



УДК 621.791:754

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ И ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

А. П. ЛИТВИНОВ, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, Мариуполь)

Рассмотрена история разработок технологий, основанных на взаимном одновременном действии двух источников тепловой энергии. Предложено различать комбинированные и гибридные процессы. При комбинированных процессах действуют несколько одинаковых или однотипных источников, при гибридных процессах используется совмещение различных по физическим характеристикам источников, позволяющих достигать новые технологические свойства процесса.

Ключевые слова: сварка плавлением, наплавка, дуговая сварка, плазменная сварка, лазерная сварка, комбинированная сварка, гибридная сварка, история техники

Каждый из способов сварки имеет как определенные преимущества, так и недостатки. Создание комбинированных и гибридных технологий сопровождается совмещением технологических и других преимуществ отдельных способов сварки и сведение к минимуму недостатков. Основными задачами, стоящими перед сварочным производством, являются: повышение скорости сварки, снижение энерго- и материалоемкости, управление формой шва и повышение качества соединения. При сварке плавлением на протяжении многих лет успешно решается задача расширения диапазона толщин соединяемых деталей, а при наплавке — задача минимального проплавления, уменьшения зоны сплавления между деталью и наплавляемым слоем (валиком). Эффективно эти задачи могут решаться путем разделения тепловложения, нагрева и расплавления между двумя (и более) источниками энергии, одновременно «действующими» в общей зоне сварки/наплавки. При этом каждый из источников выполняет незначительно или принципиально различающиеся функции. Следует отметить, что в публикациях иногда такие способы называют «комбинированными» или «гибридными», полагая, что для этих названий обобщающим признаком является новый технологический эффект. Для того чтобы найти различия, необходимо рассмотреть историю создания технологий сварки и наплавки с применением нескольких источников энергии.

Согласно работе [1] сварочными гибридными процессами называют комбинацию двух (или более) обычных (стандартных) процессов, в результате чего появляются эффекты, которые каждый из процессов отдельно создать не может. По-

явление первой гибридной технологии Р. В. Месслер относит к 1972 г. и начинает со способа, разработанного В. Г. Эссером и А. С. Лифкеном в лаборатории фирмы «Филлипс» (Нидерланды) [2]. В Украине название этого вида сварки (наплавки) — «плазма-МИГ» уже утверждено в Государственном стандарте на терминологию [3].

Определение «гибридная сварка» до сегодня официально не утверждено. Понятие «гибрид» (происходящее от лат. *Hibreda* — помесь) с начала XVIII в. относили к биологии, к скрещиванию животных или сортов растений [4]. В XX в. гибридными начали называть объединенные процессы, установки, системы и приборы с различными свойствами, характеристиками, в результате которого достигается новый технический эффект (например, гибридные вычислительные системы, интегральные схемы, соединения радиоволноводной системы). К гибридным сварочным процессам Р. В. Месслер относит и действие на общую сварочную ванну двух лазерных лучей, идущих последовательно по оси соединения или по сторонам от оси. В этом случае основанием для квалификации «гибридного процесса» он считает эффект улучшения формирования, а не различие технических характеристик компонентов. Предложенное им определение нельзя считать достаточно четким, поскольку в таком случае к гибридным следует отнести двух- и трехдуговые способы сварки под флюсом, позволившие решить проблему формирования шва при увеличении скорости в десятки раз и, тем самым, отодвинуть дату появления гибридных технологий на два десятка лет [5].

При многодуговой сварке, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона, каждый из последовательно расположенных источников нагрева выполняет определенную задачу: первый — подготавливает (например, проплавляет кромки), второй — заполняет пространство между кромками (ванну), третий — окончательно формирует шов [6].



