



## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ (Обзор)

В. Д. ШЕЛЯГИН, В. Ю. ХАСКИН, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Отражены динамика и тематическая направленность научных публикаций о гибридных и комбинированных лазерно-дуговых процессах и способах их создания на основе современных перспективных сварочных технологий. Проведено сравнение лазерно-дуговой сварки с лазерной. Обоснован выбор направлений дальнейших исследований.

*Ключевые слова:* лазерно-дуговая сварка, тенденции развития, схемы процесса, сравнение режимов, достоинства, область внедрения

Лазерно-дуговые способы сварки были разработаны во второй половине 1970-х гг. в Англии [1]. Исследования в этой области проводили специалисты многих научно-исследовательских институтов [2–20], в том числе ИЭС им. Е. О. Патона [18]. Материалы, изложенные в работах [21, 22], дают представление о физических процессах, происходящих во время сварки указанными способами, и содержат ряд экспериментальных данных, на которых базировались авторы при попытке произвести оценку перспектив дальнейшего технологического развития комбинированных лазерно-дуговых процессов и выбор направлений собственных исследований.

В литературе встречаются термины «гибридный» и «комбинированный» способы сварки. В дальнейшем под понятием гибридный будем подразумевать такой способ сварки, при котором лазерное излучение и электрическая дуга действуют совместно на одну точку и физическая сущность такого действия отличается от действия каждой из составляющих. Под понятием комбинированный будем понимать способ сварки, при котором лазерное излучение и дуга создают единый термический цикл процесса, однако физическая сущность действия каждой из составляющих остается неизменной.

Нами было проанализировано 92 публикации, касающиеся лазерно-дуговой сварки и родственных процессов (рис. 1 и 2). Если их распределить в хронологическом порядке (рис. 1), то вырисовывается следующая картина. С 1978 по 1981 гг. исследования проводили ученые научной школы профессора Стинга [1–5]. После того как их результаты стали достоянием мировой научной общности, их подвергли критическому изучению. Возможно, этим объясняется отсутствие публикаций в 1982 г. Затем наблюдается повышенный интерес к исследованиям в данной области (см. пики в 1983–1986 и 1988–1991 гг. на рис. 1). После непродолжительной паузы в 1992–1993 гг. происходит постепенный подъем. Если в ближайшие год-два такой рост количества исследовательских работ сохранится, то можно будет говорить

о тенденции дальнейшего развития лазерно-дуговых технологий.

Согласно [21, 22], можно выделить пять основных направлений исследований: сварка тонколистовых металлов; сварка толстолистовых металлов; наплавка и термообработка; физические исследования; прочие (оригинальные оборудование и технологии сварки, резки и т. д.). Сгруппировав работы по направлениям и расположив их в хронологическом порядке, получим картину, показанную на рис. 2. Со времени появления лазерно-дуговых способов по 1985 г. наблюдалось доминирование экспериментальных исследований и рост интереса к патентованию всевозможных способов обработки и конструкций для их реализации. Затем, очевидно, после накопления достаточного фактического материала (1988–1991 гг.) произошла интенсификация исследований в области физики процесса. На этом фоне с 1978 по 1990 гг. вопросы сварки толсто- и тонколистовых металлов исследовались достаточно планомерно. Начиная с 1994 г. и по настоящее время установился паритет во всех направлениях научных исследований в указанной области. Это свидетельствует о системном подходе к решению возникающих проблем, а также о расширении круга исследований. Такая стабильность работ тематической направленности позволяет надеяться на то, что гибридные и комбинированные способы займут такое же место в науке и технике, как и их составляющие (лазерные и дуговые технологии). Отметим, что при относительно стабильном интересе исследователей к сварке тонко- и толстолистовых металлов, все же

