



## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕТОЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Г. М. АЛЕКСЕЕВ**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, **У. ДИЛТАЙ**<sup>2</sup>, проф., д-р-инж., **А. В. ГУМЕНЮК**<sup>2</sup>, д-р-инж., **Г. А. ТУРИЧИН**<sup>3</sup>, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН **В. А. ЛОПОТА**<sup>3</sup>, **С. С. ШИЛОВ**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, **А. Г. ГРИГОРЬЯНЦ**<sup>4</sup>, **И. Н. ШИГАНОВ**<sup>4</sup>, доктора техн. наук, **А. И. МИСЮРОВ**<sup>1</sup>, **В. И. МАСЫЧЕВ**<sup>3</sup>, кандидаты техн. наук, **В. К. СЫСОЕВ**<sup>5</sup>, д-р техн. наук

Рассмотрены тенденции развития лазерной сварки, в том числе гибридных процессов. Показана перспективность применения светолазерного оборудования, характеризующегося снижением энергозатрат и расширением технологических возможностей. Отмечены области возможного эффективного использования светолазерных технологий.

*Ключевые слова:* лазерные технологии, лазерная сварка, гибридные способы, светолазерная технология, энергозатраты, моделирование, технологические возможности

Высокая монохроматичность, когерентность и низкая расходимость лазерного излучения позволили создать перспективный вид высококонцентрированного теплового источника. Луч лазера открыл новые возможности в теории и практике сварочных процессов. Сегодня он является единственным сварочным источником энергии, который при атмосферных условиях позволяет получить плотности мощности более  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

В настоящее время мировая промышленность практически повсеместно использует локальный термический нагрев материалов концентрированным лазерным излучением. При фокусировке мощных когерентных лазерных пучков на поверхности материалов происходят такие фазовые превращения конденсированных сред, как плавление, испарение, переходы второго рода. Они являются физической основой ряда технологических процессов: резки, сварки, термообработки, легирования и др. В настоящее время в мире производится и продается лазерного оборудования для обработки материалов примерно на 1,0 млрд дол. США/год [1].

Одними из важнейших технологических процессов являются лазерная сварка (ЛС) и наплавка. Сварке подвергаются практически любые материалы (металлы, композиционные и органические материалы и т. д.) в любых условиях (на земле, в океане, космосе). Результаты специального исследования, выполненного Американским сварочным обществом и Эдисоновским институтом сварки в 1999–2000-х годах по количественной оценке вклада сварки в ключевые отрасли промышленности подтверждают, что более половины валового национального продукта промышленно развитых стран создается с помощью сварки и родственных технологий.

С каждым годом требования к сварке как к процессу, основанному на термическом нагреве материалов, возрастают. Такие традиционные способы, как газовая сварка, электродуговая и др., все чаще заменяются лазерными, отличающимися прецизионностью, универсальностью и имеющими целый ряд технологических преимуществ: лазерные технологии высокопроизводительны, позволяют избежать сварочных дефектов и повысить эксплуатационные свойства изделия. При лазерной обработке материалов происходит минимальное выгорание легирующих элементов. Процесс является экологически чистым, существует возможность его автоматизации.

Лазерные технологии помогают потребителям решить целый ряд проблем таких, как увеличение производительности и снижение себестоимости продукции, повышение технологической прочности и качества продукции, улучшение внешнего вида изделия. В качестве лазерного источника широко используются различные типы газовых и твердотельных лазеров, в частности, мощные газовые CO<sub>2</sub>-лазеры (0,5... 5 кВт и более) и твердотельные Nd:YAG-лазеры соответственно с длинами волн 10,6 и 1,06 мкм. В последние годы в мире наблюдается тенденция преимущественного применения твердотельных Nd:YAG-лазеров, которые позволяют передавать излучение по световоду и манипулировать сварочной головкой при размещении ее на роботе, а также производить сварку объемных конструкций (в авиакосмической отрасли, судостроении, автомобилестроении и т. д.).

Технические и эксплуатационные параметры мощных лазерных систем непрерывно совершенствуются, однако процессы сварки с помощью лазеров все еще остаются достаточно дорогостоящими. По данным Центра лазерных технологий США (г. Плимут), стоимость 1 Вт энергии твердотельных лазеров составляет 120... 200 дол. США. Для нового поколения твердотельных волоконных лазеров, которые могут успешно резать и сваривать даже алюминий и медь (материалы с высоким коэффициентом отражения), стоимость 1 Вт достигает 300 дол. США. Все это сдерживает широкое использование мощных лазеров в сварочном про-

<sup>1</sup> ОАО «НИИТавтопром».

<sup>2</sup> ISF-Welding Institute, Aachen University.

<sup>3</sup> Институт лазерной технологии СПбГТУ.

