



## ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОЙ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ (Обзор)

И.В. КРИВЦУН<sup>1,2</sup>, В.Ю. ХАСКИН<sup>2</sup>, В.Н. КОРЖИК<sup>1,2</sup>, ЛО ЦЗЫИ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Гуандонский Генеральный научно-исследовательский институт промышленных технологий (Гуанчжоуский научно-исследовательский институт цветных металлов), г. Гуанчжоу, КНР

<sup>2</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Совершенствование сварочных технологий является необходимым условием прогресса промышленного производства. Создание новых конструкций часто требует применения высокопроизводительных процессов сварки, обеспечивающих минимизацию остаточных деформаций. К сожалению, возможности традиционных дугowych технологий не всегда соответствуют таким требованиям. Лазерные технологии сварки также не всегда приемлемы в связи с высокой стоимостью оборудования и требованиями к подготовке свариваемых соединений. В последние годы все большее распространение получают гибридные лазерно-дуговые сварочные технологии, сочетающие преимущества дугowych и лазерных процессов. Поэтому в данной работе выполнен обзор современных тенденций развития гибридной лазер-МИГ сварки металлов и сплавов. Показано, что одновременно с продолжением научных исследований, к таким тенденциям относится промышленное внедрение (например, в различных отраслях транспортной, химической, энергетической и пищевой промышленности), ориентированное на частичную замену лазерной и дуговой сварочных технологий. Приведены примеры таких внедрений. Отмечена разработка новых технологий гибридной сварки, ориентированных на соединение различных по химическому составу и геометрии конструкций, а также создание нового промышленного оборудования для реализации этих технологий. В условиях начавшегося в последнее десятилетие нового этапа развития лазерной техники, связанного с широким промышленным внедрением волоконных и дисковых лазеров, вопрос о предпочтении лазерной или гибридной сварки стал предметом тщательного научно-технического и экономического анализа. Библиогр. 37, рис. 5.

*Ключевые слова:* гибридная лазер-МИГ сварка, сварочные головки, параметры процесса, выбор режимов, история развития, промышленное внедрение

Совершенствование сварочных технологий является необходимым условием прогресса промышленного производства. Создание новых конструкций часто требует применения высокопроизводительных процессов сварки, обеспечивающих минимизацию остаточных деформаций. К сожалению, возможности традиционных дугowych технологий не всегда соответствуют таким требованиям. Лазерные технологии сварки также не всегда приемлемы в связи с высокой стоимостью оборудования и требованиями к подготовке свариваемых соединений. В последние годы все большее распространение получают гибридные лазерно-дуговые сварочные технологии, сочетающие преимущества дугowych и лазерных процессов. Тенденциям их развития и посвящена данная работа.

Как показали в своих работах У. Стин и др. [1, 2], объединение лазерного излучения с электрической дугой позволяет разрабатывать новые сварочные технологии, имеющие значительные технологические преимущества по сравнению с лазерной сваркой (рис. 1) [3]. К этим преимуществам относятся, в первую очередь, глубокое проплавление, низкий уровень остаточных деформаций и снижение требований к стыковке свариваемых кромок.

За счет нагрева свариваемого металла электрической дугой повышается коэффициент поглощения лазерного излучения, что приводит к снижению потерь лазерной энергии и позволяет повысить скорость сварки. Этот же эффект про-

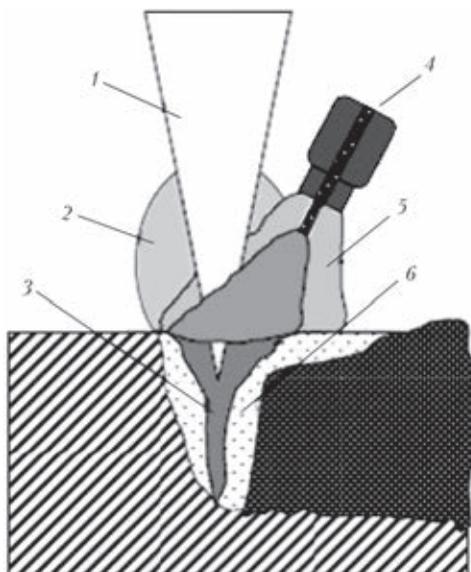


Рис. 1. Схема гибридной лазер-МИГ сварки [3]: 1 — лазерное излучение; 2 — лазерная плазма; 3 — парогазовый канал; 4 — дуга плавящегося электрода; 5 — защитный газ; 6 — сварочная ванна