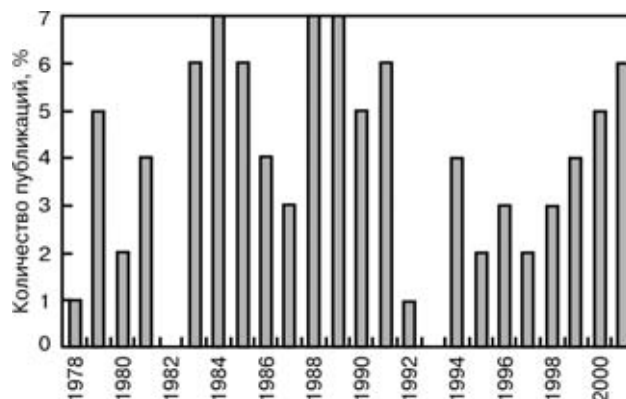


Рис. 1. Хронология интенсивности исследований лазерно-дуговых способов обработки материалов

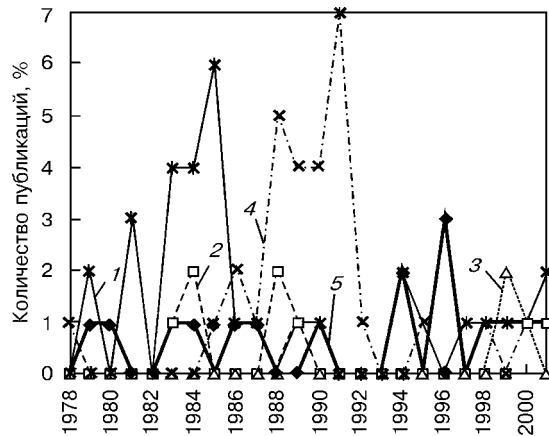


Рис. 2. Хронология тематических направлений исследований: 1 – сварка соответственно тонко- и толстолистовых металлов; 2 – наплавка и термообработка; 3 – физические исследования; 4 – физические исследования; 5 – прочие направления (например, разработка оригинального оборудования, технологии сварки, резки и пр.)

в 1984 и 1988 гг. акцент делался на сварку толстолистовых металлов, а в 1994 и 1996 гг. – на сварку тонколистовых.

На основании анализа работ [1–22] можно отметить следующее. Так называемый синергетический эффект [6] от совместного использования лазерного излучения и электрической дуги (эффект нарушения аддитивности теплового воздействия на изделие лазерного пучка и дуговой плазмы) вызван переходом от теплопроводностного режима сварки к режиму кинжального (глубокого) проплавления. При использовании сравнительно маломощных лазерного и дугового источников в отдельности определено, что ни у одного из них не хватает плотности мощности для достижения сквозного проплавления металла (обычно тонколистового). В случае их комбинации дуга, согласно механизму, описанному в работе [17], «привязывается» и к месту действия лазерного излучения на изделие (анод). Дуга сжимается в пределах факела лазерной плазмы, при этом эффект блуждания анодного пятна устраняется [1–3]. Благодаря дополнительному энергокладу дуги, застabilизированной лазерным излучением, а также увеличению поглощательной способности перегретого металла режим проплавления от теплопроводностного переходит к кинжальному. При этом возникает характерный для лазерной сварки пародинамический канал, в который, следуя за лазерным излучением и образуемой им из паров металла плазмой, опускается анодная область столба сжатой дуги. Как только преодолевается порог между теплопроводностным и кинжальными режимами проплавления, объем переплавленного металла резко возрастает, что позволяет увеличить глубину провара или скорость сварки в 1,5... 2,0 раза [12].

Преимуществом способа гибридной лазерно-дуговой сварки является переход к режиму глубокого проплавления. Поэтому использование этого способа оправдывает себя при сварке тонколистовых металлов [2, 8, 9–12], когда требуются сравнительно малые лазерные мощности (до 1,0... 1,5 кВт для CO<sub>2</sub>-лазера или 300... 1000 Вт для ИАГ:Nd-лазера) и дуга мощностью около 1 кВт, способная оказать воздей-