<sup>4</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана.

<sup>5</sup> ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина.



изводстве и заставляет искать пути снижения энергетических затрат.

Анализ применения лазеров показывает, что основным физическим и техническим ограничением на пути снижения стоимости единицы энергии лазерного излучения является КПД преобразования электрической энергии накачки в когерентное излучение. КПД современных мощных лазерных систем составляет 10... 15 % для  $\text{CO}_2$ -лазеров и 1... 3 % для Nd:YAG-лазеров. Резервы повышения КПД в значительной мере исчерпаны, так как они приближаются к предельным физическим характеристикам активных сред.

ЛС, обладая определенными преимуществами по сравнению с известными классическими способами, имеет и ряд недостатков [2]: жесткие термические циклы, которые могут приводить к снижению технологической прочности сварных соединений; вероятность образования брызг при высоких скоростях сварки; затруднительное газовыделение из расплавленного металла шва при высоких скоростях сварки и соответственно повышенное порообразование; гидродинамическая неустойчивость ванны расплава при высоких скоростях сварки; низкое значение полного КПД; высокая себестоимость сварки погонного метра шва. Технология ЛС имеет, как и любой другой способ, свои преимущества и недостатки, которые определяют границы ее технологических возможностей и эффективные технико-экономические области применения.

Прогресс в создании мощных потоков когерентной энергии идет по пути наращивания мощности излучения с соответствующим увеличением потребляемой электрической мощности. Это, в свою очередь, ведет к техническому усложнению лазерного сварочного оборудования, снижению его надежности и технико-экономических показателей и в итоге не позволяет в полной мере реализовать принципиальные возможности лазерной технологии. ЛС получила свое дальнейшее развитие в виде создания гибридных способов — двухлучевой лазерной, лазерно-дуговой, лазерно-индукционной, лазерно-плазменной, светолазерной, которые

находят все большее применение в промышленности вследствие своей высокой технико-экономической эффективности. Соединение различных способов сварки с лазерной в единый технологический сварочный процесс позволяет нивелировать недостатки каждого способа и достичь расширения технологических возможностей. Светолазерный способ сварки обладает широкими технологическими возможностями, так как позволяет программировать температуру в точке обработки на изделия по заданному термическому циклу [3], что, в частности, позволяет производить сварку встык тонколистовых материалов без присадки.

Авторы работы [4] на основе анализа особенностей комбинированного воздействия на металлы при использовании гибридных способов сварки сделали вывод о существовании взаимосвязи гибридных источников тепла (лазерного и дугового), приводящей к нарушению аддитивности теплового воздействия на изделие. Последнее означает, что комбинированный источник тепла может обеспечить более высокую скорость металлообработки, чем каждый отдельно при эффективной мощности каждого из источников, эквивалентной суммарной мощности источников (в условиях отсутствия взаимодействия между ними). Иными словами, совместное использование источников тепла для гибридных способов сварки дает возможность при значительно меньшей мощности лазерного излучения достичь такой же производительности процесса, как и при обычной ЛС. Необходимо также отметить, что использование гибридных способов сварки позволяет повышать производительность процессов металлообработки не за счет дорогостоящей энергии лазерного излучения, а за счет более дешевой энергии второго источника тепла. В этом состоит одно из основных преимуществ гибридных способов соединения и обработки металлов.

Таким образом, коммерческая востребованность в светолазерном оборудовании и технологиях определяется снижением стоимости энергозатрат при светолазерной обработке при одновременном расширении технологических возможностей.

**Снижение энергозатрат при светолазерной обработке.** Существенный прогресс в разработке энергоэкономных технологий может быть достигнут при переходе на новую концепцию термического нагрева материалов. Суть ее заключается в интегральном подходе, т. е. применении для нагрева материалов комбинации двух нагревателей, использующих различные методы генерации чистой энергии и активирования поверхности в точке обработки световым лучом в реальном масштабе времени.

Для нагрева материалов и последующей сварки или наплавки наряду с когерентным источником нагрева (лазером) предлагается использовать энергию полихроматического газоразрядного светового источника, имеющего специальную оптическую фокусирующую систему (рис. 1).

