



УДК. 621.791.3

## ЛУЧЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ НАГРЕВА ДЛЯ ПАЙКИ (ОБЗОР)

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

Рассмотрены особенности развития конструктивного оформления и применения технологий с использованием электронного луча, лазера, кварцевых ламп, а также солнечной энергии. Показано, что безынерционные источники нагрева обладают возможностью управлять тепловложением в широком диапазоне, что позволяет значительно расширить номенклатуру паяемых материалов. Отмечается, что техника пайки концентрированными источниками интенсивно развивается.

*Ключевые слова:* пайка, электронный луч, лазер, инфракрасное излучение, источник тепла, кварцевая лампа, история техники

В истории развития процессов соединения во второй половине XX в. начался период, который можно считать переходным, имея в виду переход к широкому использованию интенсивных процессов пайки. Это обусловлено появлением новых видов материалов и усложнением условий их эксплуатации. Качество соединений из новых материалов зачастую можно обеспечить лишь с помощью пайки. Однако при этом обнаружилось, что основным недостатком многих процессов пайки является химическая эрозия основного материала. Кроме того, среди других факторов, влияющих на интенсивность и глубину эрозии, большое значение имеет длительность пребывания припоя в жидком состоянии, интервал между солидусом и ликвидусом сплавов паяемый металл – припой [1, 2]. Таким образом, возникла потребность в развитии технологии пайки, основанной на концентрированных источниках нагрева.

С 1960-х годов технологическими особенностями пайки заинтересовались и проектировщики изделий разного назначения. Особые требования к концентрации тепловложения возникли в связи с микроминиатюризацией электронных приборов и минимизацией их массы в крупногабаритных конструкциях авиационно-космической техники, атомной энергетики и др. В ряде организаций СССР были развернуты комплексные научные исследования, конечной целью которых являлось обеспечение качества паяных изделий ответственного назначения из новейших материалов. При этом учитывались температурные условия, конструктивная приемлемость изделия, особенности металлургического взаимодействия паяемого металла, технологичность конструкции, выносливость соединений, их коррозионная стойкость и склонность к старению, требования к долговечности и надежности [3, 4].

Результаты, полученные в 1960-е годы, позволили СССР занять ведущее место в разработке и применении технологии высокотемпературной пайки специальных изделий, в том числе пайке

неорганических диэлектриков, керметов и других материалов с металлами. Были достигнуты высокая температуроустойчивость, механическая прочность и удовлетворен ряд других высоких требований, предъявляемых к сверхмощной электронике, электровакуумным СВЧ-приборам, мощным установкам ядерной энергетики, изделиям термоядерного синтеза и ускорительной технике и др. [5].

Несмотря на то что пайку лучевыми источниками энергии применяют уже несколько десятилетий, до настоящего времени не обобщены результаты исследований по технике пайки, истории развития технологий и оборудования. Так, в фундаментальной работе [6] о пайке лучевыми источниками ничего не говорится в обзорной главе. В этой и других обобщающих работах [1, 2, 4–6] не систематизированы данные и не приводятся сравнения особенностей и возможностей различных источников лучевого нагрева, не установлен диапазон их оптимального применения.

Целью настоящего обзора является ретроспективный анализ лучевых способов пайки, сравнение схем и принципов нагрева, анализ возможностей и особенностей техники пайки на конкретных примерах и результатах применения при производстве современных изделий.

Важнейшими свойствами основных лучевых технологий (сварка, пайка, термообработка, резка и пр.) являются высокая концентрация энергии, а также безынерционность источников нагрева изделий, возможность точного регулирования параметров режима. Электронный луч, имеющий универсальные возможности, находит широкое применение. В последние два десятилетия значительное внимание исследователи и производственники уделяли разработке лазерных технологий. Создание искусственных лучевых источников энергии обусловлено развернувшимися в начале XIX в. работами в области электричества, а во второй половине XIX в. — интенсивным исследованием физических явлений на молекулярно-электронном уровне. В частности, было открыто и нашло первое практическое применение тепловое действие электронных лучей и инфракрасного излучения. В первой половине XX в. сконструированы устройства для различных технологий обработки материалов,

а во второй половине разработаны и нашли широкое применение электронно-лучевая сварка, к концу века — лазерная сварка. Одновременно в ряде стран разрабатывалась технология пайки с применением этих же источников нагрева.

Электронно-лучевая обработка основана на нагреве изделия теплом, которое выделяется при торможении потока электронов, ускоренных до высоких энергий. Впервые электронные пучки наблюдал английский физик У. Крукс (1869) в виде голубого свечения вдоль газоразрядной трубки. Он же спустя десять лет установил, что катодные лучи могут плавить металлы, в том числе и тугоплавкую платину. Еще раньше, в 1852 г. с подобным сообщением выступил В. Г. Гроув в Лондонском королевском обществе. Однако только после открытия в 1897 г. Дж. Дж. Томсоном электронов американский физик Р. Милликен отождествил сами лучи с потоком электронов. Формирование, фокусировка и отклонение электронных пучков привлекали внимание ученых многих стран. Уже в конце XIX в. началось практическое применение электронных пучков и возникло научное направление, получившее название электронной и ионной оптики. Идею отклонения электронного пучка реализовали в 1897 г. немецкий физик К. Ф. Браун (магнитным полем) и английский физик Дж. Дж. Томсон (электростатическим полем).

Эксперименты и попытки применения электронных лучей для плавки металлов продолжались и в XX в. Однако уровень развития вакуумной и электронной техники был еще недостаточен для развития промышленных технологий, основанных на преобразовании кинетической энергии потоков электронов в тепловую при взаимодействии с поверхностью нагреваемого тела. Только в начале 1950-х годов были созданы электронно-лучевые установки для плавки слитков ниобия и тантала. Создание высокопроизводительных вакуумных систем откачки, электронно-лучевых пушек, способных обеспечить стабильный технологический процесс, надежных систем питания и управления пушками ускорило внедрение электронно-лучевых установок в металлургию чистых металлов и сплавов [7].

