССР и за рубежом. Обзор. – Л.: ЛазерИнформ, 1989.

6. **Игнатов А.Г., В.Д.Горбач, А.А.Васильев и др.** Опыт использования лазерных технологий в судостроении / О.Г.Соколов, В.М.Левшаков, В.Л.Чабан.– Судостроение, N1, 2000, с.49–53.

7. **Игнатов А.Г., Скрипченко А.И.** Лазерное технологическое оборудование для обработки материалов. Технологические особенности и эффективность применения. Обзор. – СПб: ЛазерИнформСервис, 2005.

8. **D.Rassel.** CO₂ – лазеры в судостроении. – ЛазерИнформ, 1997, N 127, с.4–7.

9. **J.Weber.** Laser Offers Key Economies in Heavy Section Welding. – Welding Journal, 1983, N 2, p.23–26.

10. **Басов Н.Г., Горный С.Г., Данилычев В.А. и др.** Физический механизм глубокого проплавления при лазерной сварке металлов. – Письма в ЖТФ, 1985, 11, № 21, с.1337–1341.

11. **Игнатов А.Г., Козлов А.В., Скрипченко А.И. и др.**

Лазерная сварка со сквозным проплавлением сталей различных классов. – Автоматическая сварка, 1987, N9, с.26–29.

12. **Игнатов А.Г., Усанов Ю.Я.** Анализ технологии лазерной резки и сварки излучением большой мощности.

Экспертная оценка качества излучения и узлов технологической оснастки, оптической системы ЛТК "Исеть" – СПб.: ЛИЦ МНТ ГКНТ, 1991.

13. **Игнатов А.Г., Скрипченко А.И.** О качестве сварных швов, выполненных лазерным лучом на энергомашино-

строительных сталях. Внедрение высокоэффективных технологических процессов с применением лазеров в промышленности при реализации программы "Интенсификация-90": Материалы краткосрочного семинара 9–10 декабря. – Л.:ЛДНТП. 1986, с.31–35.

14. **Арутюнян Р.В., Баранов Г.А., Большаков Л.А. и др.**

Закономерности импульсно-периодических режимов глубокого проплавления металлов лазерным излучением. Препринт ИАЭ № 4137/16. –М.:ИАЭ им.Курчатова. 1985.

15. **Скрипченко А.И., Сурков А.В.** Выбор оптимальных параметров лазерного пучка для лазерной сварки. – Автоматическая сварка, 1983, № 2, с.45–48.

16. **Скрипченко А.И., Сурков А.В.** Проплавливающая способность концентрированного лазерного луча. – Сварочное производство, 1984, № 5.

17. **Саяпин В.П., Антонова Г.Ф., Косырев Ф.К.** Влияние сканирования лазерного луча на геометрию сварного шва при глубоком проплавлении.– Физика и химия обработки материалов, 1997, № 1, с.68–71.

18. **Игнатов А.Г., Игнатов В.А., Козлов А.В. и др.** Проплавление металлов непрерывным излучением CO₂-лазера. – Судостроительная промышленность. Сер. Сварка, 1987, вып.3, с.3–19.

19. **Сурков А.В., Игнатов А.Г., Скрипченко А.И. и др.**

А.с.1262837, СССР, МКИ В 23 К 26/00. Способ лазерной сварки. – Приоритет от 05.02.1985 г.

20. **Козлов А.В., Скрипченко А.И., Игнатов А.Г. и др.** Технический отчет по теме И-2-1166. – Л.: ЦНИИ КМ ПРОМТЕЙ. 1987.

21. **D.T.Swift-Hook, A.E Gick.** Penetration Welding with Lasers. – Welding Journal, 1973, 52, N 11, p.492S-499S.

22. **Григорьянц А.Г.** Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989, с.304.

23. **Лопота В.А.** Исследование сварочных характеристик мощного лазерного луча. Автореферат диссертации на соискание степени. к.т.н. – Л.: ЛПИ, 1981, 16 с.

24. **Arata Y.** Fundamental characteristics of high energy density beams in material processing. – Laser in materials processing: ICALEO'86, 10–13 Nov., 1986, p.213–223.