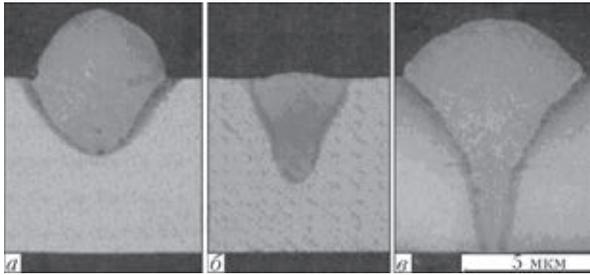


Рис. 2. Поперечные сечения проваров, выполненных в пластине среднеуглеродистой стали дугвым (а), лазерным (б) и гибридным (в) способами (при гибридной сварке расстояние между проволокой и сфокусированным пучком  $D_{LA} = 2$  мм, вылет проволоки 11 мм, наклон дуговой горелки  $60^\circ$ ) [4]. Для а — площадь поперечного сечения 20,31 мм<sup>2</sup>; б — 7,30; в — 30,08

является в увеличении площади поперечного сечения переплавленного при гибридной сварке металла по сравнению с суммой площадей поперечных сечений валиков, полученных отдельно дуговой и лазерной сваркой (рис. 2) [4]. В свою

очередь электрическая дуга сжимается до размеров факела паров свариваемого металла, образующегося под действием лазерного излучения, и дополняет эффект от воздействия лазерного излучения. Поэтому для гибридной лазер-МИГ сварки требуются лазеры меньшей мощности по сравнению с лазерной, что удешевляет процесс. Модификация термического цикла лазерной сварки, происходящая под влиянием дуги, улучшает структуру сварных швов [2, 5].

Горелка для современной гибридной сварки может представлять собой как простое объединение лазерной сварочной головки с дуговой горелкой (рис. 3) [4], так и сложное интегрированное приспособление (рис. 4) [4]. Такие горелки ориентированы на использование в руке антропоморфного робота. В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разработан ряд горелок, ориентированных на использование в одно- или многокоординатном манипуляторе типа плоттера (рис. 5). Преи-

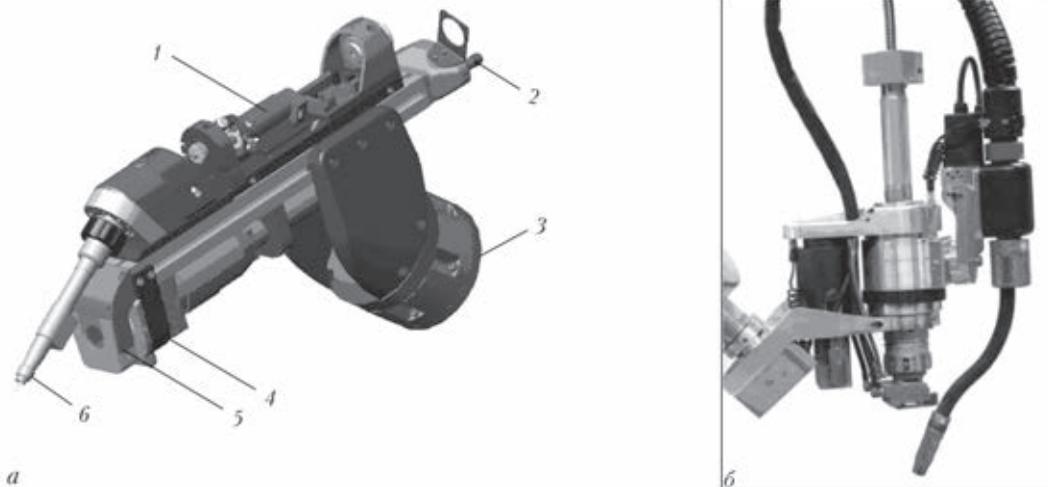


Рис. 3. Головки для гибридной лазерно-дуговой роботизированной сварки фирм «Fronius» (а) и «Cloos» (б) [4]: 1 — устройство подачи проволоки; 2 — забор воздуха; 3 — фиксация на руке робота; 4 — защитное стекло; 5 — кросс-джет; 6 — водоохлаждаемый мундштук