Первые технологии и установки для электронно-лучевой сварки разработаны в 1950-х годах Дж. А. Старом, Дж. Бриолом (Франция), В. Л. Выменом (США) [8, 9], Н. А. Ольшанским, Б. А. Мовчаном, Д. М. Рабкиным, С. М. Гуревичем, О. К. Назаренко, С. Д. Загребенюком (СССР) [10, 11]. За короткий срок разработаны способы формирования электронного пучка, конструкции электронно-лучевых установок с вакуумными камерами объемом до нескольких десятков кубометров, накидные камеры для локальной обработки, определены преимущества и область рационального применения электронно-лучевой сварки, налажено производство оборудования. Что касается технологии пайки, то электронно-лучевой нагрев (ЭЛН) начал одновременно использоваться для различных экспериментов пайки высокоточных изделий, собранных из тонкостенных и разнотолщинных эле-

ментов, а также изготовления узлов и конструкций из активных и тугоплавких металлов.

В ИЭС им. Е. О. Патона (В. Ф. Хорунов, Ю. Б. Малевский и др.) исследовали деформации, структурные изменения и другие характеристики некоторых способов пайки, выполняемых в вакуумной установке с кольцевым ЭЛН [12]. При этом удалось с достаточно высокой точностью осуществить циклический нагрев в различных температурных и временных интервалах. В Научно-исследовательском институте авиационной техники (А. Н. Кабанов, А. А. Кафаров и др.) разработано несколько моделей универсальных электронно-лучевых установок для прецизионной сварки, пайки и размерной обработки ЭЛУРО с возможностью регулирования общей и удельной мощности в пучке в широких пределах как в импульсном, так и непрерывном режимах (рис. 1) [13, 14]. Достигнутая удельная мощность  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> позволяла обрабатывать практически все существующие материалы. На установке ЭЛУРО изготавливаются специальные изделия электронной техники. Наличие микроскопа и механизма перемещения обеспечивает совмещение электронного пучка и зоны соединения с точностью  $\pm 5$  мкм при пайке золотых проволок диаметром 80 мкм к нихром-марганцевому серебру на стекле (толщина слоев составляет 30 и 800 нм; припоем служит слой серебра толщиной 600...800 нм) [15]. ЭЛН был использован при изготовлении сквозных выводов в диэлектрических и полупроводниковых материалах с высокой плотностью и точностью размещения. В этом случае на одной и той же установке сверлят от-

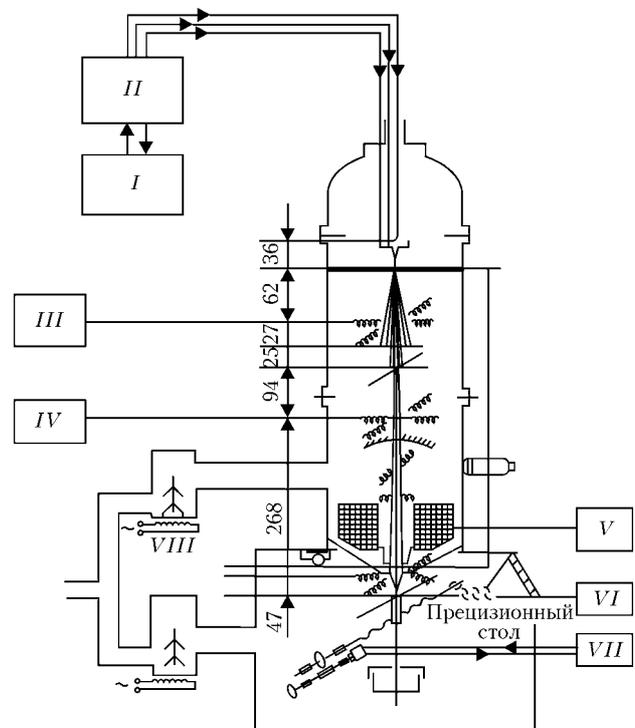


Рис. 1. Принципиальная схема установки ЭЛУРО: I — высоковольтный выпрямитель; II — стабилизатор напряжения, модулятор, блоки накала и напряжения смещения; III–V — источники питания юстирующих катушек стигматора и линзы; VI — блок питания растрового электронного микроскопа; VII — питание двигателей стола; VIII — откачная система

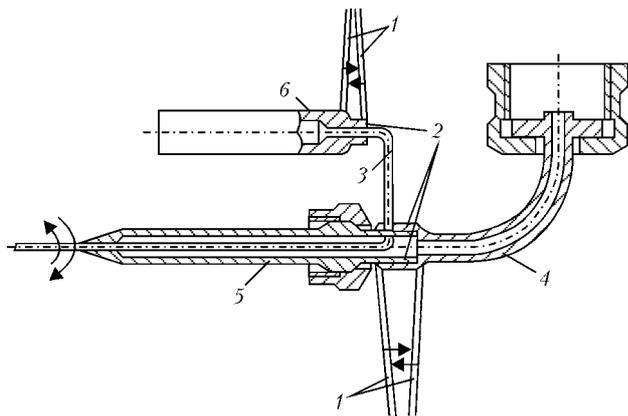


Рис. 2. Схема пайки узла медицинского инструмента: 1 — колеблющийся электронный пучок; 2 — цилиндр; 3 — игла; 4 — патрубок; 5 — рабочий цилиндр; 6 — припой

верстия (диаметром несколько десятков микрометров), в которые вставляют проволоочки (ковар и др.) и осуществляют пайку более «мягким» электронным пучком. При этом достигается высокая точность расположения выводов — при размещении пяти проволочек на  $1 \text{ мм}^2$  отклонение от заданной геометрии составляло всего лишь  $10 \text{ мкм}$  [15]. Промышленностью и экспериментальными производствами исследовательских организаций налажен выпуск и других типов установок.

