

СВЕТОЛУЧЕВАЯ СВАРКА И ПАЙКА (Обзор)

А. М. ЖАДКЕВИЧ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведен ретроспективный анализ развития метода светолучевого нагрева. Подчеркивается ведущая роль российских ученых в становлении этого направления. Отмечается, что метод светолучевого нагрева пригоден для сварки и пайки разнообразных материалов, а также термической обработки изделий. Изложены преимущества сварки с использованием светового луча по сравнению с дуговой сваркой.

Ключевые слова: световой луч, светолучевой нагрев, сварка, пайка, термообработка

Светолучевые технологии находят все большее применение в промышленности, в частности, для плавки и соединения металлов, а в последние годы — для получения материалов с наноструктурой. В данной работе дано ретроспективное освещение разработки технологий и применения светового луча в процессах сварки и пайки [1]. В становлении этого направления ведущая роль принадлежит Московскому авиационному технологическому институту (МАТИ) им. К. Э. Циолковского. Еще в 1967–1968 гг. Г. Д. Никифоровым и М. И. Опариним были начаты исследования по оценке возможности и эффективности применения в технологических целях (сварка, пайка, термическая обработка) сфокусированной энергии светового луча некогерентных источников света [2, 3]. Возможность разработки источников энергии (светолучевых модулей) и оптимизацию их технологического применения исследовали с помощью электронно-лучевой и лазерной сварки. В последующие годы указанными авторами был опубликован ряд работ [4–7], посвященных оптимизации параметров процесса и технологического применения светолучевого нагрева.

В 1968 г. под руководством М. А. Опарина была спроектирована, а в РПО «Электромеханика» (Ржев) изготовлена первая установка для сварки и пайки лучистой энергией УСПЛЭ-1-МАТИ. Установка состояла из дуговой ксеноновой лампы мощностью 3... 10 кВт (производитель — Московский электроламповый завод), которая использовалась в качестве источника света эллипсоидного стеклянного алюминированного отражателя, контролражателя и двухлинзового кварцевого объектива для дополнительной фокусировки светового излучения [2, 4, 5].

Студенческое конструкторско-технологическое бюро, организованное на кафедре под руководством М. И. Опарина, занималось вопросами проектирования технологической оснастки, проведением исследований энергетических параметров светового луча и экспериментов по сварке и пайке различных конструкционных материалов. Особый упор был сделан на разработку различных вариантов технологических установок [4, 6, 8].

В 1970 г. сотрудником МАТИ С. А. Федоровым при участии РПО «Электромеханика» была разработана экспериментальная установка УСПЛЭ-

7-МАТИ с семью оптическими фокусирующими системами и дуговыми ксеноновыми лампами мощностью 0,5 и 1 кВт для создания сложных схем нагрева и моделирования различных тепловых процессов, а в 1976 г. — малогабаритная установка «Фотон-1» для пайки электромонтажных соединений.

Проведенные исследования показали, что световой луч является перспективным концентрированным источником тепла и имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными: возможность нагрева материалов независимо от их электрических и магнитных свойств; бесконтактный способ подвода энергии к изделию непосредственно или через оптически прозрачные среды и оболочки (что позволяет осуществлять нагрев в контролируемой газовой среде и вакууме); возможность достижения сравнительно простыми средствами достаточно высокой плотности энергии — $1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$ Вт/см² (у электрической дуги и лазера эти показатели достигают соответственно $1 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^8$ Вт/см²) и пятен нагрева требуемой формы и размеров; высокую управляемость ввода энергии в изделие; дешевизну оборудования по сравнению с лазерным; незначительное механическое воздействие на нагреваемый объект; возможность простыми средствами механизировать и автоматизировать технологический процесс. Спектр излучения светового луча (0,2...2,4 мкм) находится в таком же диапазоне, что и рубинового ($\lambda = 0,69$ мкм) и неодимового ($\lambda = 1,06$ мкм) лазеров. Данное излучение эффективнее для нагрева металлов, чем инфракрасное, так как коротковолновая часть спектра лучше поглощается металлами. Световой луч сочетает локальность лазерного нагрева с возможностью проведения групповой пайки, как при инфракрасном нагреве [4, 9].