За рубежом в 1980-х годах разработаны технологии сварки под флюсом пятью электродами одновременно. Наибольшее применение в промышленности нашли многоэлектродные системы с параллельными электродами, система «постоянный ток — постоянный ток», «постоянный ток — переменный ток», «переменный ток — переменный ток» и система из трех источников переменного тока [7]. Однако эти технологии нельзя назвать гибридными — это комбинированные процессы однородных источников.

Впервые «гибридным» процессом назвали способ сварки совмещенными между собой лазерным лучом и дугой (дуговой плазмой) [8]. Некоторое время только этот процесс считался единственным «гибридным», пока Р. В. Месслер не отнес к гибридным и плазма-МИГ процесс [1]. Принципиальные схемы обоих способов сходны — при плазма-МИГ внутри кольцевой дуги (плазмы) также существует еще один источник нагрева — дуга, горящая с плавящегося электрода. Причем эти совмещенные источники отличаются друг от друга физическими процессами и технологическими свойствами [9].

Следует отметить, что еще раньше, чем был создан способ плазма-МИГ, были разработаны и другие способы сварки двумя разнородными источниками нагрева.

Целью настоящего исследования является уточнение классификации и диапазона комбинированных и гибридных процессов с учетом хронологии их создания. При этом, как и в уже стандартизированной терминологии [3], за основу определения процессов необходимо брать физическую сущность источников энергии (однородных или различных по своей природе), их действие на изделие и взаимодействие между собой, в результате чего и возникает новый эффект. Комбинированными процессами предлагается считать процессы сварки и наплавки, основанные на взаимодействии одинаковых по своей физической природе и технологическим свойствам источников нагрева. Гибридные процессы являются сочетанием двух (а возможно и большего количества) разнородных (с точки зрения физических явлений) источников нагрева, вследствие чего возникает новый технологический эффект.

Ретроспективный анализ показывает, что оба вида процессов появились почти одновременно. В конце 1880-х годов Н. Н. Бенардос предложил комбинированную технологию сварки двумя дугами. Первая гибридная технология заключалась в том, что вокруг дуги, горящей с угольного электрода, горело газовое пламя [10]. Для этой технологии Н. Н. Бенардос спроектировал специальную горелку. Сочетание подогревающего пламени и расплавляющего действия дуги расширило технологические возможности процесса как при

сварке, так и при наплавке. В те же годы Э. Томсон для повышения производительности стыковой контактной сварки применил сопутствующий искровой и дуговой подогрев [11].

Еще один способ Н. Н. Бенардоса — сварка, пайка и наплавка дугами, горящими совместно с плавящимся и неплавящимся электродом, хотя и не подпадает под определение «гибридного», но также решает задачу предварительного подогрева, как и его дугогазовый процесс. В 1930 г. Г. Мюнтер разработал способ, объединивший ацетилено-кислородную сварку с дуговой сваркой плавящимся электродом — способ «аркоген». При этом газовое пламя давало около 60 % теплоты, дуга переменного тока — 40 %. Сила тока была в 2-3 раза меньше, чем при сварке открытой дугой металла такой же толщины, однако напряжение достигало 100 В. Это объясняется тем, что поток газов вызывал усиленную ионизацию столба дуги. Техника такой сварки была сложной, так как сварщик должен был вручную выполнять оба процесса. Способ не составил конкуренции распространенным в то время более простым способам с одним источником нагрева [12].