Для ЭЛН большой площади соединения применяют сканирование потока электронов. В установках типа ЭЛУ-4 для равномерного прогрева зоны пайки электронный пучок колеблется при подаче на отклоняющую систему пушки импульсов различной формы. На такой установке осуществляется пайка сложных узлов медицинских инструментов из коррозионностойких сталей (рис. 2) [16].

В конце 1980-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология пайки массивных деталей сложной конфигурации с использованием ЭЛН и низкотемпературных припоев [17]. В лабораторных условиях проведена пайка элементов космических конструкций из алюминиевых сплавов с никель-медным и никель-оловянным покрытием. Нагрев, продолжительность которого ограничивалась временем заполнения зазора припоем, осуществлялся расфокусированным пучком электронов при давлении в камере  $1 \cdot 10^{-2}$  МПа. Высокая проплавляющая способность электронного луча использована при разработке технологии изготовления колес центробежных компрессоров, состоящих из двух дисков и помещенных между ними лопаток. Электронным лучом проплавляют покрывающий диск и расплавляют припой между диском и лопаткой [18].

Освоение космического пространства требует изготовления специальных конструкций из отдельных деталей на орбите. При этом, как и на Земле, в космосе одной из ведущих технологий соединения остается пайка. Однако условия выполнения пайки, как и ряда других технологий в космосе, значительно усложняются из-за отсутствия силы тяжести, наличия вакуума, необходимости работ в скафандрах, ограничения массы инструментов и

другого оборудования. Кроме того, в этих условиях все чаще используются также новые материалы, такие, как композиты с полимерными, керамическими, металлическими матрицами и углепластиками.

Первые в мире эксперименты по сварке в космосе выполнены в 1969 г. В. Н. Кубасовым на космическом корабле «Союз-6». На установке «Вулкан», созданной в ИЭС им. Е. О. Патона, испытаны процессы дугового и ЭЛН. Уже тогда установлено, что при работе за бортом космических аппаратов наиболее целесообразно использовать электронно-лучевую пайку [19]. Электронно-лучевые установки, нормально функционирующие в космическом вакууме, потребляющие минимальное количество энергии по сравнению с другим аппаратом, обеспечивают высокую термическую эффективность технологий сварки, пайки, напыления. Это подтвердилось при осуществлении эксперимента по пайке в открытом космосе [20].

В результате многолетних исследований, выполненных под руководством Б. Е. Патона в ИЭС им. Е. О. Патона (В. Ф. Лапчинский, Е. А. Аснис, А. А. Загребельный, В. Ф. Хорунов и др.), в РКК «Энергия» (Россия) (В. П. Никитский, А. В. Марков и др.) и в ряде других организаций, а также экспериментов на различных космических аппаратах, разработаны надежные оптимальные конструкции электронно-лучевых установок, технологий соединения и ремонта космических конструкций, типы соединений и др. Для проведения ремонтных работ не требуются остросфокусированные электронные пучки, поэтому в качестве источника ЭЛН для пайки была использована прямоканальная диодная пушка [21]. Коллективами этих же организаций разработаны конструкции орбитальных комплексов, крупногабаритных станций, при строительстве которых в космических условиях применяется пайка [22].

В основе оптических источников нагрева лежит ряд изобретений середины XIX в., приведших к созданию электрических источников освещения, инфракрасных и ультрафиолетовых лучей. У источников осветительной техники стояли ученые и изобретатели многих стран (П. Н. Яблочков, В. Н. Чижевский, А. Н. Лодыгин, Т. А. Эдисон, В. Сван, И. Ленгмюр, Н. П. Бульгин и др.). Электрическое освещение, внедренное в первой половине XX в. в быт, является важнейшим и эффективнейшим показателем вклада электротехники в развитие цивилизации. Тепловое действие лучистой энергии осветительных приборов (как дуговых, так и накаливания), замеченное при решении проблем освещения, часто рассматривалось как «вредное явление». Тем не менее уже в начале XX в. лучистый нагрев начинают использовать в технологических целях: для сушки, плавления различных веществ и пр. Совершенствуются и соответствующие устройства: рефлекторы, печи [23]. Решение некоторых теоретических проблем теплового излучения света (излучение абсолютно черного тела) в 1900 г. М. Планком легло в основу современной квантовой физики. В частности, получил объяснение фотоэффект А. Г. Столетова. Нагрев объяснялся поглощением освещаемым телом энергии и импульсов

фотонов. При отражении от зеркала фотон изменяет свою энергию и импульс в соответствии с законами соударения двух материальных тел, но не теряет свою нагревательную способность [24].

Создание источника электромагнитного излучения видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов — оптического квантового генератора открыло новую эпоху в развитии техники. Первые квантовые генераторы в сантиметровом диапазоне волн (мазеры) появились в 1954 г. В 1960 г. советскими физиками Н. Г. Басовым, А. М. Прохоровым и американским физиком Ч. Таунсом созданы первые лазеры на рубине. Вскоре в том же году создан первый газоразрядный лазер на смеси гелия и неона, а в 1962 г. — полупроводниковые лазеры [25].

Лазер имеет широкие технологические возможности, к которым относятся: высокая концентрация энергии в пучке (до  $1 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>); практически безынерционное управление энергетическим потоком, высокая точность фокусирования луча, что обеспечивает минимизацию зоны термического влияния и деформаций, проникновение в труднодоступные места. Важнейшим преимуществом лазерного луча по сравнению с электронным является возможность передачи излучения без потерь на значительные расстояния с помощью пропускающих (на базе линз) или отражающих (на базе параболических зеркал) оптических систем и распределения энергии нагрева по рабочим зонам; бесконтактность обработки; экологическая чистота. Энергия лазерного луча может концентрироваться в точку диаметром около 0,2 мм.