Рабочие параметры светового источника (эффективная мощность, КПД, погонная энергия, температура нагрева) зависят от оптических и теплофизических свойств нагреваемого материала, например, коэффициента поглощения и конфигурации изделий [3], причем коэффициент поглощения материалов может изменяться с повышением температуры (например, при нагреве меди изменяется, а алюминия — нет) [10], оказывая в итоге существенное влияние на тепловые и энергетические характеристики. Поэтому для управления процессом нагрева световым лучом необходимо ис-



пользовать в совокупности все факторы, обеспечивающие требуемый характер распределения температуры на изделии.

Накопленные результаты позволили перейти в 1970–1980 гг. от разработок лабораторных вариантов установок к созданию образцов промышленного оборудования для решения конкретных технологических задач. При активном участии сотрудников МАТИ разработана серия производственных технологических установок (УПСЛ-1, УСС-1, «Свет» и др.) и начата работа над специализированными короткофокусными стеклянными алюминированными отражателями и дуговыми ксеноновыми лампами с малым межэлектродным промежутком, позволившими повысить эффективность использования фокусирующих оптических систем. Разработаны методики и средства юстировки оптических систем, аппаратура для исследования и контроля энергетических параметров режима, приборы для определения поглощательной способности материалов, различная технологическая оснастка, средства защиты и наблюдения за объектом обработки, проработаны технологические особенности процессов сварки и пайки, нормативно-технические материалы, устанавливающие правила оформления технологической документации. Кафедра сварки МАТИ стала ведущей в разработке светолучевых технологий. Результаты исследований и разработок нашли отражение в кандидатских диссертациях М. И. Опарина (1971 г.) и С. А. Федорова (1976 г.) и обобщены в учебном пособии [4].

Работы МАТИ в области светолучевой технологии в последующем получили дальнейшее развитие. Появились публикации по пайке высокотемпературными паяльниками с кварцевыми галогенными лампами накаливания, пайке элементов радиоэлектронной аппаратуры на механизированных установках, сварке алюминиевых сплавов лучистой энергией в вакууме под флюсом и др.

В начале 1980-х годов развитие светолучевого оборудования пошло по пути повышения выходных энергетических параметров светового луча. Использование специализированных металлических отражателей, изготавливаемых на токарных автоматах с ЧПУ, и переход на импульсный режим питания ламп позволили увеличить плотность лучистого потока до 12 кВт/см^2 .

Разработаны специальные фокусирующие комбинированные сфероэллипсоидные оптические системы для пайки и термической обработки, позволяющие трансформировать лучистый поток из нормально распределенного в кольцевой и даже расщепленный на два и более лучей.

Созданы компьютерные программы расчета геометрических параметров отражателей под конкретные биологические задачи, что позволило реализовать на практике принцип модульности при разработке светолучевого оборудования. Модули лучистого нагрева с ксеноновыми лампами мощностью $0,12 \dots 10 \text{ кВт}$ использовали в различных технологических установках. Проектные работы завершились изготовлением в 1991 г. совместно с РПО «Электромеханика» серийного варианта

многоцелевой установки УСТСЛ-1 с программным управлением.

В кандидатских диссертациях В. С. Мамаева (1985 г.), Н. С. Пронина, В. А. Фролова (1990 г.), Н. А. Коробко (1992 г.) были собраны и систематизированы научные результаты, уточнены области эффективного использования светового луча и классифицированы технологические процессы светолучевой тепловой обработки материалов по трем группам [3, 11, 12].