Приверженцем гибридных процессов был В. П. Никитин. Он отмечал: «В процессе развития сварки плавлением до последних лет неизменной оставалась ее принципиальная сущность: для двух различных тепловых операций (оплавление основного металла и расплавление присадочного) используется единый источник теплоты. Обусловленная этим принципом жесткая, слабо регулируемая связь между тепловой подготовкой основного и присадочного металлов приводит во многих случаях к снижению производительности и качества сварки, ограничивающим ее применение. При однодуговой сварке основой повышения производительности является увеличение мощности дуги. Производительность сварки мощной дугой определяется, главным образом, эффективностью проплавления основного металла, ибо доля электродного металла в шве составляет 20...25 %. Глубокое проплавление затрудняет достижение удовлетворительного качества сварки стали с медью, латуной, бронзой и другими сплавами. Антикоррозионные и антифрикционные свойства сплавов при этом в некоторых случаях ухудшаются. Указанное ограничение в полной мере относится также к наплавке быстрорежущей стали и твердых сплавов на углеродистую сталь при больших мощностях дуги и жесткой связи между тепловой подготовкой основного и присадочного металлов. Концентрация легирующих элементов, обуславливающих свойства наплавленного слоя, уменьшается вследствие перемешивания с основным металлом: состав металла шва в таких случаях отличается от заданного и регулирование его вызывает трудности. Все современные скорост-



ные способы плавки с жесткой связью вообще нерациональны в применении к наплавочным работам. Необходимо развитие самих способов сварки в их энергетической основе» [13, с. 234]. В 1941 г. В. П. Никитин предложил способ раздельного управления тепловложением — совмещение нагрева и плавления дугой с подачей в зону сварки предварительно расплавленного (и перегретого) в печи металла из отдельного тигля. Слаботочный дуговой разряд в этом гибридном процессе был необходим для подготовки поверхности (для катодной очистки и подплавления), поэтому качество наплавки было высоким. Несмотря на высокую производительность аппарата, совместившего дуговую горелку с электротиглем, из-за сложности его применяли ограниченно [14].

Способ дуговой сварки плавлением в среде защитных газов с подачей присадочного металла на кромки свариваемых деталей через полый электрод соосно с дугой в зону ее горения отличается тем, что с целью повышения производительности процесса и расширения диапазона толщин свариваемых деталей присадочный металл через полый электрод подают в зону горения дуги в жидком состоянии, расплавляя его пропуская через высокочастотный индуктор [15]. К идее раздельного формирования ванны (проплавления и заполнения) вернулись в ИЭС им. Е. О. Патона в начале 1960-х годов при разработке технологий плазменно-дуговой сварки. Основным технологическим свойством процесса считали сквозное проплавление. Сварочная ванна с отверстием (процесс получил название «key hole» — эффект) позволяла плазменно-газовому потоку выходить внизу соединения [16]. Однако усиление плазменно-газового напора в целях повышения скорости сварки и увеличения глубины проплавления приводит к ухудшению формирования, появлению подрезов и даже разрезков. Для достижения удовлетворительного формирования шва в ИЭС им. Е. О. Патона предложено заполнять сварочную ванну присадочным металлом, расплавленным в высокочастотном индукторе. Скорость сварки удалось повысить в 4-5 раз. Плазмотрон и индуктор были смонтированы в одной сварочной головке на тележке, тем не менее управлять таким процессом было сложно — значительно различались принципы работы оборудования.

Для решения этой проблемы при высокоскоростной плазменной сварке в конце 1960-х годов было предложено заполнять ванну электродным металлом, расплавленным импульсной дугой с плавящегося электрода. При этом дуга пересекается с плазменно-газовым потоком. При короткой дуге часть проволочного электрода получает дополнительное тепло [17]. В конце 1960-х годов для реализации этого способа требовалось два разных источника тока с единым аппаратом управления, схема которого строилась на электромаг-

нитных реле и была сложной и инерционной. При сварке плазмотроном с циркониевым электродом, запрессованным в медную обойму, в качестве плазмообразующего газа можно было использовать углекислый газ, что позволяет соединять за один проход стальные листы сравнительно большой толщины. Этот процесс (который можно отнести к гибридным) оказался устойчивым при токе плавящегося электрода всего 20...40 А, глубина проплавления при наплавке составила менее 1 мм [18]. К совершенствованию данного процесса и разработке конкретных технологий, основанных на совместном действии в зоне сварки сжатой дуги неплавящегося и плавящегося электрода, в ИЭС им. Е. О. Патона вернулись в 1990-х годах [19]. Исследование процесса, совмещающего плазменную дугу, горящую с неплавящегося электрода, и дугу плавящегося электрода, подаваемого к той же сварочной ванне, проводили на образцах алюминиевых сплавов толщиной 8 мм. В последующие годы поиск рациональных схем построения процессов сварки плавящимся и неплавящимся электродами, точечной плазменно-дуговой сварки продолжался, разрабатывалось также оборудование для их реализации.