В 1970-х годах для технологических целей разработаны несколько систем лазеров, но наибольшее применение получили лазеры на углекислом газе (СО<sub>2</sub>-лазеры) и твердотельные — на алюмоит-

триевом гранате, легированном неодимом (АИГ) (рис. 3).

Первые технологические лазерные установки имели максимальную энергию излучения не выше 2 Дж с длительностью импульса до 8 мс и частотой посылок до 60 имп./мин. Однако лазеры постоянно совершенствуются. К концу 1960-х годов разработаны импульсные квантовые генераторы. В 1974 г. эти лазеры использованы в установках типа «Квант» для сварки и других работ термического характера [26]. В 1972 г. впервые в СССР эксперименты по непрерывной лазерной сварке были проведены сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона и Физического института им. П. М. Лебедева. В 1975 г. в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова была создана промышленная установка на базе СО<sub>2</sub>-лазера [27].

Особенно эффективно применение для сварки и родственных технологий СО<sub>2</sub>-лазеров, имеющих широкий диапазон мощности и излучения, при этом увеличить их эффективность можно за счет импульсного режима работы. При пайке, как правило, требуется плотность мощности на выходе меньше чем при сварке и резке, что достигается регулированием мощности, и площади пятна, применением линз с очень коротким фокусным расстоянием.

Гибкие световоды позволяют транспортировать лазерный луч к любому месту пайки с минимальными потерями энергии. Установки типа «Квант» с гибким световодом были применены при изготовлении и ремонте изделий из титановых сплавов. Во многих случаях для ремонта необходим только локальный нагрев дефектных участков, что можно выполнить лишь подводом концентрированной энергии. В тех случаях, когда необходим быстрый нагрев значительной площади изделия, применяют дефокусирование пучка или сканирование пучком (рис. 4). В первом случае нагревается узкая полоса материала, во втором случае площадь пятна достигает несколько сот квадратных миллиметров.

В 1970-х годах в ИЭС им. Е. О. Патона (В. П. Гарашук, О. А. Величко, П. Ф. Аврамченко), Институте металлургии им. А. А. Байкова и ряде других организаций разработаны высокоэффективные технологии изготовления элементов электронной техники пайкой лучом лазера. Удалось решить проблемы соединения тонких проволок с тонкими пленками, а также образования омических контактов в кристаллах интегральных схем [28, 29]. В ходе исследований О. В. Якубовичем, В. Е. Матюшковым и другими доказана возможность присоединения «паучка» к шариковым выводам интегральных схем путем пайки за один импульс излучения лазера на установке «Квант-16» [30].

В 1980-х годах лазерная пайка начинает широко применяться в серийном производстве, стальных конструкций, например, при соединении листов кузовов автомобилей, причем припой подается в виде проволоки (рис. 5) [31].

В последующие годы усилилось внимание к проблемам лазерной пайки керамики с металлом. В частности, в МГТУ им. Н. Э. Баумана (Б. А. Ви-

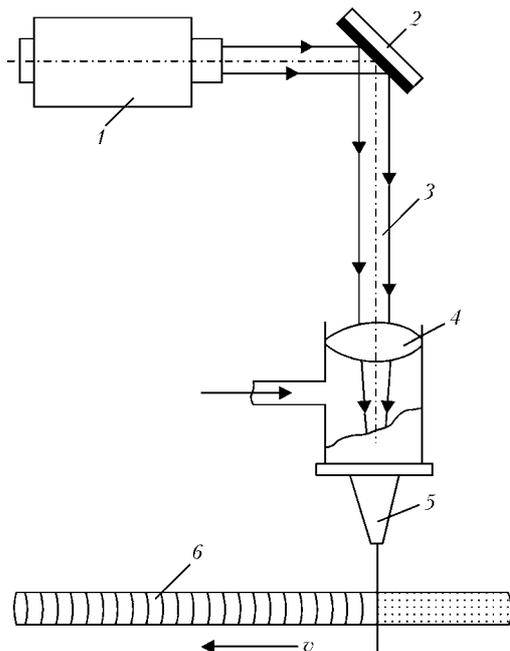


Рис. 3. Схема системы СО<sub>2</sub>-лазера для обработки металлов: 1 — источник лазера; 2 — зеркало; 3 — луч лазера; 4 — линза; 5 — сопло; 6 — деталь

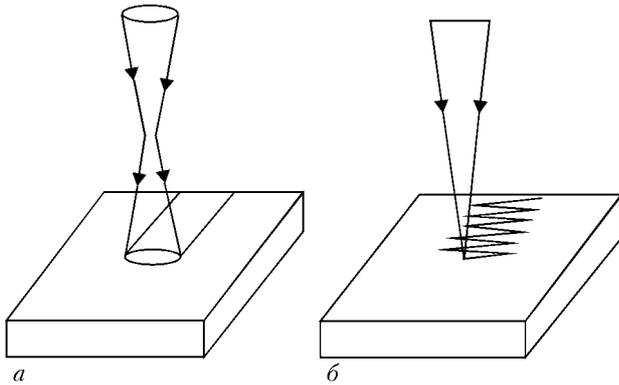


Рис. 4. Схематическое изображение дефокусированного (а) и сканированного (вибрирующего) (б) пучка

ноградов, Д. Л. Харичева и др.) созданы математические модели пайки плоских и конусных охватывающих металлокерамических соединений [32, 33].

В Японии с помощью лазерной пайки решены проблемы соединения жаропрочных сплавов и алюминиевых сплавов с использованием жаропрочных припоев из благородных металлов и алюминиевых припоев. При этом использован диодный лазер, который обеспечивал подавление эрозии основного металла, очень точное локальное управление [34]. В США и Канаде лазерная пайка успешно применяется при ремонте лопаток гидротурбинных двигателей [35]. Есть сообщения об эффективном применении лазерной пайки в электронике (Германия) [36].

В настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона продолжаются работы по шовной лазерной пайке оцинкованной стали (В. Ф. Хорунов, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, И. В. Зволинский, С. В. Максимова, А. В. Бернацкий, А. В. Сиора). Для этого был создан специальный стенд (рис. 6) на базе двухкоординатного манипулятора. В экспериментах использован лазер ЛТ-104, разработанный и изготовленный в ИЭС им. Е. О. Патона [37]. Припой на основе меди выполнен в виде проволоки диаметром 1,2 мм. Стыки листовой оцинкованной стали паяли в зазор (0,6 мм). Получено удовлетворительное формирование верхнего и нижнего валиков усиления, плавный переход металла припоя к цинковому покрытию без нарушения последнего. Скорость пайки — до 2 м/мин.

К числу лучевых источников нагрева для пайки можно причислить кварцевые лампы. В зависимости от технологических условий применяют установки с рефлекторами, линзами световодами, лампами различных типов. Наиболее часто используют лампы инфракрасного нагрева для работы в горизонтальном положении (кварцевые йодные лампы типа НИК-220-1000, КИО-220-2500 и др.) [38–40], мощность которых достигает нескольких киловатт с температурой нагрева свыше 2000 °С. В 1970-х годах пайка кварцевыми лампами в инертном газе успешно применялась для изготовления сотовых панелей из титановых сплавов, разнообраз-



Рис. 5. Лазерная пайка кабины автомобиля

разных конструкций из других металлов, а также пластмасс [39].

Особое место для целей сварки и пайки занимает световой луч [40–44]. С середины 1950-х годов для решения ряда проблем научно-технического прогресса (изготовления электронных приборов, выращивания монокристаллов и других) начинают применять нагрев световым лучом. В соответствии с концепцией разработки светолучевого технологического оборудования, сформулированной Г. Д. Никифоровым, в 1968 г. в Московском авиационном технологическом институте им. К. Э. Циолковского спроектирована первая экспериментальная установка для сварки и пайки чистой энергией УСПЛЭ-1-МАТИ (М. И. Опарин). В первой половине 1970-х годов созданы светолучевые установки с мобильными горелками в виде дуговых ксеноновых ламп мощ-

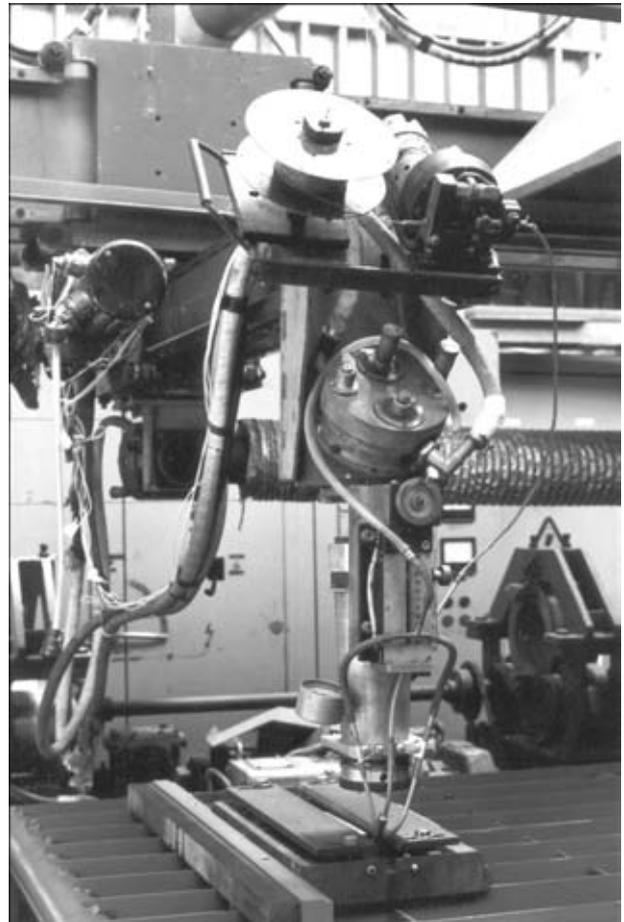


Рис. 6. Стенд для лазерной шовной пайки

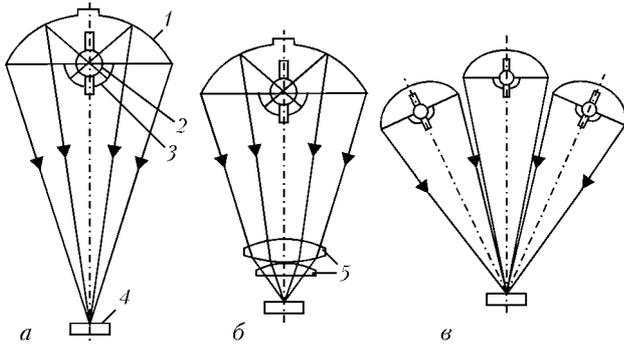


Рис. 7. Оптические схемы экспериментальных установок с моноэллипсоидной (а), моноэллипсоидной с линзовым объективом (б) и полиэллипсоидной (в) для сварки, пайки и термической обработки лучистой энергии: 1 — эллипсоидный отражатель; 2 — дуговая ксеноновая лампа; 3 — контротражатель; 4 — нагреваемый объект; 5 — мензювый объектив

ностью до 10 кВт, проведены экспериментальные исследования установок с различными фокусирующими системами (рис. 7) [43, 44].

К числу экспериментальных установок принадлежат установка с семью оптическими фокусирующими системами и лампами, малогабаритная установка «Фотон-1» и др. [45]. Широкомасштабными исследованиями определены технологические преимущества: бесконтактный нагрев изделия с подводом энергии через оптически прозрачные камеры в любой газовой среде и любом давлении, нагрев изделия независимо от физических и химических свойств материалы, высокая точность управления параметрами режима [37]. Аналогичные результаты получены в США, Японии и других странах [46].

В ряде случаев именно пайка сфокусированной лучистой энергии позволяет получить высококачественные соединения для изделий электронной техники. На промышленной установке УПСЛ-1 выполнена пайка планарных выводов микросхем на печатные платы и герметизация с помощью луча корпусных деталей в вакууме [47].