К первой группе относятся процессы сварки металлических листовых корпусных и оболочковых конструкций толщиной $0,1 \dots 2,0 \text{ мм}$ из углеродистых и легированных сталей, титановых, никелевых и алюминиевых сплавов и герметизации корпусов электровакуумных приборов в различных контролируемых газовых средах, сварки стеклокерамики и пластмасс. Ко второй группе причисляют процессы низкотемпературной пайки микроэлементов на печатные платы, штепсельных разъемов, монтажных проводов с наконечниками в радиоэлектронике и процессы высокотемпературной пайки узлов волноводных трактов, электрических контактов силовой электроаппаратуры, обмоток статоров электрических машин. К третьей группе относятся процессы локальной термической обработки сварных соединений, термоправки и термоупрочнения изделий.

Технологические аспекты светолучевой сварки и пайки различных материалов нашли отражение в многочисленных публикациях [13–36]. Они позволяют заключить, что сфокусированным световым лучом можно сваривать тонколистовые конструкции с толщиной стенки $0,1 \dots 2,5 \text{ мм}$ из низкоуглеродистых и высоколегированных сталей, алюминиевых, никелевых и титановых сплавов [14, 16, 21, 22], термопластмасс и стеклокерамики, заваривать дефекты и герметизировать корпусные детали. Такой перечень задач можно решать, например, с помощью комплекта светолучевого оборудования в составе роботизированного комплекса (рис. 1). Так, при сварке титановых сплавов ВТ5-1, ОТ4-2 и ВТ20 толщиной $1,5 \dots 2,5 \text{ мм}$ мощность луча составляла $1,1 \dots 1,2 \text{ кВт}$ на 1 мм толщины материала при скорости сварки $9 \dots 10 \text{ м/ч}$. Установлено, что даже при местной защите зоны сварки световой луч позволяет получить соединения с более высокой прочностью и стойкостью к циклическим нагрузкам и уменьшенной пористостью металла шва по сравнению с дуговой сваркой. При сварке низкоуглеродистых сталей дополнительную защиту зоны соединения можно вообще не применять.

Широкие пределы регулирования энергетических параметров (плотность лучевого потока в фокальном пятне может изменяться от 0 до 2200 Вт/см^2), а также форма и размеры пятна нагрева дают возможность применять нагрев световым лучом при пайке [18, 20, 27, 35]. Процесс такой пайки характеризуется следующими особенностями: локальностью нагрева мест соединений под пайку с большим градиентом температуры; возможностью применения практически любых припоев, начиная от легкоплавких оловянно-свинцовых и кончая ту-



Рис. 1. Комплект светолучевого оборудования для сварочного роботизированного комплекса

гоплавкими на основе никеля и титана [25, 27, 30, 32–34]; уменьшением вероятности образования хрупких интерметаллидных прослоек в связи с кратковременностью нагрева. Благодаря идеальной чистоте процесса нагрева при пайке в контролируемых газовых средах и вакууме обеспечивается высокое качество соединений.

Светолучевое оборудование и технологии МАТИ были внедрены на различных предприятиях: заводе «Радиоприбор» (Владивосток), ПППО (Пермь), КЭМЗ (Ковылкино), НИИ «Волна», НИТИ (Саратов), КЭМПО им. Лепсе (Вятка), ПО «Теплообменник» и ГАЗ (Н. Новгород), РПКБ (Раменское, Моск. обл.), НПО «Зенит» (Зеленоград, Моск. обл.), ИОВНИИЭМ (Истра, Моск. обл.), МАЗ «Дзержинец», ВНИИРТ, «Прожектор» и др.

В 1980-е годы в МАТИ параллельно с внедрением оборудования и технологии на кафедре были успешно защищены кандидатские диссертации В. С. Кудрявцевым (1984 г.), В. Ф. Савичевым (1988 г.), В. Б. Редчицем (1989 г.) и др. Предложенные сотрудниками кафедры технические решения и технологические разработки были защищены более чем 60 авторскими свидетельствами, а результаты исследований опубликованы в более чем 120 научных трудах [19–24, 27–32]. Обобщение работ по сварке световым лучом нашло отражение в докторской диссертации В. А. Фролова (1998 г.).