Поглощательная способность  $A$  обрабатываемой лазерным излучением поверхности зависит от длины волны лазерного излучения, температуры и

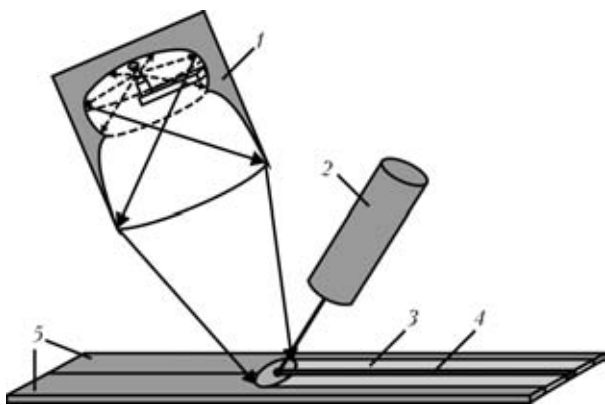


Рис. 1. Схема светолазерной сварки при использовании Nd:YAG- или  $\text{CO}_2$ -лазеров в комбинации с мощными полихроматическими источниками энергии: 1 — полихроматический источник энергии; 2 — Nd:YAG- или  $\text{CO}_2$ -лазер; 3 — зона нагрева металла световым источником; 4 — сварной шов; 5 — свариваемые детали

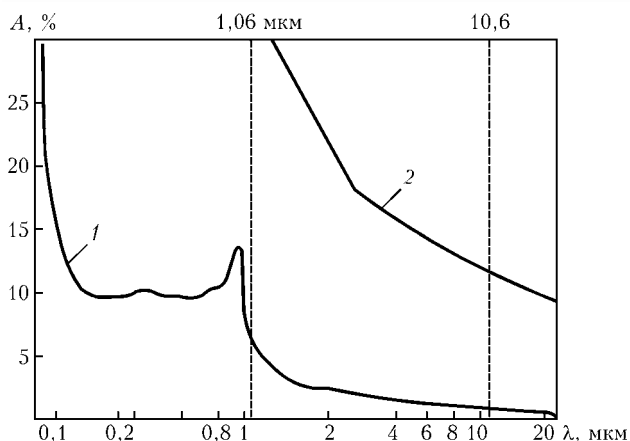


Рис. 2. Зависимость поглощательной способности от длины волны лазерного излучения для алюминия (1) и стали (2)

оптических свойств поверхности [2]. На рис. 2 приведена зависимость поглощательной способности стали и алюминия от длины волны лазерного излучения при комнатной температуре.

Поглощательная способность алюминия составляет около 2 % при применении CO<sub>2</sub>-лазера с длиной волны 10,6 мкм и 5...10 % при применении твердотельного лазера с λ = 1,06 мкм. Лазерное излучение поглощается металлическими материалами в скин-слое и через электроны проводимости энергия передается вглубь металла. Постепенно температура электронного газа и кристаллической решетки выравниваются и примерно через 10<sup>-9</sup>...10<sup>-8</sup> с можно говорить об общей температуре металла в зоне обработки.

Значение коэффициента отражения и поглощения в зависимости от угла падения для полированных поверхностей металлов при относительно невысоких температурах известно. В соответствии с соотношением Хагена-Рубенса коэффициент поглощения A определяется значением коэффициента электропроводности:

$$A \sim \sigma^{-1/2},$$

где σ — удельная электропроводность металла, (Ом·м)<sup>-1</sup>.

Поскольку электропроводность металлов уменьшается при повышении температуры (рис. 3), то соответственно возрастает и коэффициент поглощения. При переходе металла из твердого состояния в жидкое количество электронов проводимости на один атом металла, плотность металла, удельное сопротивление металла (при постоянном токе) изменяются, что приводит в соответствии с законом Хагена-Рубенса к увеличению коэффициента поглощения при повышении температуры в точке нагрева металла (рис. 4).

Низкий уровень поглощательной способности обрабатываемой поверхности и ее зависимость от длины волны лазерного излучения являются существенными недостатками технологии лазерной обработки, так как приводят к значительному повышению порогового значения уровня плотности мощности, необходимой для обработки материала. Однако поглощательная способность металла может быть существенно повышена специальной об-

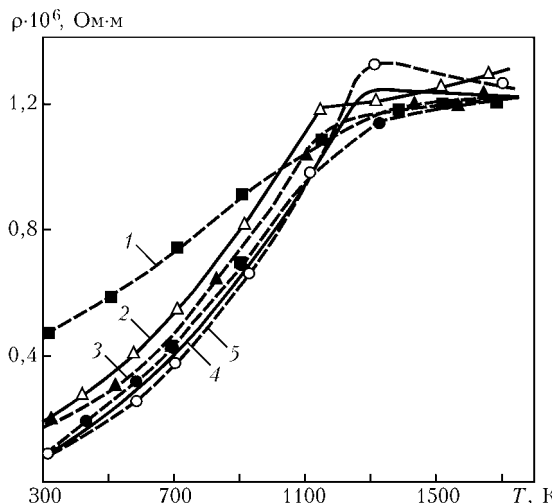


Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления для железа и сталей: 1 — ЭЗХ138; 2 — Ст45; 3 — СтУ12; 4, 5 — Fe

работкой поверхности с использованием физических методов, которые осуществляются одновременно (параллельно) с ЛС и, изменяя оптические свойства поверхности, значительно увеличивают поглощательную способность.