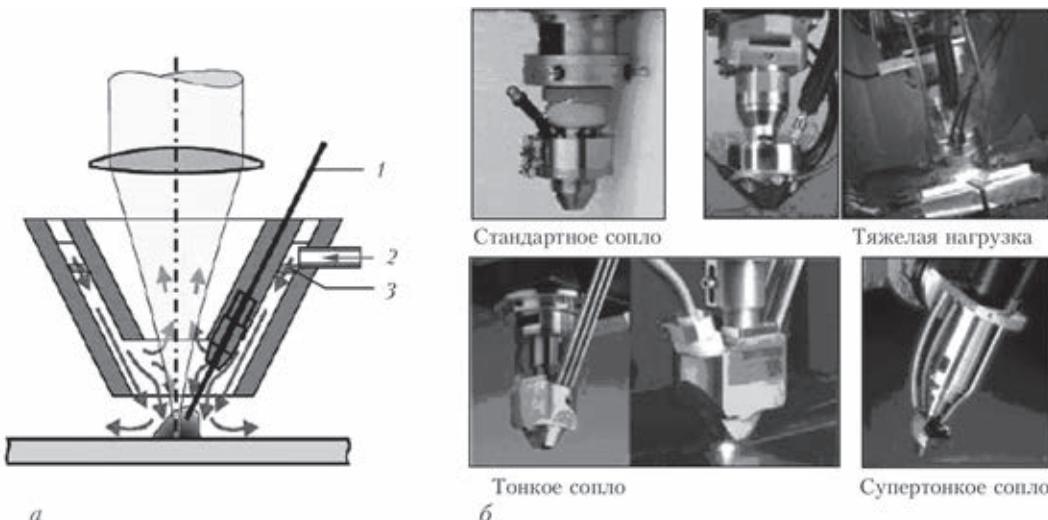


Рис. 4. Принципиальная схема (а) и внешний вид (б) головок для гибридной лазерно-дуговой сварки с интегрированным соплом [4]: 1 — электродная проволока; 2 — вспомогательный газ; 3 — диффузионная апертура

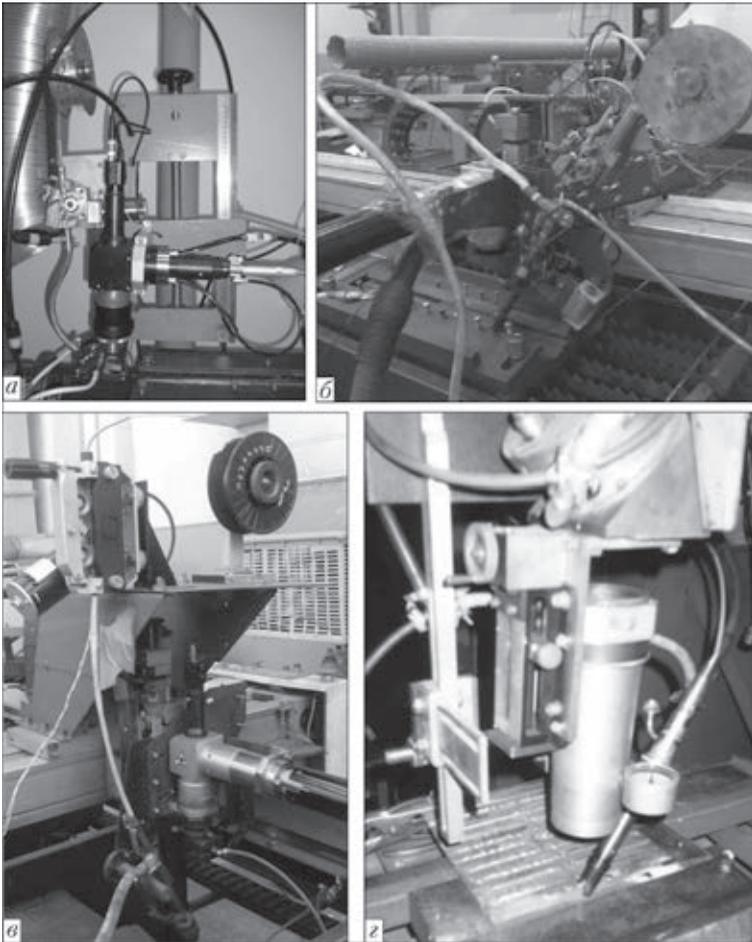


Рис. 5. Внешний вид головок для гибридной лазерно-дуговой сварки, осуществляемой при помощи одно- или трехкоординатного манипулятора, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона: а-в — для лазеров с длиной волны до 1,06 мкм; г — 10,6

мощством этих горелок является их интеграция с механизмом подачи присадочной проволоки и уменьшение подающего проволоку бoudена до 0,1...0,5 м, что значительно снижает риск замытия электродной проволоки. Кроме того, такие горелки имеют максимально упрощенную и надежную конструкцию, использующую простейшую стандартную лазерную фокусирующую систему. При этом для корректировки траектории перемещения головки в случаях диодного или Nd:YAG-лазеров имеется возможность использования как телевизионной камеры, так и красного лазерного излучения (рис. 5, а-в), а в случае CO<sub>2</sub>-лазера — только красного излучения (рис. 5, г).

Гибридная сварка минимизирует недостатки как лазерной, так и МИГ-сварки. Согласно работам [3, 4], основными преимуществами гибридной лазерно-дуговой сварки по сравнению с лазерной являются:

- сокращение капитальных затрат на оборудование на 30...40 % по сравнению с лазерной сваркой (из-за уменьшения потребляемой лазерной мощности);
- высокие скорости сварки;

- снижение точности подготовки кромок;
- управление составом шва путем выбора сварочной проволоки;
- снижение риска образования закалочных структур в металле шва и ЗТВ;
- повышение надежности процесса;
- повышение общего КПД процесса, снижение энергоемкости до 50 %.