За пределами бывшего СССР (Японии, ФРГ, США и др.) светолучевой нагрев начал развиваться позднее и для решения конкретных технологических задач. В научном плане исследования за рубежом не принесли новых результатов, хотя и были проведены на современном, более высоком уровне. М. Такаджи и Т. Ямад и (Япония) создали светолучевую установку для низкотемпературной пайки, используемую в электронике, которая базируется на излучении ксеноновой лампы с гиб-

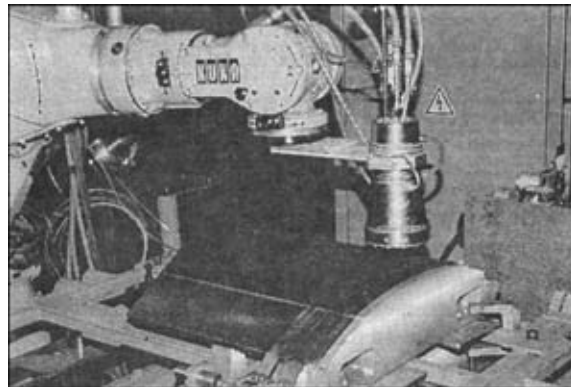


Рис. 2. Светолучевое оборудование для сварки и пайки

ким оптическим кабелем, что, естественно, значительно расширяет технологические возможности процесса. Она успешно конкурирует на рынке с установками с лазерным нагревом аналогичного назначения [37]. Чешской фирмой «SVAR spol s.r.o.» при участии ряда российских организаций (АО НИИТавтопром, НПФ МГМ и др.) был создан универсальный комплекс светолучевого оборудования для сварки и пайки (рис. 2), состоящий из светолучевого излучателя, источника питания, сервисного блока, блока автономного водяного охлаждения. Этот комплекс может быть применен, например в автомобильной промышленности.

Выводы

1. Сотрудниками кафедры сварки МАТИ установлены преимущества нагрева световым лучом по сравнению с другими распространенными видами нагрева: возможность термообработки материалов независимо от их электрических и магнитных свойств; вероятность достижения сравнительно простыми средствами высоких плотностей энергии ($1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$ Вт/см²); бесконтактный способ подвода энергии к изделию непосредственно и через оптически прозрачные оболочки в любой контролируемой газовой среде и вакууме; незначительное механическое воздействие на нагреваемый объект; высокая регулируемость и управляемость вводом тепла. Такое сочетание свойств оптического источника тепла открывает широкие перспективы его использования для сварки и пайки.

2. Сфокусированным лучом дуговых ксеноновых ламп можно сваривать тонкостенные конструкции (толщиной 0,1... 2,5 мм) из низкоуглеродистых и высоколегированных сталей (например, 08Ю, Ст10, 12Х18Н10Т, 30ХГСА, высокомарганцовистых сталей системы Fe–Mn–Al–C с содержанием 30 % Mn), а также алюминиевых (АМг3), никелевых и титановых сплавов (ОТ4, ВТ5-1, ВТ20, ОТ4-2), термопластмасс и стеклокерамику. Причем сварка малоактивных материалов (низкоуглеродистых сталей, медных сплавов) производится прямо на воздухе, что облегчает технологический процесс.

3. Пайку металлов световым лучом дуговых ксеноновых ламп можно осуществлять движущимися и неподвижными источниками тепла; в пятне нагрева происходит интенсивная термическая активация поверхности, что создает благоприятные



условия для смачивания и растекания припоя. Выявление новых возможностей светового луча дуговых ксеноновых ламп в сварочных технологиях является очень перспективным.

4. В зависимости от конкретной технологической задачи для пайки можно использовать как легкоплавкие, так и тугоплавкие припои. Пайка световым лучом применима в вакууме, в атмосфере защитных газов и на воздухе с использованием соответствующих флюсов.