В 1980-х годах разработано более мощное светолучевое оборудование. Специальные металлические отражатели и импульсный режим питания позволили увеличить плотность потока до 12 кВт/см<sup>2</sup>; сферозеллипсоидные фокусирующие системы позволяют получить кольцевой и расщепленный на несколько лучей поток [48].

Особое место среди лучевых источников принадлежит Солнцу — естественному природному источнику тепла, от которого зависит жизнь на Земле. Способ концентрации солнечной энергии с помощью оптических линз применялся с древнейших времен. Так, в храмах Древнего Китая, Древнем Риме и Древней Греции зажигали священный огонь. В начале прошлого столетия была возрождена традиция также зажигать олимпийский огонь от солнечных лучей. В развалинах столицы Ниневии (Месопотамия) были найдены линзы, датируемые в VII в. до н. э. Первые исследования нагрева предметов солнечными лучами описал

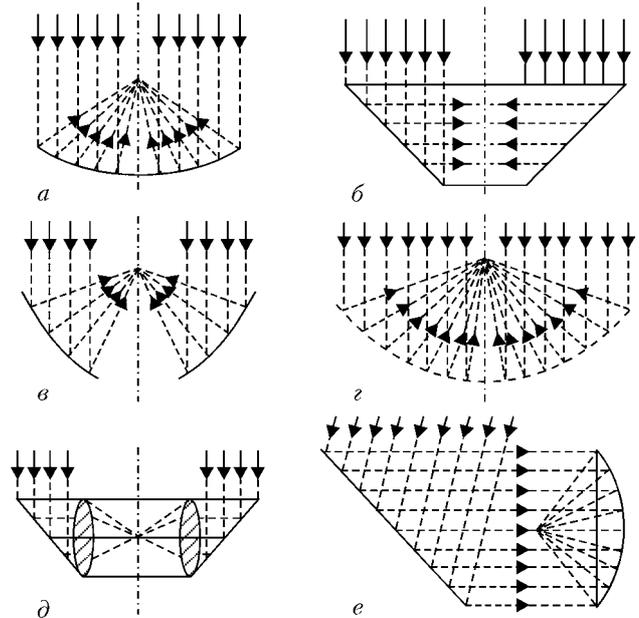


Рис. 8. Схемы гелиоконцентраторов: а — параболоидного (параболоцилиндрического, цилиндрического); б — конического; в — тороидального; г — составного из отдельных плоских зеркал; д — зеркально-линзового; е — с подвижным зеркалом и неподвижным концентратором

древнегреческий ученый Архимед в трактате «О зажигательных стеклах» [49]. Он же изобрел, и, как считают, впервые применил, и второй способ концентрации солнечной энергии отражением от зеркал. Согласно византийскому поэту Цецесу Архимеду удалось сжечь римский флот консула Марцелла, осаждавший Сиракузы, предложив женщинам направлять в одну точку на кораблях солнечные зайчики от их зеркал [50].

Естественно, что энергия Солнца и кажущаяся простота ее концентрации не раз привлекала внимание изобретателей. В конце XIX в. в России, Великобритании, Франции появились сообщения об успешном использовании солнечного тепла в паровых двигателях. Устройства для нагрева даже получили название «инсолятор». Однако эффективность таких устройств была чрезвычайно низкой и практического применения они не имели.

Во второй половине XX в. развивается гелиоэнергетика, занимающаяся проблемами энергетического использования солнечной энергии. Работы ведутся в нескольких направлениях преобразования энергии Солнца в другие виды энергии, удобные для практического использования (в первую очередь тепловую и энергетическую). Основным элементом гелиоустановок для нагрева являются гелиоконцентраторы (рис. 8). Устройства для концентрации лучистой энергии, повышающие на небольшом участке в  $10... 10^{10}$  раз плотность энергии солнечной радиации, сконструированы в виде плоских или вогнутых отражателей различной формы.

Солнечные печи, кроме концентраторов, состоят из камеры нагрева, регулятора плотности потока, лучистой энергии и системы управления положением относительно направления освещения. В раз-



Рис. 9. Бизеркальная оптико-энергетическая установка — солнечная печь мощностью 1 МВт Института материаловедения НПО «Физика — Солнце» (пос. Паркент, Ташкентская обл.)

личных странах к концу XX в. созданы печи, пригодные для плавки, сварки, пайки, термической обработки, в которых достигнута температура нагрева 3500... 3800 °С. Крупные солнечные печи мощностью более 1 мВт построены в Фон-Роме — Одейо (Франция) в пос. Паркент (Ташкентская обл., Узбекистан) (рис. 9), в Туркменистане (НПО «Солнце»), в США (Калифорния), в Лас-Салинасе (Чили) и др. О возможности использования солнечной энергии можно судить по результатам испытаний гелиоустановки в США (г. Альбукерк, штат Нью-Мексико). Солнечные зайчики от 1775 зеркал в 1,5 м каждое, сфокусированные на стальной плите размером 400×300×20 (мм), раскалили ее за 2 мин до температуры 1000 °С. Следует отметить, что основным назначением разрабатываемых печей является нагрев воды для опреснения, получения пара и других целей. Однако известны работы, направленные на использование солнечной энергии для химических технологий и плавления — переплава, сварки, пайки [51, 52]. Наиболее вероятно, что сварка и пайка с помощью солнечной энергии найдет применение при строительстве и ремонте инженерных сооружений в космосе. Технической основой для создания специальных концентраторов могут служить решения, поиск которых ведется при разработке крупногабаритных солнечных отражателей из полимерной металлизированной пленки, разворачиваемых на околоземной орбите для подсветки отдельных участков Земли, и зеркал-концентраторов большого диаметра, солнечных газотурбинных установок [19]. Для создания технологических гелиоустановок можно использовать уже найденные технические решения. Известны несколько прогрессивных конструкций космических оптических систем с увеличенным диаметром металлических зеркал [53]. Е. А. Коршенко, И. М. Ждановым, С. И. Моравецким, С. К. Фомичевым и другими (НТУУ «Киевский политехнический институт») и В. Ф. Лапчинским (ИЭС им. Е. О. Патона) разработана облегченная многослойная конструкция из гофрированных тонколистовых элементов [54]. И хотя, по мнению авторов, такие системы должны формироваться с применением сварки (односторонних точечных соединений), многолетний опыт изготов-

ления подобных решетчатых конструкций (авиационных и ракетных) позволяет утверждать, что и при строительстве оптических систем в космосе наиболее эффективным способом соединения будет пайка [55].