Однако для достижения указанных преимуществ необходим правильный выбор ряда параметров. Рассмотрим их согласно рекомендациям работ [3, 4, 6, 7].

*Лазерная мощность.* Увеличение этого параметра, как правило, повышает глубину проплавления. При гибридной лазерно-дуговой сварке это явление усиливается из-за уменьшения отражательной способности металла, нагретого дугой.

*Скорость сварки.* Со снижением скорости сварки глубина проплавления увеличивается из-за повышения энергии, вкладываемой на единицу длины шва. Кроме того, стабильность подачи и плавления сварочной проволоки улучшается на более низких скоростях сварки.

*Относительное расположение сфокусированного лазерного излучения и дуги плавящегося электрода.* Расстояние между осью лазерного излучения и концом проволоки является одним из наиболее важных параметров оптимизации гибридной лазерно-дуговой сварки. Его обычно выбирают небольшим (до 2 мм). Кроме того, важными факторами формообразования сварных швов являются положение дуговой горелки впереди или сзади по ходу сварки, а также угол ее наклона.

*Положение фокуса.* Максимальная глубина провара при лазерно-дуговой сварке обычно получается при фокусировке лазерного пучка под поверхность свариваемых листов на глубину 2...4 мм.

*Угол наклона электрода.* Глубина провара возрастает с увеличением угла электрода к поверхности заготовки до 50°. Поток газа, выходящего из дуговой горелки, отклоняет парогазовый факел, образованный лазерным излучением, и уменьшает потери лазерной энергии (особенно при использовании CO<sub>2</sub>-лазеров). Поэтому угол наклона электрода к поверхности заготовки часто составляет порядка 40...50°.

*Состав защитного газа.* Как правило, применяют инертный газ (гелий, аргон или их смеси). При использовании CO<sub>2</sub>-лазеров требуется защитный газ с более высоким потенциалом ионизации для пре-

пятствования образованию плазмы, способной отклонять или поглощать лазерное излучение. Поэтому для лазерной сварки гелий предпочтительнее аргона. Однако легкость гелия является недостатком, поэтому его часто используют в смесях с более тяжелым аргоном. Кроме того, для увеличения глубины проплавления добавляют химически активные газы, такие как кислород и двуокись углерода.

*Модуляция мощности дуговой составляющей.* Обычно для питания сварочной дуги используется постоянный ток. Также часто используют импульсный режим для уменьшения разбрызгивания при сохранении глубокого проплавления. Повышение напряжения на дуге способствует расширению шва, что снижает коэффициент формы шва (отношение глубины провара к его ширине) для одной и той же мощности лазера. Поэтому напряжение на дуге (и скорость подачи проволоки) повышают при необходимости сварки неплотно прилегающих кромок. Сварочный ток, как правило, прямо пропорционален диаметру сварочной проволоки. Увеличение сварочного тока способствует повышению глубины провара и коэффициента формы шва.

*Стыковка свариваемых кромок.* Для лазерной сварки допустим зазор между кромками до 0,2 мм. Большие зазоры приводят к таким дефектам, как провисание шва или отсутствие сплавления. Гибридная лазерно-дуговая сварка позволяет соединять детали с зазорами до 1 мм и больше (при высоких скоростях подачи проволоки).

*Подготовка кромок.* Для обычной лазерной сварки необходимы кромки с параллельными прямыми краями и узким зазором. Для дуговой сварки применяют разделку кромок (чаще всего V-образную). В случае гибридной лазерно-дуговой сварки требования к подготовке кромок ниже, чем для лазерной сварки. Разделку кромок, как правило, применяют для толщины материала, превышающей 8...10 мм.

Для более глубокого понимания современных тенденций развития гибридной лазер-МИГ сварки рассмотрим основные этапы развития этого процесса согласно исследованию [8], выполненному в ИЭС им. Е.О. Патона.

*1970-е годы.* В конце 1970-х годов в Имперском колледже в Лондоне группа под руководством У. Стинга предприняла первые попытки по объединению лазерного излучения и электрической дуги (ТИГ) для сварки металлов. Этот новый гибридный лазерно-дуговой способ сварки имел ряд преимуществ по сравнению с лазерным и дуговыми способами. Он обеспечивал повышенную стабильность процесса, значительно большую скорость сварки, более глубокое проплавление и малую ширину шва. Тем не менее, это нововведение далеко не сразу нашло промышленное применение [5, 6]. Примерно в 1979–1980 гг. в ИЭС им.

Е.О. Патона были проведены первые эксперименты по лазерно-дуговой сварке.