С целью определения эффективности использования световой энергии при светолазерной сварке выполнена работа по созданию математической модели процесса. Данная модель расчета энергетических параметров гибридного процесса лазер + свет для сварки тонколистовых металлических материалов позволит перейти к автоматизированному проектированию гибридного процесса сварки путем проведения предварительного вычислительного эксперимента на компьютере взамен дорогостоящих и длительных натуральных экспериментальных работ и расчетному обоснованию проведения массированного маркетинга в возможных областях применения этого процесса. Экспериментальные работы в этом случае необходимы лишь

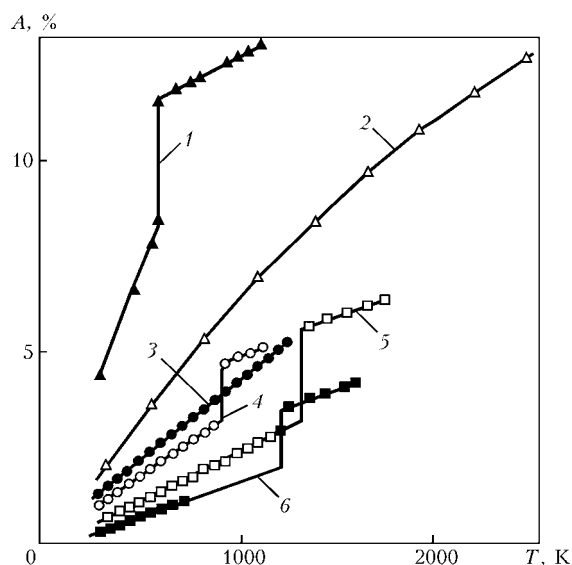


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента поглощения излучения CO<sub>2</sub>-лазера для чистых металлов: 1 — Pb; 2 — W; 3 — Cu; 4 — Al; 5 — Al; 6 — Ag



для точечной проверки компьютерного моделирования процесса формирования ванны и шва.

**Моделирование совместного действия на материал лазерного излучения и сфокусированного излучения мощного светового излучателя.** При совместном действии когерентного лазерного излучения и сфокусированного излучения мощного полихроматического светового излучателя на металл на его поверхности формируется тепловой источник, пространственное распределение которого определяется суперпозицией потоков излучения от лазера и светового излучателя. Для построения математической модели светового нагрева на поверхности материала задана двумерная квадратная сетка с количеством ячеек  $30 \times 30$  и шагом, равным  $0,1$  фокального радиуса пятна от светового излучателя. Источник задавался распределением интенсивности падающего излучения по узлам сетки. Для описания лазерного источника (в зависимости от плотности мощности падающего излучения) использовали разработанную ранее модель глубокого проплавления [5], или в случае, когда плотность мощности недостаточна для формирования парогазового канала, вводили дополнительную поверхностную сетку  $5 \times 5$  с шагом, равным фокальному радиусу лазерного луча, лазерный источник задавали тем же способом, что и световой. Выбранная схема позволила моделировать процесс лазерно-светового нагрева при возможности менять взаимное положение лазерного и светового фокальных пятен на изделии. Процесс нагрева изделия рассматривали в квазистационарном приближении, когда в движущейся вместе с источником системе координат тепловые поля не зависят явно от времени.

Нагрев поверхности изделия потоком сфокусированного излучения мощного светового излучателя приводит к возникновению на поверхности металла распределенного движущегося поверхностного теплового источника. Распределение теплового потока в материал от этого источника определяется локальными значениями плотности мощности потока излучения и локальными значениями коэффициента поглощения излучения, зависящими от температуры поверхности через значение поверхностного импеданса. Таким образом, задача о нагреве материала световым источником тепла оказывается нелинейной, так как мощность теплового источника зависит от температуры поверхности.

Рассмотрим сначала задачу в линейной постановке. Воспользуемся известным выражением для функции Грина трехмерной задачи теплопроводности в подвижной системе координат. С учетом температурной нелинейности коэффициента поглощения это выражение представляет собой интегральное уравнение, для решения которого разработан следующий алгоритм: на первом этапе определяется только температура поверхности. При вычислении интеграла суммированием по двумерной сетке возникающее при этом в каждой ячейке алгебраическое нелинейное уравнение решалось методом простой итерации. При этом определяли локальную температуру в каждой ячейке сетки на поверхности и с ее помощью локальное значение поглощенной мощности излучения светового излу-

чателя. Затем с известным значением распределения поглощенной мощности рассчитывали тепловое поле от светового источника теплоты, которое суммировали с тепловым полем лазерного источника, вид которого, как указано выше, определяли значением плотности мощности лазерного излучения.