Из всех способов сварки ТИГ гелиево-дуговая сварка неплавящимся электродом (ГДС) отличается наибольшей проплавляющей способностью. Для решения проблемы удовлетворительного формирования швов при сварке протяженных швов с изменяющимся зазором разработана технология сварки с сочетанием источников нагрева — ГДС и сварка плавящимся электродом в аргоне [20]. При автоматической сварке стыковых соединений со сквозным проплавлением на весу удаётся оперативно и гибко корректировать параметры режима, обеспечив хорошее качество металла шва при минимальном разупрочнении специальных алюминиевых сплавов.

К началу XXI в. наиболее производительными вариантами дуговой сварки плавящимся электродом в активных газах считались комбинированные способы — с использованием двух последовательно расположенных электродных проволок (тандемной сварки) и ленточного электрода с применением струйной или вращающейся дуги, предпочтительно с импульсным режимом сварки [21].

Технологии на основе плазма-МИГ процесса (за рубежом известен как «Филипс-процесс») применяли для изготовления уникальных конструкций, в том числе ядерных реакторов [22]. В конце 1990-х годов сварку и наплавку плазма-МИГ исследовали в ИЭС им. Е. О. Патона и Приазовском техническом университете. Установлено, что ток протекает не только по электродной проволоке, но и через плазму цилиндрической дуги, окружающей проволоку. Раздельный нагрев поверхности и плавление электрода показали хорошие



результаты при наплавке с порошковой проволокой [23–25]. Наличие плазмы, окружающей плавящийся электрод и дугу, существенно расширяет диапазон токов в электродной проволоке, в котором процесс горения дуги устойчив, увеличивается производительность плавления и уменьшается критический ток перехода к струйному и струйно-вращательному переносу электродного металла [26].

Во Франции разработана технология сварки нержавеющей стали совместным применением плазменной дуги и дуги, горячей с неплавящегося электрода, что обеспечило получение качественного шва при повышенной скорости сварки [27]. Подобная гибридная схема совмещения процессов плазменно-дугового и дугового с плавящимся электродом в одной горелке применена в ИЭС им. Е. О. Патона для точечной сварки [28].

К гибридным процессам можно отнести двухстороннюю сварку встречными источниками нагрева — плазменной (сжатой) дугой и дугой с плавящегося электрода; плазменными дугами и т. п. Этот вид сварки впервые был предложен в ИЭС им. Е. О. Патона в 1966 г. для сварки вертикальных швов [29] и введен в Государственный стандарт Украины под названием «сварка биполярной дугой» [3]. В Департаменте металлургии и материалов College of Science and Technology (Лондон, Великобритания) разработана технология сварки лазером и дугой, размещенными по такой же схеме [30]. В США также была разработана технология сварки в аргоне неплавящимися электродами высокопрочных алюминиевых сплавов двумя противоположно направленными горелками [31]. В конце XX в. «гибридными» начали называть лазерно-дуговые способы сварки и резки. В. Ю. Хаскин отмечает: «Обычно различают гибридный и комбинированный процессы. Первый предполагает подачу сфокусированного лазерного излучения и электрической дуги в одну точку общей ванны, второй характеризуется общим термическим циклом, хотя тепловые источники действуют на изделие в различных геометрических точках» [32, с. 18].