*1980-е годы.* Появление надежных и сравнительно недорогих лазеров высокой мощности позволили внедрить лазерную сварку в промышленность [9]. Было установлено, что ее недостатки могут быть сведены к минимуму путем сочетания лазерной сварки с обычной дуговой. Это позволило повысить эффективность процесса, снизить требования к стыковке свариваемых кромок, устранить ряд проблем металлургического характера и снизить отражательную способность свариваемого материала. Таким образом, было устранено большинство препятствий для внедрения лазеров в сварочное производство [5, 6].

*1990-е годы.* Наблюдаются тенденции промышленной реализации лазерной и гибридной сварки, заложенные в 1980-е годы. При этом мощность лазерного оборудования повышается. Развитие гибридной лазерно-дуговой сварки выявило такие недостатки лазерной сварки, как высокая стоимость, сложность подготовки кромок и крепления свариваемых деталей, а также ряд металлургических проблем. Исследования достоинств и недостатков гибридной лазерно-дуговой сварки ведутся во всех развитых странах мира (США, Европе и Японии) [10, 11]. Развитию этих технологий способствовала востребованность промышленности в высококачественных сварных швах, полученных на высокой скорости. Гибридной лазерно-дуговой сваркой заинтересовались такие отрасли, как автомобильная промышленность, судостроение и трубопроводный транспорт.

*2000-е годы.* В настоящее время гибридная лазерно-дуговая сварочная техника доказала свою пригодность во многих отраслях промышленности. Активно разрабатываются комплексные гибридные сварочные головки (например, Exial, Fronius, Prima Industry, Permanaova Lasersystem) [6, 12], моделируются и проверяются различные конкретные промышленные ситуации. Например, изучается вопрос соединения материалов различного типа, конфигурации и толщины гибридной лазерно-дуговой сваркой. Продолжаются также исследования особенностей данного вида сварки, например, изучаются резонансные явления, происходящие при сложении частоты переноса капель электродного металла с собственными частотами сварочной ванны [13] или влияние на характер формирования швов и их механические свойства импульсной модуляции лазерной и дуговой составляющих [14].

Гибридная лазер-МИГ сварка сочетает преимущества дугового и лазерного процессов, что приводит к повышению стабильности сварки, улучшению качества швов и снижению остаточных деформаций. Промышленные преимущества вклю-



чают увеличение производительности, упрощение процедуры настройки и уменьшение себестоимости погонного метра шва. Тем не менее, эта технология находится еще только в начальной стадии внедрения в современных отраслях промышленности. Причинами медленных темпов промышленного внедрения являются высокая стоимость инвестиций и сложность процесса, связанная с большим количеством его параметров. Несмотря на это, гибридная сварка уже получила определенное распространение в таких отраслях промышленности, как автомобилестроение, судостроение, трубопроводный транспорт, аэрокосмическая и авиационная промышленность, выработка энергии, внедорожные и тяжелые транспортные средства.

*Автомобилестроение.* Такие хорошо известные автомобильные компании, как «Volkswagen» и «Audi» убеждены в преимуществе гибридной лазер-МИГ сварки [12, 15]. Еще одним примером применения этой сварки является фирма «Volvo» [16]. В автомобиле любого типа применяется множество швов, различных по своей конфигурации и по применяемым материалам. Во многих случаях совмещаются такие способы сварки, как МИГ, лазерная и гибридная лазер-МИГ сварка — в зависимости от конфигурации сварного шва и требований к нему. Сварку МИГ применяют при наличии значительных зазоров между свариваемыми кромками и минимальной их подготовки. Лазерная сварка обеспечивает низкие остаточные деформации, глубокое проплавление и высокую скорость при возможности точной подгонки свариваемых деталей. И, наконец, гибридная сварка обеспечивает высокие скорости сварки в сочетании со сравнительно широкими допусками. Для этого используются лазеры от 2 до 4 кВт при скоростях сварки приблизительно 4 м/мин [17]. В ИЭС им. Е.О. Патона проводились работы по созданию технологий лазерно-дуговой сварки автомобильной оцинкованной стали и тонких алюминиевых сплавов для ОАО «АвтоВАЗ» (РФ, г. Тольятти). Также была разработана технология восстановительной наплавки поршней двигателей внутреннего сгорания [18]. Эта технология была ориентирована как на заплывание разбитых каналов поршней автомобильного транспорта (от легковых автомобилей до тяжелых тракторов), так и на восстановление поршней железнодорожных дизельных двигателей.

*Судостроение.* Гибридный процесс сварки представляет большой интерес для судостроительной промышленности во всем мире [19, 20]. Использование этого процесса активно распространяется на европейских и азиатских верфях, в то время как на верфях США он внедряется довольно медленно. Гибридная сварка дает

значительную экономию времени и средств, заменяя собой многопроходную сварку за счет реализации режима глубокого проплавления. При этом используются мощные Nd:YAG-лазеры до 6 кВт и CO<sub>2</sub>-лазеры до 25 кВт. Примерами верфей, использующих эту технологию, являются MEYER в Германии, KVAERNER в Финляндии и FINCANTIERI в Италии. В ИЭС им. Е.О. Патона проводили работы по созданию технологии лазерно-дуговой сварки судовых сотовых панелей из углеродистых сталей толщиной 3...7 мм для ЦНИИ КМ «Прометей» (РФ, г. Санкт-Петербург).