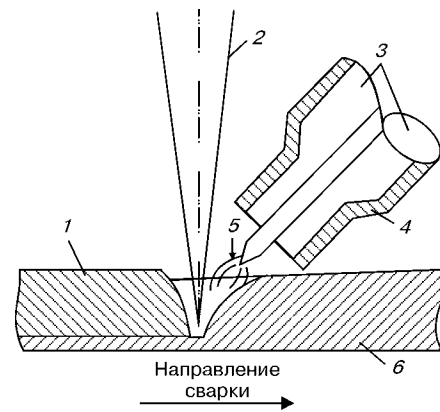


Рис. 3. Схема процесса лазерно-дуговой сварки при использовании дуги с неплавящимся электродом [10]: 1 – шов; 2 – лазерный пучок; 3 – неплавящийся электрод; 4 – сопло; 5 – дуга; 6 – изделие

ствие, эквивалентное увеличению мощности лазерного излучения на 1 кВт. Важным моментом также является применение малых и средних токов дуги. При токах более 300 А эффект «привязки» анодной области дугового разряда к пятну лазерного нагрева в приведенной публикации не зафиксирован [2]. Схема такой гибридной сварки аналогична показанной на рис. 3.

При сварке металла большой толщины возможно применение разнообразных технологических приемов. Одним из способов может быть лазерно-дуговая сварка с использованием дуги, горячей на плавящемся электроде (рис. 4). Разделка шва выполняется таким образом, чтобы с помощью лазерного излучения производилась заварка корневого шва и заполнение разделки металлом плавящегося электрода [10, 20]. При этом, варьируя расстояние  $a$  между зонами действия лазерного излучения и дуги, можно подобрать такой общий сварочный термический цикл, при котором устраняются негативные последствия лазерной сварки. Так, например, при стыковой сварке листов стали толщиной 20 мм с V-образной разделкой кромок подобрали термический сварочный цикл, при котором происходила нормализация корневого шва,

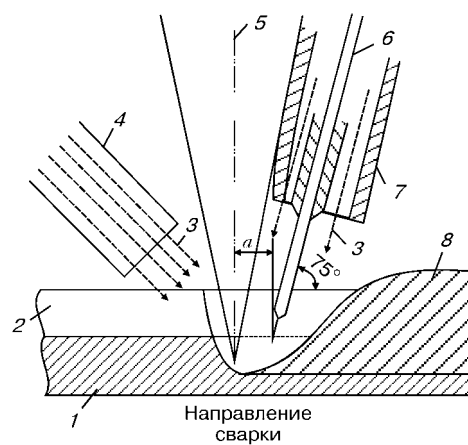


Рис. 4. Схема процесса лазерно-дуговой сварки с использованием дуги, горячей на плавящемся электроде [10]: 1 – изделие; 2 – разделка; 3 – защитный газ; 4 и 7 – сопла; 5 – лазерный пучок; 6 – электродная проволока; 8 – шов;  $a$  – расстояние между источниками тепла

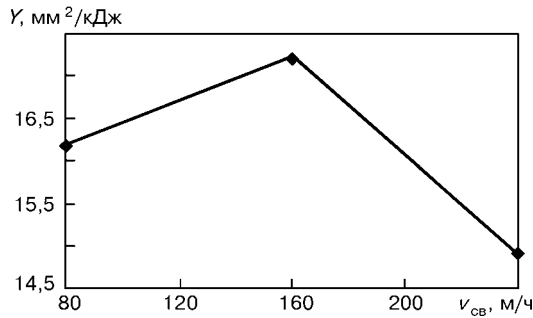


Рис. 5. Зависимость темпа сварки  $Y$  алюминиевого сплава 5052 от скорости сварки  $v_{св}$  по схеме рис. 3 при комбинации сварочных источников малой мощности (мощность лазерного излучения 600 Вт,  $I_d = 30...70$  А) [11]

а распределение твердости между основным металлом и металлом шва было однородным. При этом использовали следующий режим сварки: мощность лазера — 6,3 кВт; мощность дуги — 18,55 кВт; скорость сварки — 0,6 м/мин; расстояние между лазерным и дуговым источниками — 30 мм [7].