## Выводы

1. Благодаря открытиям в области физики высоких энергий, оптики и разработки устройств, излучающих потоки электронов и квантов света, во второй половине XX в. созданы промышленные установки, предназначенные для преобразования кинетической энергии потоков электронов и электромагнитного излучения в тепловую энергию, практически пригодные для целей пайки.

2. Технологические возможности электронно-лучевых и оптических установок: безынерционность, высокая концентрация энергии, точность позиционирования — позволяют эффективно решать проблемы изготовления сложных узлов и конструкций от микроэлектронных элементов до крупногабаритных инженерных сооружений в космосе из всех конструкционных металлических сплавов, керамики и других материалов.

1. Петушин И. Е., Екатова А. С., Маркова И. Ю. Металловедение пайки. — М.: Металлургия, 1976. — 263 с.
2. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Вопросы теории и технологии пайки. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974. — 247 с.
3. Россошинский А. А., Табелев В. Д., Кислицын В. М. Микросварка давлением. — Киев: Техника, 1971. — 152 с.
4. Справочник по пайке / Под ред. С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрунина, В. П. Фролова. — М.: Машиностроение, 1975. — 397 с.
5. Развитие пайки в XX-м веке / В. П. Фролов, И. Ю. Маркова, В. К. Ерошев и др. // Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции. — М.: ЦРДЗ, 2001. — С. 3–11.
6. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов // Сварка в СССР. — М.: Наука, 1981. — Т. 1. — С. 438–452.
7. Шиллер В., Гайзик У., Паицер З. Электронно-лучевая технология / Пер. с нем. — М.: Энергия, 1980. — 495 с.
8. Wyman W. L. High-vacuum electron-beam fusion welding // Welding J. — 1958. — № 2. — P. 49–53.
9. Stohr J. A., Briola J. Vacuum welding of metals // Welding and Metal Fabric. — 1958. — 10. — P. 366–370.
10. Ольшанский Н. А. Метод сварки электронным лучом в вакууме // Автомат. сварка. — 1959. — № 8. — С. 3–11.
11. Некоторые технологические особенности сварки электронным лучом в вакууме / Б. А. Мовчан, Д. М. Рабкин, С. М. Гуревич, С. Д. Загребенюк // Там же. — 1959. — № 8. — С. 32–33.
12. Влияние некоторых технологических параметров на процесс сварки-пайки / В. Ф. Хорунов, Ю. Б. Малевский, В. С. Несмих, Н. Н. Синица // Там же. — 1968. — № 11. — С. 22–25.
13. Кабанов А. Н., Кафаров А. А., Михайловский Г. А. Эксплуатационные характеристики установки ЭЛУРО // Там же. — 1967. — № 3. — С. 72–73.
14. Ильин В. В., Клейков А. Г. Стабилизированный источник ускоряющего напряжения установки ЭЛУРО // Там же. — С. 75–76.
15. Кабанов А. Н., Золотов Л. А. Применение установки ЭЛУРО для микросварки и пайки // Там же. — С. 74–75.
16. Электронно-лучевая пайка узла безыгольного инжектора / В. М. Плетнев, Ф. Н. Рыжков, М. Л. Дроздов, Н. Г. Стегнин // Свароч. пр-во. — 1971. — № 4. — С. 49–50.
17. Технология низкотемпературной вакуумной пайки узлов решетчатых ферменных конструкций из алюминиевых сплавов / В. Ф. Хорунов, В. Ф. Лапчинский, В. И. Швец, В. Ф. Шулым // Автомат. сварка. — 1993. — № 2. — С. 52–53.
18. Ткаченко Г. Г., Радзиевский В. Н., Гарицун Ю. Ф. Автотермовакуумная пайка рабочих колес центробежных компрес-