*Трубопроводный транспорт.* Проводятся исследования гибридной лазер-МАГ сварки, направленные на улучшение качества сварки и снижение производственных затрат при изготовлении труб большого диаметра и монтаже магистральных трубопроводов. Для реализации в промышленных условиях разработан процесс лазерной сварки корневого шва с последующей заваркой лазер-МАГ способом узкой разделки кромок в один, два или три прохода [21]. Трубопроводы из нержавеющей стали свариваются без пор, с сохранением аустенитной структуры и без значительного увеличения твердости. Скорость сварки этих трубопроводов с толщиной стенки от 5 до 8 мм составляет до 1,2 м/мин [22]. В ИЭС им. Е.О. Патона был разработан ряд технологических приемов сварки труб большого диаметра и их неповоротных стыков [23, 24].

*Аэрокосмическая и авиационная промышленность.* Лидирующее положение в авиационной промышленности занимает фирма «Airbus», в частности, благодаря инновационным разработкам. Уже в течение нескольких лет эта фирма использует процесс лазерной сварки для производства секций фюзеляжа самолетов, в частности, моделей Airbus A318 и Airbus A380 [25, 26]. В последнее время Airbus проявляет интерес к технологии гибридной сварки. Эта технология также представляет большой интерес для решения аэрокосмических и военных задач при работе с титановыми сплавами [27]. В ИЭС им. Е.О. Патона был проведен ряд работ по сварке титановых сплавов, алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей для задач украинской авиакосмической промышленности [28]. В этих работах исследовали возможности использования как лазерной, так и гибридной сварки.

*Выработка энергии.* В оборудовании, применяемом для производства электроэнергии, часто возникает задача сварки пластин толщиной более 15 мм. В частности, была исследована и промышленно реализована технология лазерной сварки таких материалов [29], но гибридная сварка постепенно привлекает все больше внимания для

решения данной задачи, поскольку она способна преодолеть недостатки лазерной сварки [30]. При этом как лазерная, так и гибридная сварка обычно применяются в многопроходном режиме [31]. Помимо толстых пластин в энергетическом машиностроении используются тонкие нержавеющие стали, например, для изготовления сильфонных компенсаторных узлов. В ИЭС им. Е.О. Патона для ТОВ «Научно-исследовательский информационный центр «Арматом» (Украина, г. Киев) были разработаны технология и оборудование сварки таких узлов [32]. При этом предпочтение было отдано лазерной, а не гибридной, сварке.

*Внедорожные и тяжелые транспортные средства.* Лазерная сварка является уже хорошо отработанной технологией в тяжелой автомобильной промышленности для соединения деталей из конструкционных сталей, а ее эффективность была уже не раз доказана [33]. Тем не менее, гибридная сварка доказала свое превосходство по сравнению с лазерной (например, сокращение времени подготовки к сварке и финишной обработки) и поэтому постепенно стала все больше применяться в этой отрасли [34]. Некоторые технологические решения для этой отрасли промышленности разрабатывались также и в ИЭС им. Е.О. Патона [35].

Рассмотрено лишь несколько примеров промышленного применения гибридной сварки, которое непрерывно расширяется в настоящее время. Среди других возможных применений — бытовая техника, железнодорожный транспорт, химическая промышленность (в частности, сварка емкостей и труб из нержавеющей стали) и др. [36]. Особое место занимает применение лазерно-дуговой сварки для решения задач изготовления алюминиевых конструкций [37].

## Выводы

1. Основной современной тенденцией развития гибридной лазер-МИГ/МАГ сварки можно считать промышленное внедрение (например, в различных отраслях транспортной, химической, энергетической и пищевой промышленности), ориентированные на частичную замену лазерной и дуговой сварочных технологий.

2. К общим тенденциям развития гибридной сварки относятся: разработка новых технологий, ориентированных на сварку различных по химическому составу и геометрии конструкций, а также создание нового оборудования, ориентированного на промышленное внедрение разработанных технологий.

3. В связи с начавшимся в последнее десятилетие новым этапом развития лазерной техники, связанным с широким промышленным внедрением волоконных и дисковых лазеров, вопрос о предпочтении лазерной или гибридной сварки

стал предметом тщательных научно-технических и экономических исследований.