Найденное поверхностное распределение температуры и теплового потока позволило перейти к решению тепловой задачи и определению глубины проплавления. Для этих целей уравнение теплопроводности, записанное в подвижной системе координат, перемещающейся вместе с лазерным лучом, решали по явной схеме на трехмерной адаптивной сетке, шаг которой в направлении оси  $Z$  (нормали к поверхности изделия) определяли на основе предварительного аналитического решения задачи о нагреве материала соответствующим по мощности точечным источником с тем условием, чтобы на глубине сварочной ванны поместилось не менее  $30$  ячеек сетки. На границах сетки полученные численные решения «сшивались» с аналитическими решениями задачи о распространении тепла от распределенного теплового источника. Условиями «сшивки» выбраны непрерывность температуры и ее пространственных производных. Использование аналитических решений для областей, удаленных от теплового источника, позволило учесть конструктивное оформление сварного соединения путем введения «эффективных» отраженных источников, обеспечивающих адиабатичность поверхностей изделия.

Описанный алгоритм реализован в виде PC-ориентированной программы на языке Pascal в системе визуального программирования DELPHI 6 и оптимизирован по быстродействию и размеру занимаемой памяти. Он обеспечивает время моделирования одного режима сварки, не превышающее нескольких минут при использовании современных персональных компьютеров. Подключенные к системе диалоговый интерфейс и банки данных по свойствам материалов и параметрам технологического оборудования позволяют прогнозировать размеры и форму сварочной ванны, рассчитывать термические циклы любых точек шва и околошовной зоны, подбирать параметры лазера, светового излучателя и их взаимное расположение. Используемая расчетная схема позволяет гарантировать точность расчетов в пределах  $5...7\%$  относительной ошибки.

**Области возможного использования светолазерного оборудования и технологий.** Важным показателем создаваемого оборудования является возможность программирования температуры в точке обработки на изделии по заданному оптимальному термическому циклу [6–8] при сварке встык тонколистовых материалов по трехкоординатной (объемной) траектории шва. Например, программа создания ультралегкого стального автомобильного кузова ULSAB (Ultralight Steel Auto Body) предлагает использовать закаливающиеся высокопрочные и сверхпрочные стали, что позволяет уменьшить массу деталей кузова до  $30\%$ . При этом данные стали хорошо противостоят удар-



ным нагрузкам и имеют высокие эксплуатационные качества. Для сварки деталей кузова по программе ULSAB рекомендована ЛС. Последняя, учитывая жесткость термического цикла, приводит к образованию в сварном соединении закалочных структур.

Термические сварочные циклы оказывают значительное влияние на свариваемость металлов. Уменьшение жесткости термического цикла, которое в определенных случаях может благоприятно сказываться на свариваемости, может быть реализовано одновременным наложением термического цикла ЛС и менее жестких термических циклов светолучевой обработки [9–12], используя их в режиме предварительного, сопутствующего и последующего подогрева по заданному программируемому термическому циклу для получения в реальном масштабе времени оптимальной структуры металла в сварном соединении.

Программа ULSAB разработана американскими и европейскими ведущими автомобильными фирмами, производителями стали и научными организациями и направлена на демонстрацию эффективного использования стали в производстве автомобилей с существенно сниженной массой.

Светолазерная обработка находит широкое применение при наплавке металлических порошков со специальными свойствами (DMD-процесс), а также для повышения износостойкости быстроизнашиваемых поверхностей деталей нефте- и газодобывающих буровых установок, например, ниппелей бурового райбера. Ниппели с покрытием служат для соединения сервисных трубопроводов установок глубоководного бурения. Высокоинтенсивные способы обработки когерентным излучением, позволяющие получать высококачественные изделия при сварке, наплавке, термообработке и т. д., достаточно перспективны при изготовлении авиакосмических изделий, где высокое качество должно быть гарантировано. Вместе с тем получение гарантированно высокого качества изделий с повышенными эксплуатационными свойствами требует применения материалов с особыми свойствами (композиционных, высокопрочных, высоколегированных и т. п.). При сварке, наплавке и термообработке этих материалов снижается ресурс их технологической прочности (способность к релаксации напряжений, сопротивляемость образованию трещин в сварных соединениях и т. д.), что требует использования программируемых оптимальных термических циклов в зоне обработки. Например, процесс порообразования при сварке алюминиевых сплавов относится к сложным физико-химическим явлениям и его развитие обусловлено не только свойствами исходного металла, но и параметрами сварки [2]. Одной из основных причин порообразования при сварке алюминия и его сплавов является водород, попадающий в металл сварочной ванны из основного и присадочного металла. Из-за высокого сродства расплавленного металла к водороду и падения растворимости, которое наблюдается во время кристаллизации алюминия, необходимо принять меры по предотвращению любого притока водорода в зону шва. Расплавленный алюминиевый сплав при температуре