Классифицировать способы, основанные на «общем термическом цикле» при применении двух и более источников энергии, некорректно, поскольку термический цикл не определен в пространстве и времени. Лазерно-дуговые процессы сварки [33–41] отличаются особенностью, которую нельзя объяснить простой суперпозицией свойств используемых источников тепла, взятых по отдельности, — увеличивается коэффициент использования энергии как лазерного, так и дугового источников тепла. Более эффективно использовать в таком гибридном процессе сжатую (плазменную) дугу, совмещая ее с лазерным лучом под углом друг к другу или располагая коаксиально. В ИЭС им. Е. О. Патона на протяжении

последнего десятилетия предложено несколько схем гибридных процессов. Под руководством Б. Е. Патона интенсивно исследуются характеристики и технологические возможности различных сочетаний лазерных, дуговых и других источников плавления, в частности, изучены особенности тепловых процессов, КПД, температурные поля, даны рекомендации по выбору защитных газов и др. [39, 41].

Новым этапом в развитии гибридных плазменно-дуговых технологий сварки явилась разработка «гибра-процесса», основанного на использовании трех и более источников нагрева, имеющих различное физическое происхождение и назначение [42]. К ним относится плазменно-дуговой процесс сварки, предусматривающий применение двух горелок ТИГ с вольфрамовыми электродами и расположенного между ними плазмотрона. Возможны различные варианты воздействия источников на изделие. В Германии фирма «Мюнхенгладбах» для высокоскоростной сварки применила комбинацию трех процессов сварки ТИГ и плазменно-дугового процесса. В одной горелке сконструированы все электроды, сопло плазмотрона с электромагнитной и газовой стабилизацией, сопло защитного газа. Управление процессами синхронизировано. В одной из последних работ [1], посвященных развитию сварки двумя и более различными источниками энергии, отмечается, что это направление является наиболее перспективным. Перспективными являются также гибридные процессы, основанные на совместном действии процессов сварки плавлением и давлением. К одной из основных проблем относят сложность устройств для реализации процессов. Чаще всего оборудование для гибридных способов представляет собой сумму основных узлов каждого из источников нагрева и отдельных или совмещенных источников питания с электронным управлением параметрами режимов.

В последнее десятилетие из многочисленных разновидностей гибридной сварки наиболее интенсивно развивались лазерно-дуговые и лазерно-плазменные процессы сварки. На основании экспериментальных исследований в ИЭС им. Е. О. Патона И. В. Кривцуном создана теория физических явлений, которые происходят при взаимодействии сфокусированного лазерного пучка с плазмой электрической дуги. Установлено, что в этой системе возможно возникновение особого типа газового разряда, свойства которого отличаются как от свойств обычной дуги, так и от свойств оптического луча. Разработаны математические модели такого разряда в лазерно-дуговых плазмотронах. Внедрение показало определенные преимущества [43–45].