1. Steen W.M., Eboo M. Arc augmented laser welding // Metal Construction. – 1979. – 11, № 7. – P. 332–335.
2. Steen W.M., William M. Laser material processing, 3rd ed. – Springer-Verlag London Ltd, London, 2003. – 450 p.
3. Wouters M. Hybrid Laser-MIG welding: An investigation of geometrical considerations. – Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, Nov. 2005. – 60 p.
4. Kah P. Usability of laser-arc hybrid welding processes in industrial applications. – Finland, Lappeenranta, Lappeenranta University of Technology, 2011. – 112 p.
5. Seyffarth P., Krivtsun I.V. Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment // Welding and Allied Processes. – London: Taylor and Francis Books. – 2002. – Vol. 1. – 200 p.
6. Bagger C., Olsen F.O. Review of laser hybrid welding // J. of Laser Applications. – 2005. – 17(1). – P. 2–14.
7. Optimisation of parameters in hybrid welding of aluminium alloy / T. Jokinen, P. Jernstrom, M. Karhu et al. // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 4831. – P. 307–312.
8. Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю. Тенденции развития лазерно-дуговой сварки // Автомат. сварка. – 2002. – № 6. – С. 28–33.
9. John F. Ready. Industrial Applications of Lasers. – London: Academic Press, 1997 – 599 p.
10. Dilthey U., Wieschemann A. Prospects by combining and coupling laser beams and arc welding processes // Welding in the World. – 2000. – 44, № 3. – P. 37–46.
11. Ishide T., Tsubota S., Watanabe M., Ueshiro K. Latest MIG, TIG, arc-YAG laser hybrid welding systems // J. of the Japan Weld. Soc. – 2003. – 72 (1). – P. 22–26.
12. Staufner H. Laser hybrid welding and laser brazing: State of the art in technology and practice by the examples of the Audi A8 and VW-Phaeton // Proc. of 3rd Int. WLT-Cond. on Lasers in Manufacturing, Munchen, 2005. – P. 203–208.
13. Гибридная сварка излучением CO<sub>2</sub>-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В.Д. Шелягин, В.Ю. Хаскин, В.П. Гарашук и др. // Автомат. сварка. – 2002. – № 10. – С. 38–41.
14. Жерносеков А.М., Хаскин В.Ю., Набок Т.Н. Импульсная лазерно-дуговая сварка углеродистых сталей // Восточно-европейский журн. передовых технологий. – 2014. – 5/1 (71). – С. 12–15.
15. Graf T., Staufner H. Laser-hybrid-welding drives VW improvements // Welding J. – 2003. – № 1. – P. 42–48.
16. Ляхму К.Э. Один+один – больше чем два!!! // Svetsaren. – 2003. – № 2. – P. 22–24.
17. Staufner H. Laser hybrid welding in the automotive industry // Welding J. – 2007. – № 10. – P. 36–40.
18. Хаскин В.Ю. Использование лазерно-дуговой наплавки для заглавления полостей в алюминиевых сплавах // Автомат. сварка. – 2009. – № 2. – С. 41–45.
19. Merchant V. Shipshape laser applications // Industrial Laser Solutions, Aug., 2003. Электронный ресурс. Режим доступа: www.industrial-lasers.com.
20. Denney P. Hybrid laser welding for fabrication of ship structural components // Welding J. – 2002. – 81, Sept. – P. 58.
21. Staufner H., Rührmößl M. Für große Blechdicken und hohe Schweißgeschwindigkeiten: Laserhybrid- + Tandemschweißen // der Praktiker. – 2006. – № 10. – S. 300–302.
22. Thomy C., Schilf M., Seefeld T., Sepold G., Vollertsen F., Hoffmann R. CO<sub>2</sub>-Laser-MSG-Hybrid-schweißen in der Rohrfertigung // wt Werkstattstechnik on-line. 2003. – 93 (6). – S. 462–466.
23. Многопроходная сварка сталей больших толщин с использованием лазерного излучения / В.Д. Шелягин, В.Ю. Хаскин, Л.Г. Шитова и др. // Автомат. сварка. – 2005. – № 10. – С. 48–52.
24. Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю. Многопроходная сварка трубных сталей с использованием лазерного излучения // Сварщик. – 2009. – №5 (69). – С. 36–38.