Таблица 1. Требования к величине зазора и смещению кромок стыковых соединений при лазерной сварке

Толщина металла, мм	Скорость сварки, мм/с	Максимально допустимая величина зазора $b$ , мм	Максимально допустимое смещение кромок $\Delta H$ , мм
0,8...1,5	5,5...22,2	0,12	0,1
0,8...1,5	22,2...33,3	0,10	0,1

660 °С может растворить около 0,7 см<sup>3</sup>/100 г водорода, а при 658 °С, как только он кристаллизовался, — только 0,036. Отличительной чертой ЛС является низкая погонная энергия, поэтому для обратной диффузии водорода остается очень мало времени, что приводит к образованию водородных пор. В то же время с помощью способов сварки, в которых погонная энергия выше, сварочная ванна и время кристаллизации больше (что допускает эвакуацию большего количества водорода), можно достичь уменьшения пористости. Таким образом, гибридная светолазерная сварка в результате повышения погонной энергии позволяет снизить жесткость термического цикла и уменьшить порообразование.

Требования к точности геометрии сборки и соответственно затраты можно значительно снизить, увеличив объем сварочной ванны и уменьшив значение коэффициента формы шва. Этого можно достичь, используя вместе с лучом лазера световой источник нагрева, т. е. гибридную технологию светолазерной сварки [5, 11]. Световой источник, формируя сварочную ванну в режиме теплопроводности, значительно уменьшает коэффициент формы шва и закрывает местные зазоры в результате термического расширения свариваемых кромок, нагреваемых периферией светового луча.

Большие значения коэффициента сосредоточенности лазерного сварочного источника энергии определяют минимальные объемы расплава сварочной ванны, а режим глубокого проплавления — большое значение коэффициента формы шва [2]. Указанные выше факторы предъявляют более высокие требования к точности геометрии сборки свариваемых деталей под сварку. Например, при сварке встык без присадки (рис. 5) конструктивных сталей толщиной  $H$  требования, предъявляемые к зазору в стыке  $b$  и смещению кромок  $\Delta H$  при ЛС, являются весьма жесткими в соответствии с ТР 1.4.1569–86 «Лазерная сварка конструкционных сталей» (табл. 1). Невыполнение требований по геометрии сборки свариваемых деталей при ЛС может привести к утонению (ослаблению) шва, потере конструкционной прочности сварного соединения или непровару корня шва.

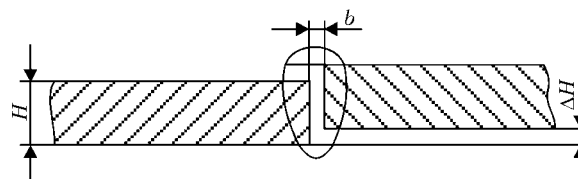


Рис. 5. Схема стыкового соединения с зазором и смещением свариваемых кромок

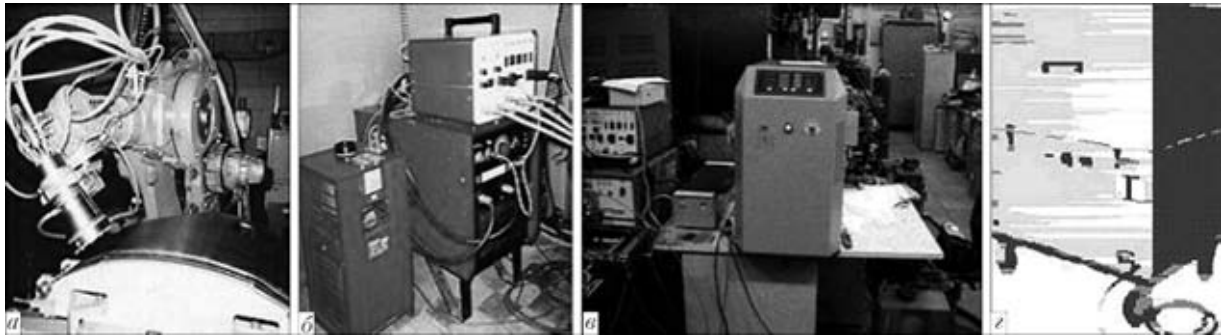


Рис. 6. Комплект СЛУ для сварочного роботизированного комплекса: а, б — роботизированный световой модуль СЛУ; в, г — лазерный модуль СЛУ