1. *Messler R. V.* What's next for hybrid welding? // *Welding J.* — 2004. — № 3. — P. 30–34.
2. *Essers W. G.* Plasma-MIG lassen van aluminium // *Lastechnik.* — 1980. — № 8. — S. 187–193.
3. *Зварювання та споріднені процеси.* Терміни та визначення. — К.: Держстандарт, 1999. — 53 с.
4. *Проخورов А. М.* Гибрид // БСЭ. — 3-е изд. — 1971. — Т. 6. — С. 453.
5. *Патон Б. Е.* Достижения и задачи в области сварки под флюсом // *Автомат. сварка.* — 1952. — № 5. — С. 18–29.
6. *О выборе* схемы производства сварных прямошовных труб большого диаметра / Б. Е. Патон, С. Л. Мандельберг, Р. И. Лашкевич, В. П. Марков // *Там же.* — 1960. — № 7. — С. 3–14.
7. *Uttrachi G. D.* Multiple electrode systems for submerged arc welding. — Pt 1 // *Can. Weld. and Fabr.* — 1983. — № 8.
8. *Walduck R. P., Biffin J.* Plasma arc augmented laser welding // *Weld. and Metal Fabr.* — 1994. — № 4. — P. 172–176.
9. *Plasma-MIG.* En ny interessant svetsmetod // *Verkstadsinformation.* — 1972. — № 12. — P. 365–367.
10. *Бенардос Н. Н.* Научно-технические изобретения и проекты. — Киев: Наук. думка, 1982. — 239 с.
11. *Thomson E.* Electric welding // *J. Franklin Inst.* — 1887. — **123**, № 737. — P. 245–247.
12. *Munter H.* Der Einfluss von Schweiss und Schutzgas flammen auf die Vorgänge im Schweißlichtbogen // *Elektroschweißung.* — 1933. — № 7. — S. 80–84.
13. *Никитин В. П.* Изыскания новых способов повышения производительности и качества сварки, основанных на принципе раздельного регулирования // *Проблемы дуговой и контактной электросварки.* — Киев: Машгиз, 1956. — С. 234–235.
14. *Никитин В. П.* Метод сварки металлов с раздельными процессами плавления // *Докл. АН СССР.* — 1947. — **LVI**, № 5. — С. 45–57.
15. *А. с. 501850 СССР, В 23 К 9/16.* Способ дуговой сварки плавлением в среде защитных газов / В. К. Лебедев, Д. А. Дудко, Н. Ф. Медведенко, А. Н. Корниенко, А. С. Мостовой. — Заявл. 14.08.72. — Оpubл. 05.02.70, Бюл. № 5.
16. *Дудко Д. А., Лакиза С. П.* О новых возможностях сварки высокотемпературной дугой, сжатой газовым потоком // *Автомат. сварка.* — 1960. — № 11. — С. 38–46.
17. *А. с. 294422 СССР, МКИ В 23 К 17/00.* Способ плазменно-дуговой сварки / Д. А. Дудко, А. Н. Корниенко, Э. М. Эсбиян. — 1970. — Бюл. № 15.
18. *Вайнбойм Д. И., Брехун Н. Н., Ратманова Ж. В.* Автоматическая тонкослойная наплавка стали комбинированным способом (неплавящимся и плавящимся электродом) в углекислом газе // *Свароч. пр-во.* — 1976. — № 8.
19. *Каука В. И., Рабкин Д. М.* Комбинированный процесс аргоно-дуговой сварки алюминия неплавящимся и плавящимся электродами // *Автомат. сварка.* — 1984. — № 5. — С. 72–73.
20. *Особенности* технологии сварки крупногабаритных конструкций из термоупрочненного алюминиевого сплава 1201 // В. М. Петрованов, В. И. Бобринский, Ф. Э. Тэнэбаум и др. // Сб. докл. Всесоюз. конф. «Актуальные проблемы сварки цветных металлов». — Киев: Наук. думка, 1985. — С. 85–89.
21. *Miklos E.* Aktuelle Prozessvarianten des MAS-HL-schweisens // *Aachen Shaker.* — 2001. — № 1. — S. 389–405.
22. *Areskonq M., Smarst E.* Application of the gas-metal — plasma-arc process for weld cladding in nuclear — manufacturing // *Weld. and Metal Fabr.* — 1976. — № 4. — P. 274.
23. *Макаренко Н. А.* Плазменная наплавка с аксиальной подачей порошковой проволоки // *Автомат. сварка.* — 1998. — № 12. — С. 52–53.
24. *Корниенко А. Н., Макаренко Н. А., Грановский А. В.* Исследование стабилизирующих свойств шихты порошковой проволоки галогенного типа для плазма-МИГ процессов // Тр. Международ. конф. «Сварочные материалы». — 18–28 июня 2001, Орел. — С. 74–75.