Проанализируем режимы гибридной и комбинированной сварки с целью определения оптимальных параметров, таких, при которых с минимальными затратами энергии достигается максимальная площадь переплавленного металла (наибольшая глубина проплавления на данной скорости). Для этого воспользуемся комплексной величиной — темпом сварки [23]. Она представляет собой произведение глубины провара  $h$  (мм) и скорости сварки  $v_{св}$  (мм/с), отнесенное к мощности сварочного источника. В нашем случае темп сварки  $Y$  можно записать как

$$hv_{св}/(P_l + P_a) \text{ [мм}^2/\text{кДж]},$$

где  $P_l$  — мощность лазерного излучения, кВт;  $P_a$  — мощность дуги, кВт. По результатам работ [10, 11, 20] были вычислены значения темпа гибридной и комбинированной сварки для различных скоростей ведения процесса и построены графические зависимости, представленные на рис. 5–7.

Из-за различия свариваемых материалов данные, представленные на рис. 5 и 6, не подлежат сравнению. По ним нельзя сделать заключение об эффективности применения сварочных источников большой и малой мощности. Однако поскольку, согласно работам [2, 3], эффект привязки анодного пятна дуги на изделие наблюдается при токах до 300 А, то в случаях, показанных на

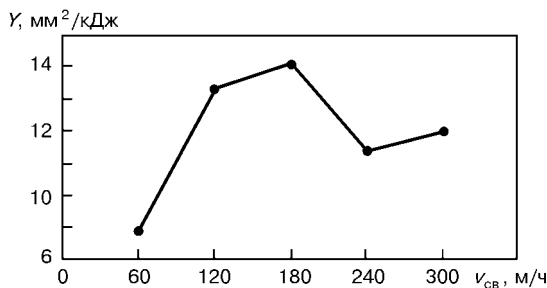


Рис. 6. Зависимость темпа сварки углеродистой конструкционной стали от скорости сварки по схеме рис. 3 при комбинации сварочных источников большой мощности (мощность лазерного излучения 1...5 кВт,  $I_d = 100...300$  А) [10]

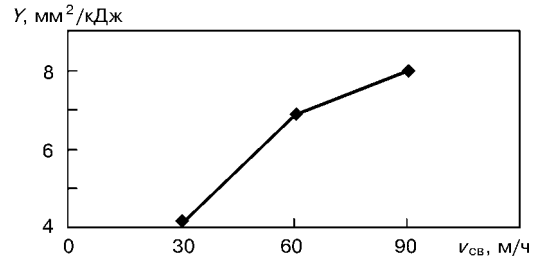


Рис. 7. Зависимость темпа сварки стали от скорости сварки по схеме рис. 4 (мощность лазерного излучения 3,0...5,7 кВт,  $I_d = 350...370$  А) [20]

рис. 5 и 6, имеет место гибридный лазерно-дуговой процесс. Отсюда можно сделать вывод, что для предварительного подогрева металла дугой с неплавящимся электродом и последующего совместного действия дуги и лазерного излучения оптимальные значения темпа сварки достигаются при  $v_{св} = 160...180$  м/ч. Из рис. 6 и 7 видно, что при одинаковых скоростях сварки применение упомянутых технологических схем (см. рис. 3 и 4) имеет близкую эффективность. Однако для определения оптимальной скорости сварки по схеме рис. 4 (рис. 7) имеющихся данных недостаточно.

Для сравнения по данным работы [10] построена кривая зависимости темпа лазерной сварки от ее скорости (рис. 8). Из рисунка видно, что скорость сварки 180 м/ч является оптимальной для ведения такого процесса, а  $Y = 25$  мм<sup>2</sup>/кДж, что выше значений аналогичной величины при гибридном процессе (рис. 6). Сравнение двух способов сварки (рис. 6 и 8) свидетельствует о том, что для получения равной площади переплавленного металла шва (аналогичной глубины проплавления) при лазерной сварке требуются меньшие энергетические затраты, чем при гибридном способе. Таким образом, лазерная сварка предпочтительнее лазерно-дуговой.