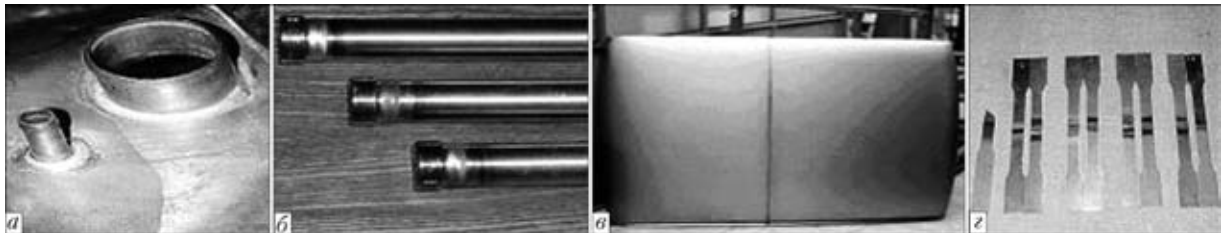


Рис. 7. Примеры применения светолазерных технологий для сварки, наплавки и пайки: а — бензобаки автомобиля, изготовленные с применением световой технологии без нарушения антикоррозионного покрытия в зоне нагрева; б — корпуса источников ионизирующего излучения; в — детали кузова (крыши автомобилей); г — тестирование механических свойств сварных соединений

Таким образом, использование для нагрева когерентного и полихроматического потоков лучистой энергии является перспективным и более экономичным по сравнению с использованием только лазерного излучения и одновременно обладает всеми его преимуществами.

Светолазерная установка (СЛУ), разработанная для решения упомянутых выше задач, выполнена в виде компактного модульного оборудования, устанавливаемого стационарно в производственном помещении. Она может программироваться и гибко встраиваться в роботизированные производственные комплексы и дополнительно комплектоваться порошковым дозатором в случае необходимости наплавки металлическим порошком. СЛУ (рис. 6) включает серийно выпускаемый твердотельный Nd:YAG-лазер, световой модуль, световодный или зеркально-шарнирный узел, агрегатные блоки управления и охлаждения.

Использование СЛУ позволяет:

- снизить себестоимость выпускаемой продукции путем уменьшения производственных издержек, удешевления процесса обработки материалов вследствие энергосбережения, снижения стоимости энергозатрат, экономии потребляемого

сырья, высокой экономичности световой энергии, увеличения КПД;

- повысить производительность в результате синергетического эффекта;
- повысить качество продукции и расширить технологические возможности путем программирования температуры подогрева в заданной точке обработки.

Технологическими преимуществами предлагаемой технологии являются:

- снижение требований к зазорам в стыке кромок тонколистовых (0,5...1 мм) свариваемых деталей по сравнению с ЛС;
- расширение диапазона соединяемых и обрабатываемых материалов, а также количества выполняемых операций (сварки, наплавки и термообработки сварного соединения);
- возможность использования излучателя СЛУ при автоматизированной эксплуатации или размещения СЛУ на промышленных роботах;
- снижение газонасыщения металла шва;
- обеспечение высокой стабильности и экологической чистоты и безопасности.

В ОАО «НИИТавтопром» для ОАО «АвтоВАЗ» проведены экспериментальные работы по

Таблица 2. Показатели расширения технологических возможностей лазерного оборудования при доукомплектовании его световым модулем

Наименование показателей	СЛУ	Лазерное оборудование
Назначение	Сварка, наплавка, термообработка	
Диапазон программирования температуры подогрева по заданному термическому циклу, °С	200...1200	Нет
КПД, %	До 25...30	Nd:YAG-лазер 1...3
Среднее время безотказной работы, ч	1000	1000
Срок службы, лет	5	5
Продолжительность нагрузки, %	85	85
Себестоимость (за 1 Вт лучистой энергии), дол. /Вт	40...75	120...200
Наплавка специальных жаропрочных покрытий по заданному термическому циклу	Возможна	Нет
Наплавка износостойких и специальных покрытий по заданному термическому циклу	««	««
Локальная термообработка по заданному термическому циклу	««	««
Обработка материалов по заданному термическому циклу	««	««



отработке технологии светолазерной сварки тонколистовых стыковых соединений деталей кузова толщиной 0,8...1,2 мм и для ФГУП «Маяк» корпусов источников ионизирующего излучения (в рамках Научно-учебного центра ОАО «НИИТавтопром» совместно с сотрудниками кафедры лазерной техники и технологий МГТУ им. Н. Э. Баумана и группой разработчиков светолазерных устройств чешской фирмы «Svar») (рис. 7). Расчеты, проведенные специалистами Института лазерной технологии СПбГТУ, МГТУ им. Н. Э. Баумана и ОАО «НИИТавтопром», показали (табл. 2), что при светолазерной сварке расширяются технологические возможности лазерного оборудования и сохраняются общие тенденции синергетического управления. Скорость сварки лазером в результате комплектации его световым модулем возрастает на 50 % и более на толщинах до 1,0 мм. При светолазерной обработке с использованием твердотельных лазеров с ламповой накачкой энергозатраты снижаются в 3...4 раза [6].