25. *Пат. 48383 В23 К 9/16 Украина.* Установка для плазменного зварювання і наплавлення / В. В. Чигарьов, О. М. Корниенко, Н. О. Макаренко та ін. — Заявл. 28.05.01; Оpubл. 15.08.02. — Бюл. № 8.
26. *Боженко Б. Л., Ронский В. Л.* Технология плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом в аргоне // *Свароч. пр-во.* — 1984. — № 6. — С. 17–18.
27. *En visite a la soudure autogene francaise* // *Souder.* — 1984. — № 3. — S. 76–78.
28. *Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Мищенко В. А.* Комбинированный процесс точечной плазменно-дуговой сварки // *Сварщик.* — 2004. — № 4. — С. 26–27.
29. *А. с. 237568 СССР, МКИ В23К 35/02.* Способ плазменной сварки и резки металлов / Д. А. Дудко, А. Н. Корниенко, Ф. М. Виноградский. — Заявл. 17.06.67. — Оpubл. 19.04.68, Бюл. № 8.
30. *Steen W. M., Eboo M.* Arc augmented laser welding // *Metal Construction.* — 1979. — № 7. — P. 332–335.
31. *Zhang Y. M., Zhang S. B.* Welding aluminium alloy 6061 with the opposing dual-torch GTAW process // *Welding J.* — 1999. — № 6. — P. 202–206.
32. *Хаскин В. Ю.* Комбинированные лазерно-дуговые процессы // *Сварщик.* — 2003. — № 3. — С. 18–19.
33. *Пат. 1547172 Великобритания, МКИ В 23 К 26/00.* Methods and apparatus for cutting, welding, drilling and surface treating / W. M. Steen. — Оpubл. 06.06.79.
34. *Diebold T. P., Albright C. E.* «Laser-GTA» welding of aluminum alloy 5052 // *Welding J.* — 1984. — **63**, № 6. — P. 18–24.
35. *Особенности* нагрева металла при лазерно-дуговой сварке / С. Г. Горный, В. А. Лопота, В. Д. Редозубов и др. // *Автомат. сварка.* — 1989. — № 1. — С. 73–74.
36. *Walduck R. P., Biffin J.* Plasma arc augmented laser welding // *Weld. and Metal Fabr.* — 1994. — **62**, № 4. — P. 172–176.
37. *Патон Б. Е.* Совершенствование способов сварки — один из путей повышения качества и экономичности сварных конструкций // *Автомат. сварка.* — 1995. — № 11. — С. 3–11.
38. *Кривцун И. В., Чиженко М. И.* Основы расчета лазерно-дуговых плазмотронов // *Там же.* — 1997. — № 1. — С. 16–23.
39. *Гибридная* лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, И. В. Кривцун и др. // *Там же.* — 2002. — № 3. — С. 5–9.
40. *Гибридная* лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин и др. // *Там же.* — 2007. — № 5. — С. 49–53.
41. *Патон Б. Е.* Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // *Там же.* — 2003. — № 10/11. — С. 7–13.
42. *Технологии* сварки и соединений в XXI веке // *J. (Jap.) Weld. Soc.* — 2001. — **70**, № 3. — P. 6–11.
43. *Гвоздецкий В. С., Кривцун И. В., Чиженко М. И.* Взаимодействие лазерного пучка с плазмой электрической дуги // *Материалы VIII Всесоюз. конф. по физике низкотемпературной плазмы.* — Минск, 1991. — Ч. III. — С. 31–32.
44. *Воропай Н. М., Илюшенко В. М., Хаскин В. Ю.* Выбор защитного газа для гибридного процесса лазерно-дуговой сварки // *Сварщик.* — 2006. — № 4. — С. 20–22.
45. *Гибридная* лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин и др. // *Автомат. сварка.* — 2007. — № 5. — С. 49–53.

The history of development of the technologies based on the interrelated simultaneous action of two heat energy sources is considered. It is suggested that the combined and hybrid processes should be discriminated. The combined processes are characterised by operation of several identical sources, whereas with the hybrid processes a combination of the sources differing in their physical characteristics results in a process with new operational properties.