Интересен вопрос о влиянии дуговой плазмы на лазерное излучение. В ходе проведенных нами исследований сварки излучением СО<sub>2</sub>-лазера, комбинированным с дугой неплавящегося вольфрамового электрода, наблюдалось проявление известного эффекта — экранирование лазерного излучения аргоновой плазмой. Он был устранен при замене плазмообразующего газа на гелий. Возможно, по той же причине для ведения комбинированного процесса использовали гелий [10]. В работах [1–5] при сварке на вольфрамовый электрод подавали аргон, а зону действия лазерного излучения защищали гелием. В работе [16] исследовали экранирование лазерного излучения с

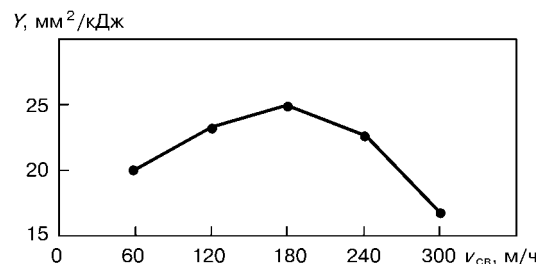


Рис. 8. Зависимость темпа сварки от скорости лазерной сварки углеродистой конструкционной стали при мощности лазерного излучения 5 кВт [10]

различной длиной волны плазмой столба аргоновой дуги различной мощности. Было доказано, что с уменьшением длины волны эффект экранирования снижается. Отсюда напрашивается вывод о целесообразности применения излучения ИАГ:Nd-лазера для сварки по схеме рис. 3. В качестве примера в работе [13] рассмотрено соединение листов алюминиевых сплавов толщиной около 3 мм ИАГ:Nd-лазером мощностью 360 Вт совместно с дуговой сваркой неплавящимся электродом на токе 50 А. В то же время для сварки по схеме рис. 4 желателно применять мощный CO<sub>2</sub>-лазер [7, 10, 20]. При этом представляют интерес результаты исследований, в ходе которых в качестве защитного газа вместо аргона и гелия применяли углекислый газ.

Авторами работ [19, 21, 22] было предложено применить дополнительное фокусирование лазерного излучения в плазме гибридного разряда при использовании специальных лазерно-дуговых плазмотронов, а также управление плазменной линзой, что должно способствовать повышению эффективности процессов сварки, резки, термообработки и нанесения покрытий. Однако все отмеченное выше нуждается в тщательной экспериментальной проверке, поскольку известные до сих пор эффекты перефокусирования лазерного излучения экранирующей плазмой приводят к ухудшению условий фокусирования [24].

В настоящее время лазерная сварка тонколистовых металлов используется (например, при изготовлении заготовок для штамповки кузовных элементов автомобилей), не только для повышения производительности, но и для получения качественного узкого шва с минимальной ЗТВ. Как показано в некоторых работах (например [15]), при гибридной и комбинированной сварке получаемые швы уже, чем при дуговой сварке, но шире, чем при лазерной. При этом их ЗТВ больше, чем в случае лазерной сварки. Небольшое «провисание» лазерных швов, о котором упоминается в этих работах, может быть устранено за счет подбора режимов сварки [25]. Скоростные преимущества гибридных способов сварки [14] весьма относительны, так как наращивание мощности излучения при лазерной сварке способствует линейному повышению скорости, а наращивание мощности лазера и дуги при лазерно-дуговой сварке может привести к прекращению устойчивости эффекта контрагирования анодной области дуги и, как следствие, к потере роста глубины провара [10, 11] или ухудшению качества реза при гибридной резке [3]. Поэтому вытеснение лазерной сварки комбинированными технологиями, о которой шла речь в работе [14], маловероятно.

## Выводы

1. Для скоростной сварки тонких листов из различных металлических материалов целесообразно применять комбинацию излучения ИАГ:Nd-лазера с дугой неплавящегося электрода. В таком случае нет необходимости использовать мощные лазерные установки и гелий в качестве защитного газа. При

этом возможно получение металла шва с требуемой структурой и улучшение дегазации сварочной ванны.