СЛУ являются результатом исследований в направлении поиска путей расширения технологических возможностей лазеров.

На первой стадии изучения нами выбран и исследуется динамично развивающийся и имеющий большой удельный вес на мировом рынке твердотельный лазер с ламповой накачкой. При объединении двух источников лучистой энергии обеспечивается не только эффективный прогрев до заданных температур свариваемого материала с одновременным проплавлением материала когерентным пучком сравнительно невысокой мощности, но и процесс сварки с более высокой производительностью и более высоким КПД.

Авторы признательны В. С. Дрижову, Л. Н. Майорову, В. М. Федорову, И. С. Чепыжеву,

The trends in development of laser welding, including hybrid processes, are considered. It is shown that the application of laser-light equipment holds promise in terms of reduced costs and widened technological capabilities. The fields of possible efficient application of laser-light technologies are noted.

В. П. Соколову, С. В. Шахову за активное участие в работе Научно-учебного центра.

1. *Мировой рынок лазеров: Обзор 2002 года и прогноз на 2003 // Информ. бюл. Лазерной ассоциации «Лазер-Информ». — 2002. — № 3 (258).*
2. *Григорьянц А. Г., Шигапов И. Н., Чирков А. М. Гибридные технологии лазерной сварки. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.*
3. *Алексеев Г. М., Шилов С. С. Светолазерные технологии и оборудование для сварки и пайки тонколистовых материалов // Инструмент, технология, оборудование. — 2003. — № 5. — С. 13, 17.*
4. *Seyffarth P., Krivtsun I.V. Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment. — London: Taylor & Francis, 2002. — Vol. 1. — 200 p. — (Welding and Allied Processes).*
5. *Лопота В. А., Сухов Ю. Т., Туричин Г. А. Модель лазерной сварки с глубоким проплавлением для применения в технологии // Изв. АН СССР. Сер. Физ. — 1997. — 61, № 8. — С. 1613–1618.*
6. *Алексеев Г. М., Шилов С. С. Разработка технологии и изготовление оборудования для получения штампосварных заготовок из материалов различной толщины, химсостава и свойств: Отчет ОАО «НИИТавтопром» по Государственному контракту № 10.802.11.0018 от 21 февр. 2003 г.*
7. *Алексеев Г. М. и др. // Welding International. — 2000. — 14, № 3. — P. 246–248.*
8. *Алексеев Г. М., Бутов В. Н. Светолучевое сварочное оборудование // Свароч. пр-во. — 1999. — № 9. — С. 33–35.*
9. *Алексеев Г. М. Возможности светолазерной сварки // Информ. бюл. Лазерной ассоциации «Лазер-Информ». — 2003. — № 19 (274).*
10. *Алексеев Г. М. и др. Светолазерные технологии и оборудование — новое направление в сварке и пайке деталей // Тез. докл. XXXIX Междунар. науч.-техн. конф. ААИ. Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров (Москва, 25–26 сент. 2002 г.). — М.: МГТУ «МАМИ», 2002. — С. 5–7.*
11. *Алексеев Г. М., Борисов М. Т., Бутов В. Н. Создание роботизированного комплекса для светолучевой пайки и сварки деталей кузовов автомобиля «Москвич» // Сб. докл. 6-й Междунар. конф. «АСМ-Холдинг». — М., 1999.*
12. *Алексеев Г. М. Светолазерные технологии и оборудование — новое направление в сварке и пайке деталей // ИТО-Новости. — 2002. — № 6. — С. 6.*

Поступила в редакцию 28.10.2004

### Англо-украинский и украинско-английский словарь сварочной терминологии

Выходит из печати двуязычный словарь терминов в области сварки и родственных технологий, подготовленный Институтом электросварки им. Е. О. Патона и Институтом украинского языка Национальной академии наук Украины.

СЛОВАРЬ состоит из двух самостоятельных разделов:

- «Англо-украинский словарь сварочной терминологии»;
- «Украинско-английский словарь сварочной терминологии».

Англо-украинский раздел словаря содержит около 8000, а украинско-английский — 5000 простых и составных английских (украинских) терминов, относящихся к сварке и родственным технологиям, а также их перевод, соответственно на украинский и английский языки.

Словарь предназначен для ученых и преподавателей, студентов и учащихся, инженерно-технических работников и специалистов сварочного производства, а также для специалистов других отраслей производства и строительства, которые работают с учебной, научно-технической и нормативной литературой и документацией.

Словарь издается в удобном формате и имеет твердый переплет.

Заявки на приобретение СЛОВАРЯ направлять по адресу:  
03150 г. Киев-150, ул. Антоновича (Горького), 62  
Издательский отдел ГВП «ЭТ»  
Тел./факс: (380-44) 287-65-02  
E-mail: welder@svitonline.com