25. N.N. Laserstrahlschweißen macht Flugzeuge leichter // *Fraunhofer Magazin* 4. – 2004. – S. 36–37.
26. *Mendez P.F., Eagar T.W.* New Trends in Welding in the Aeronautic Industry // 2nd Conf. of New Manufacturing Trends, Bilbao, Spain, Nov. 19–20, 2002. – P. 1–10.
27. *Shinn B.W., Farson D.F., Denney P.E.* Laser stabilization of arc cathode spots in titanium welding // *Sci. and Techn. of Welding & Joining*. – 2005. – 10, № 4. – P. 475–481.
28. Разработка оборудования и технологий автоматизированной лазерной сварки трубных компенсирующих элементов для авиакосмической промышленности / В.Д. Шелягин, В.И. Луценко, В.Ю. Хаскин и др. // *Наука и инновации*. – 2012. – 8, № 6. – С. 53–59.
29. *Jokinen T., Kujanpaa V.* High power Nd:YAG laser welding in manufacturing of vacuum vessel of fusion reactor // *Fusion Engineering and Design*. – 2003. – 69, № (1-4). – P. 349–353.
30. *Jokinen T., Karhu M., Kujanpaa V.* Welding of thick austenitic stainless steel using Nd:yttrium-aluminum-garnet laser with filler wire and hybrid process // *J. of Laser Applications*. – Vol. 15. – 2003. – P. 220–24.
31. *Jokinen T., Karhu M., Kujanpaa V.* Narrow gap hybrid welding of thick stainless still // 22nd Int. Congress on Application of Lasers and Electro-Optics (ICALEO 2003), Jacksonville, FL, USA, 13-16 Oct. 2003, CD-ROM, Laser Institute of America (LIA), 2003. – P. A66–A75.
32. *Лукашенко А.Г., Мельниченко Т.В., Лукашенко Д.А.* Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением // *Автомат. сварка*. – № 4. – 2012. – С. 19–23.
33. *High power laser welding of constructions steels / K. Nilsson, H. Engstrom, J. Flingfeldt, T. Nilsson et. al.* // *Svetsen*. – 2000. – 59, № 1.
34. *Laser-assisted gas metal arc welding of 25-mm-thick HY-80 plate / C.V. Hyatt, K.H. Magee, J.F. Porter et al.* // *Welding J.* – 80, № 7, 2001. – P. 163–172.
35. *Laser-Arc and Laser-Plasma Welding and Coating Technologies / V.D. Shelyagin, I.V. Kritsun, Yu.S. Borisov et. al.* // *The Paton Welding J.* – № 8. – 2005. – P. 44–49.
36. *Kah P., Salminen A., Martikainen J.* Laser-arc hybrid welding processes (review) // *Ibid.* – 2010. – № 6. – P. 32–40.
37. *Хаскин В.Ю.* Развитие лазерной сварки алюминиевых сплавов в ИЭС им. Е.О. Патона (Обзор) // *Автомат. сварка*. – № 5. – 2013. – С. 52–57.

Поступила в редакцию 28.01.2015

### CASPSP–ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

CASPSP представляет собой двухмодульный пакет прикладных программ для компьютерного моделирования турбулентных плазменных струй, используемых при плазменном нанесении покрытий, а также для моделирования поведения напыляемых частиц в таких струях. Первый модуль предназначен для моделирования турбулентных плазменных струй, создаваемых плазмотронами с гладким каналом и истекающих в среду атмосферного давления (APS). В основе соответствующей компьютерной программы лежит математическая модель газодинамики и теплообмена в термической дуговой плазме, описываемой системой МГД-уравнений в приближении турбулентного пограничного слоя. Этот модуль позволяет рассчитывать и отображать пространственные распределения температуры и скорости плазменной струи с учетом электродуговых процессов, протекающих в плазмотроне, в зависимости от размеров его сопла-анода, тока дуги, типа и расхода плазмообразующего газа.

Второй модуль предназначен для моделирования поведения напыляемых частиц в плазменной струе с предварительно рассчитанными распределениями температуры и скорости плазмы (приближение слабозапыленной струи). В основе соответствующей компьютерной программы лежит математическая модель нагрева и ускорения напыляемой частицы, которая описывается нелинейным уравнением теплопроводности и уравнением движения сферической частицы в плазменной струе. Этот модуль позволяет рассчитывать и отображать траекторию движения, скорость и температурное поле напыляемой частицы в зависимости от материала и начального диаметра частицы, а также условий ее ввода в плазменную струю.

#### Используемые базы данных:

- плазмообразующий газ: аргон, азот;
- материал частиц: Al, Cu, Mo, Ni, Ti, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>C<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrC<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, TiC, WC;
- возможно изменение (расширение) баз данных.

Данное программное обеспечение может быть полезно для специалистов и студентов, занимающихся вопросами плазменного напыления.

CASPSP позволяет легко и быстро производить количественные оценки распределений температуры и скорости в объеме плазменной струи; траектории, скорости движения и теплового состояния напыляемой частицы в зависимости от параметров процесса напыления. Снижает расходы на проведение экспериментов. Работает быстрее современных пакетов МКР. Производительность: 1 расчет за 10 мин CPU.

#### Требования к компьютеру:

IBM PC или совместимый: AMD или Pentium (более высокая тактовая частота предпочтительна) с операционной системой Windows 9x, ME, Windows NT/2000/XP. Оперативная память: минимум 16 MB (предпочтительно 32 MB). Свободное пространство HDD: минимум 4 MB. FDD: 1.44 MB, 3.5". Монитор: SVGA, 65536 цветов, 1024 на 768 точек.

E-mail: office@paton.kiev.ua