2. При сварке тонких листов из различных металлов толстостенных изделий возможно использование различных технологических приемов. Одним из них является промышленная технология, при которой корневой шов заваривается излучением CO<sub>2</sub>-лазера с одновременной заваркой разделки дугой плавящегося электрода. С помощью изменения оптимальных параметров термического цикла, регулируемых совместным действием лазерного излучения и дуги, возможно повышение пластичности швов и снижение порообразования.

3. Качество швов, получаемых гибридной лазерно-дуговой сваркой, в отдельных случаях приближается к качеству швов, выполненных лазерной сваркой при меньшей себестоимости одного погонного метра по капитальным вложениям в оборудование (например, при переходе совместно действующих тепловых источников в режим глубокого проплавления, когда дуга мощностью около 1 кВт способна оказать воздействие, эквивалентное увеличению мощности лазерного излучения на 1 кВт). Этот момент интересен для внедрения лазерно-дуговой сварки в странах, экономика которых находится на переходном этапе, в том числе в Украине и других странах СНГ, в виду отсутствия дорогостоящих мощных лазерных установок.

4. На основании имеющихся публикаций можно заключить, что при сочетании комбинацией лазерного излучения с дугой неплавящегося электрода оптимальным является такой режим, при котором на скорости 160... 180 м/ч достигается максимальная глубина провара при затратах энергии, соответствующих диапазону темпа сварки 17... 20 мм<sup>2</sup>/кДж. Для анализа технологических режимов комбинированной сварки с дугой плавящегося электрода данных недостаточно.

5. Динамика и тематическая направленность существующих научных публикаций позволяет ожидать дальнейшего развития исследований гибридных и комбинированных лазерно-дуговых процессов и создания на их основе современных перспективных технологий.

1. Eboo M., Steen W. M., Clarke J. Arc augmented laser welding // Advances in welding processes: Proc. of the 4th Intern. conf., England, Harrogate, 1978. — Harrogate, 1978. — Vol. 1. — P. 257-265.
2. Steen W. M., Eboo M. Arc augmented laser welding // Metal Construction. — 1979. — 11, № 7. — P. 332-335.
3. Steen W. M. Arc augmented laser processing of materials // J. of Appl. Phys. — 1980. — 51, № 11. — P. 5636-5641.
4. Alexander J., Steen W. M. Penetration studies on arc augmented laser welding // Proc. of Intern. conf. of Welding Research, Osaka, 1980. — Osaka, 1980. — P. 121-129.
5. Mazumder J., Steen W. M. Laser welding of steels in can making // Welding J. — 1981. — 60, № 6. — P. 19-25.
6. Tusek J. Sinergic operation of welding arc and laser beam — for practical application or for scientific research only? // Varilna tehnika. — 1996. — 45, № 2. — P. 39-46.
7. Diltney U., Wieschemann A. Prospects by combining and coupling laser beam and arc welding processes // Rivista Italiana della Saldatura. — 2000. — 52, № 6. — P. 749-759.
8. Merard R., Luciani P. Y. Soudure par faisceau laser a CO<sub>2</sub> de faible puissance, associe a une source auxiliaire de chauffage // Proc. of 3th Kolloq. Intern. Soudage et Fusion Fa-