1. *Беляничков Л. Н.* Светолучевые технологии — перспективное развивающееся направление спецэлектротехнологии // *Электротехнология*. — 2004. — № 10. — С. 21–26; № 11. — С. 24–29.
2. *Применение* сфокусированной лучистой энергии мощных ксеноновых ламп для сварки и пайки металлов / Г. Д. Никифоров, В. В. Дьяченко, М. И. Опарин и др. // *Свароч. пр-во*. — 1969. — № 9. — С. 1–3.
3. *Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А.* Использование лучистого нагрева для сварки, пайки и термической обработки // *Там же*. — 1974. — № 12. — С. 19–21.
4. *Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А.* Сварка и пайка световым лучом. — М.: Машиностроение, 1979. — 40 с.
5. *Федоров С. А., Овчинников В. В.* Управление формированием шва при сварке световым лучом // *Свароч. пр-во*. — 1983. — № 9. — С. 33–35.
6. *Опарин М. И., Никифоров Г. Д., Мамаев В. С.* Расширение энергетических возможностей установок для сварки световым лучом при импульсном питании дуговых ксеноновых ламп // *Там же*. — 1982. — № 7. — С. 13–14.
7. *Опарин М. И., Фролов В. А., Пронин Н. С.* Новое в области сварки световым лучом дуговых ксеноновых ламп // *Повышение качества и эффективности сварочного производства на предприятиях г. Москвы*. — М.: МДНТП, 1989. — С. 17–22.
8. *Фролов В. А.* Конструкторско-технологические особенности разработки сварных конструкций с применением светолучевой сварки // *Свароч. пр-во*. — 1998. — № 3. — С. 16–20.
9. *Использование* энергии светового луча в технологических целях / В. А. Фролов, В. С. Мамаев, Н. С. Пронин, Н. А. Коробко // *Там же*. — 1993. — № 4. — С. 12–14.
10. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
11. *Разработка* и развитие технологий сварки, пайки и термической обработки световым лучом / В. А. Фролов, Н. С. Пронин, С. А. Федоров, М. И. Опарин // *Свароч. пр-во*. — 2003. — № 11. — С. 19–21.
12. *Разработка* и развитие технологий сварки, пайки и термической обработки световым лучом / В. А. Фролов, Н. С. Пронин, С. А. Федоров, М. И. Опарин // *Технология машиностроения*. — 2003. — № 5. — С. 28–29.
13. *Федоров С. А., Овчинников В. В.* Местная термообработка сварных соединений алюминиевых сплавов светолучевыми источниками нагрева // *Там же*. — 1993. — № 1. — С. 6–7.
14. *Овчинников В. В., Федоров С. Л.* Механические свойства сварных соединений из тонколистовых титановых сплавов, выполненных дуговой и светолучевой сваркой // *Там же*. — 1989. — № 8. — С. 14–15.
15. *Федоров С. А., Овчинников В. В.* Влияние разности поверхностного натяжения металла в ванне на формирование шва при сварке тонколистовых материалов световым лучом // *Там же*. — 1986. — № 11. — С. 33–35.
16. *Светолучевая* сварка тонколистовых титановых сплавов / В. А. Фролов, В. С. Мамаев, Н. С. Пронин, П. Г. Волков // *Там же*. — 1993. — № 1. — С. 4–6.
17. *Повышение* технологической надежности при светолучевой сварке / В. А. Фролов, В. С. Мамаев, В. В. Редниц, П. Г. Волков // *Производство и надежность сварных конструкций*: Тез. докл. науч.-техн. конф. стран СНГ, Калининград, 26–28 янв. 1993 г. — М., 1993. — С. 76.
18. *Применение* светового луча в автомобилестроении / В. А. Фролов, В. С. Мамаев, Н. С. Пронин, Н. П. Коробко // *Там же*. — С. 78.
19. *Никифоров Г. Д., Пронин М. И., Федоров С. А.* Особенности формирования ванны на весу при сварке тонколистовых материалов световым лучом // *Свароч. пр-во*. — 1973. — № 8. — С. 1–3.
20. *Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А.* Энергетические и технологические особенности сварки и пайки металлов световым лучом // *Повышение качества и эффективности сварочного производства*. — М.: МДНТП, 1978. — С. 130–138.