- соров из стали О7Х16Н6 // Пайка. — Тольятти: Тольят. политехн. ин-т, 2000. — С. 44–48.
19. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — Киев: Наук. думка, 1998. — 181 с.
  20. Особенности формирования паяных соединений тонкостенных конструкций в космосе / В. Ф. Хорунов, В. И. Швец, А. Р. Булацев, С. С. Гавриш // Автомат. сварка. — 1999. — № 10. — С. 31–38.
  21. Технология ремонта трубопроводов с использованием электроннолучевой сварки и пайки применительно к условиям космоса / Е. А. Аснис, С. П. Заболотин, В. Ф. Лапчинский, Д. П. Новикова // Там же. — 1997. — № 8. — С. 50–53.
  22. Ферменные конструкции в орбитальных комплексах / Б. Е. Патон, А. Р. Булацев, Е. С. Михайловская и др. // Там же. — 1998. — № 11. — С. 5–10.
  23. Ласло Т. С. Оптические высокотемпературные печи. — М.: Мир, 1968. — 212 с.
  24. Бори М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ. под ред. Г. П. Мотулевич. — М.: Наука, 1973. — 719 с.
  25. Клаудер Дж. Р., Сударшан Э. Основы квантовой оптики / Пер. с англ. под ред. С. А. Ахманова. — М.: Мир, 1970. — 425 с.
  26. Баранов М. С., Кондратьев В. А., Углов А. А. Кинетика образования соединения проволоки при сварке лучом импульсного лазера // Физика и химия обработ. материалов. — 1972. — № 5. — С. 11–14.
  27. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов. — М.: Машиностроение, 1975. — 296 с.
  28. Аврамченко П. Ф., Величко О. А., Моравский В. Э. Импульсная лазерная пайка проводников с пленками в микроприборостроении // Автомат. сварка. — 1978. — № 5. — С. 24–26.
  29. Соединение элементов интегральных схем с помощью лазера. — Новости науки и техники: Информ. сообщение / ВИНТИ. — 1975. — № 14. — С. 15–16.
  30. Пайка лучом лазера изделий электронной техники / О. В. Якубович, В. Е. Матюшков и др. // Там же. — 1975. — № 4. — С. 57–59.
  31. Husner J., Olainek C. Laser brazing in automobile production // Thyssen Krupp Techforum. — 2003. — № 12. — P. 60–63.
  32. Виноградов Б. А., Харичева Д. Л., Швайка Д. С. Моделирование тепловых процессов при лазерной пайке керамики с металлом // Пробл. машиностроения и надежности машин. — 2001. — № 4. — С. 71–75.
  33. Определение характерных тепловых зон при лазерной пайке металла с керамикой / Б. А. Виноградов, Д. Л. Харичева, В. А. Степочкин, Ю. А. Петраченко // Свароч. пр-во. — 2004. — № 8. — С. 23–26.
  34. Сауда К., Нисимото К. Способ высокотемпературной пайки диодным лазером // Технология сварки. — 2003. — № 51, № 6. — С. 92–98.
  35. Додд Э., Билах Я. Ремонт лопаток лазером технология будущего // Сварщик. — 2004. — № 3. — С. 34–35.
  36. Azdasht G., Zakel E., Reiche H. Implementation of low power diode laser for soldering by fibre push connection method // Soldering and Surface Mount Technology. — 1996. — № 22, Fabr. — P. 51–54.
  37. Технологический СО<sub>2</sub>-лазер ЛТ-104 мощностью 10 кВт / В. П. Гаращук, В. Д. Шелягин, О. К. Назаренко и др. // Автомат. сварка. — 1997. — № 1. — С. 36–39.
  38. Электронечи с инфракрасным нагревом ОКБ-1152 и ОКБ-1153 // Электротермия. — 1965. — Вып. 43. — С. 3–4.
  39. Хорунов В. Ф., Кужель А. В., Малевский Ю. Б. Изготовление паяных слоистых конструкций // Автомат. сварка. — 1974. — № 11. — С. 53–56.
  40. Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А. Сварка и пайка световым лучом: Учебн. пособ. — М.: Машиностроение, 1979. — 40 с.
  41. Использование энергии светового луча в технологических целях / В. А. Фролов, В. С. Мамаев, Н. С. Пронин и др. // Сварочн. пр-во. — 1993. — № 4. — С. 12–14.
  42. Хорунов В. Ф., Шаль Дзиго. Сварка и пайка различных материалов с использованием светового луча дуговых ксеноновых ламп (Обзор литературы) // Автомат. сварка. — 1995. — № 5. — С. 48–52.
  43. Использование сфокусированной лучистой энергии мощных ксеноновых ламп для сварки и пайки металлов / Никифоров Г. Д., Дьяченко В. В., Опарин М. И., Лопатина Г. Г. // Сварочн. пр-во. — 1969. — № 9. — С. 1–3.
  44. Никифоров Г. Д., Опарин М. И., Федоров С. А. Использование лучистого нагрева для сварки, пайки и термической обработки // Там же. — 1974. — № 12. — С. 18–21.
  45. Миронов Л. Г., Раваев Г. П., Петухов В. Ф. Опыт применения сфокусированной лучистой энергии дуговых ксеноновых ламп для пайки изделий // Новые достижения в области пайки. — Киев: ИЭС, 1981. — С. 116–120.
  46. Takagi M., Yamaji T. New soldering process using light beam technology // Soldering and Surface Mount Technology. — 1995. — № 20, Maj. — P. 13–20.
  47. Фролов В. А. Конструкторско-технологические особенности разработки сварных конструкций с применением светолучевой сварки // Свароч. пр-во. — 1998. — № 3. — С. 16–20.
  48. Разработка и развитие технологий сварки, пайки и термической обработки световым лучом / В. А. Фролов, Н. С. Прошин, С. А. Федоров, М. И. Опарин // Технология машиностроения. — 2003. — № 5. — С. 28–29.
  49. Архимед. Сочинения. — М.: Физматгиз, 1962. — 639 с.
  50. Веселовский И. Н. Архимед. — М.: Учпедгиз, 1957. — 111 с.
  51. Оптические инфракрасные телескопы 1990-х гг. — М.: Мир, 1983. — 296 с.
  52. А. с. СССР 350614, МПК В23К 27/00. Рефлектор / А. Н. Корниенко. — Оpubл. 13.09.1972, Бюл. 27.
  53. Семенов Ю. П. Космические технологии на рубеже веков: итоги и перспективы // Автомат. сварка. — 2003. — № 10/11. — С. 23–31.
  54. А. с. 1684091 СССР, МПК 5 В32В 3/12. Пакет для изготовления многослойной конструкции / И. М. Жданов, В. В. Конончук, С. К. Фомичев и др. — Оpubл. 15.10.91, Бюл. № 38.
  55. Решетчатые крылья / С. М. Белоцерковский, Л. А. Одновол, Ю. З. Сафин и др. / Под ред. С. М. Белоцерковского. — М.: Машиностроение, 1985. — 320 с.

The paper deals with the features of development of the design and application of technologies using the electron beam, laser, quartz lamps, as well as solar energy. It is shown that the inertialess heat sources enable controlling the heat input in a broad range, which allows considerable widening of the scope of brazed materials. Intensive development of the technique of brazing using concentrated heat sources is noted.

Поступила в редакцию 27.12.2004