- isceau Electrons et Laser. — Lyon, 1983. — Lyon, 1983. — P. 561–568.
9. *Luciani P. Y., Charissoux C., Calret J. N.* CO<sub>2</sub>-laser auxiliary source coupling: application to welding // Proc. of the 3th Intern. conf. lasers manuf. — Paris, 1986. — Paris, 1986. — P. 117–123.
  10. *TIG or MIG arc augmented laser welding of thick mild steel plate* / J. Matsuda, A. Utsumi, M. Katsumura et al. // *Joining and Materials*. — 1988. — 1, № 1. — P. 31–34.
  11. *Diebold T. P., Albright C. E.* «Laser-GTA» welding of aluminum alloy 5052 // *Welding J.* — 1984. — 63, № 6. — P. 18–24.
  12. *Arc-augmented laser welding of aluminium*. Final Rept. — New-York: Welding Research Council, 1987. — 16 p.
  13. *Nakata K., Kurosawa T., Yoshikawa M.* Sumitomo jukikai giho // *Techn. Rev.* — 1996. — 44, № 131. — P. 25–28.
  14. *Irving B.* Automotive engineers plunge into tomorrow's joining problems // *Welding J.* — 1994. — 73, № 11. — P. 47–50.
  15. *Staufner H., Hackl H.* Laser-hybrid welding — a powerful joining technology // Proc. of the 7th Intern. Aachener Schweisstechnik Kolloq. «Hochleistungsfugeverfahren Grundlagen, Anwendungen, Ausrüstungen», Germany, Aachen, 2001. — Vol. 1. — Aachen, 2001. — S. 477–488.
  16. *Бубик О. Б., Бродягин В. Н., Покладов Ю. П.* Особенности взаимодействия лазерного излучения и электрической сварочной дуги применительно к процессу комбинированной лазерно-дуговой сварки // *Физика и химия обраб. материалов*. — 1990. — № 2. — С. 95–98.
  17. *Research of a new welding technique — double heat source laser-arc* / J. R. Zhao, S. B. Zhang, D. Sun et al. — S. l., [1990]. — 39 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-A-35–82).
  18. *Лазерно-дуговой разряд в канале* / В. С. Гвоздецкий, И. В. Кривцун, А. А. Свиригун и др. — Киев, 1989. — 30 с. — (Препр. / АН УССР ИЭС им. Е. О. Патона; 89–6).
  19. *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, июль 1991 г.). — Минск, 1991. — Ч. III. — С. 31–32.
  20. *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 Research Supplement*. — 2001. — July. — P. 163–172.
  21. *Коваленко В. С., Кривцун И. В.* Комбіновані лазерно-дугові процеси обробки матеріалів (I) // *Наук. вісті НТТУ «КПІ»*. — 2001. — № 5. — С. 33–44.
  22. *Коваленко В. С., Кривцун И. В.* Комбіновані лазерно-дугові процеси обробки матеріалів (II) // Там же. — № 6. — С. 35–47.
  23. *Mallorg Louise C.* Deep penetration laser welding // *Can. Mach and Metalwork*. — 1988. — 83, № 12. — P. 14–15.
  24. *Григорьянц А. Г.* Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
  25. *Nishimoto K., Woo I., Ogita T., Shirai M.* The factors affecting HAZ crack susceptibility in the laser weld // *Quarterly Journal of JWS*. — 2001. — 19, № 2. — P. 308–316.

Dynamics and subject-oriented nature of scientific publications on hybrid (combined) laser-arc processes and methods to develop them, based on current promising welding technologies, are described. Comparison of laser-arc and laser welding is made. Selection of the area of further research is substantiated.

Поступила в редакцию 04.12.2001,  
в окончательном варианте 14.12.2001

**Приглашаем принять участие во Всероссийской с международным участием конференции**

## **«Сварка на рубеже веков»,**

**посвященной 100-летию со дня рождения Г. А. Николаева  
20–21 января 2003 г., Москва**

### **Организаторы конференции:**

*Министерство образования РФ, Министерство промышленности, науки технологий РФ, Российская академия наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ИЭС им. Е. О. Патона*

### **Тематика конференции:**

- *сварные конструкции*
- *оборудование и технология сварки*
- *диагностика и контроль качества сварных изделий*
- *подготовка и аттестация персонала*

### **Оргкомитет конференции:**

*президент — Б. Е. Патон, академик, президент НАН Украины;  
председатель — И. Б. Федоров, ректор МГТУ им. Н. Э. Баумана;  
ответственный секретарь — А. В. Коновалов*

*Адрес: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, МГТУ им. Н. Э. Баумана.  
Тел./факс: (095) 261 4257, тел.: (095) 263 6802, (095) 263 6742  
E-mail: avk@bmstu.ru*