21. *Федоров С. А., Овчинников В. В.* Свойства сварных соединений коррозионно-стойких сталей, выполненных световым лучом в азотно-кислородных смесях // *Свароч. пр-во*. — 1984. — № 8. — С. 23–24.
22. *Сварка* высокомарганцовистых сталей световым лучом / М. И. Опарин, В. А. Фролов, А. Н. Свободов и др. // *Там же*. — 1990. — № 8. — С. 2–3.
23. *Овчинников В. В., Федоров С. А.* Сварка соединений типа шпилька—фланец световым лучом дуговых ксеноновых ламп // *Там же*. — 1990. — № 5. — С. 23–24.
24. *Никифоров Г. Д., Федоров С. А., Овчинников В. В.* Сварка низкоуглеродистых и коррозионно-стойких сталей световым лучом в азоте // *Там же*. — 1982. — № 10. — С. 9–11.
25. *Овчинников В. В., Федоров С. А.* Герметизация изделий световым лучом дуговых ксеноновых ламп // *Там же*. — 1989. — № 2. — С. 3–4.
26. *Технологические* особенности сварки световым лучом медных монтажных проводов / М. И. Опарин, В. С. Мамаев, В. А. Фролов и др. // *Там же*. — 1991. — № 6. — С. 3–4.
27. *Зернов И. А., Белов Л. А., Бульбутенко В. С.* Выбор режимов радиационной локальной пайки трубчатых теплообменников // *Прогрессивные методы в пайке*: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1986. — С. 83–85.
28. *Овчинников В. В., Федоров С. А.* Пайка капиллярных трубок с арматурой световым лучом дуговых ксеноновых ламп // *Свароч. пр-во*. — 1991. — № 4. — С. 4.
29. *Пайка* пружинных контактов световым лучом дуговых ксеноновых ламп / С. А. Федоров, В. В. Гринин, В. В. Овчинников и др. // *Там же*. — 1986. — № 3. — С. 2–3.
30. *Овчинников В. В., Федоров С. А.* Пайка фильтрующих элементов световым лучом дуговых ксеноновых ламп // *Там же*. — 1991. — № 11. — С. 28–29.
31. *Опарин М. И., Коробко Н. А., Пронин Н. М.* Пайка интегральных микросхем на печатные платы лучистой энергией // *Новые энерго- и материалосберегающие технологии пайки в народном хозяйстве*. — Смоленск, 1991. — С. 93–97.
32. *Миropов Л. Г., Раваев Г. П., Петухов В. Ф.* Опыт применения сфокусированной лучистой энергии дуговых ксеноновых ламп для пайки изделий // *Новые достижения в области пайки*: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1981. — С. 116–120.
33. *Особенности* нагрева световым лучом дуговых ксеноновых ламп при пайке узлов из меди и ее сплавов / М. И. Опарин, В. С. Мамаев, Н. С. Пронин и др. // *Технологическая теплофизика. Раздел III. Теплофизика процессов сварки и пайки*. — Тольятти, 1988. — С. 129.
34. *Использование* энергии пространственно-трансформированного светового луча для высокотемпературной пайки / М. И. Опарин, Н. А. Коробко, Н. С. Пронин и др. // *Новые энерго- и материалосберегающие технологии пайки в народном хозяйстве*. — Смоленск, 1991. — С. 57–60.
35. *Алексеев Г. М., Бутов В. Н.* Оборудование для светолучевой сварки и пайки тонкостенных конструкций // *Свароч. пр-во*. — 1999. — № 9. — С. 33–35.
36. *Пигарев К. В., Волков С. С.* Исследование энергетических параметров светолучевого безлампного малогабаритного излучателя // *Там же*. — 2000. — № 3. — С. 54–56.
37. *Takagi M., Yamaji T.* New soldering process using light beam technology // *Soldering and Surface Mount Technology*. — 1995. — № 20, May. — P. 13–18.

Retrospective analysis of development of the light-beam heating method is given. The leading role of Russian scientists in formation of this area is highlighted. It is noted that the light-beam heating method can be applied for welding and brazing of various materials, as well as for heat treatment of parts. Advantages of welding using the light beam are given in comparison with those of arc welding.

Поступила в редакцию 18.05.2005