

*colloquium-journal*

*ISSN 2520-6990*

*Międzynarodowe czasopismo naukowe*

**Earth sciences  
Technical science**

**№17(41) 2019**

**Część 1**



**colloquium-journal**

ISSN 2520-6990

Colloquium-journal №17 (41), 2019

Część 1

(Warszawa, Polska)

Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce. W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku angielskim, polskim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 20 każdego miesiąca.

Częstotliwość: 12 wydań rocznie.

Format - A4, kolorowy druk

Wszystkie artykuły są recenzowane

Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny egzemplarz czasopisma.

Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej dziennika.

Wysyłając artykuł do redakcji, Autor potwierdza jego wyjątkowość i bierze na siebie pełną odpowiedzialność za ewentualne konsekwencje za naruszenie praw autorskich

Zespół redakcyjny

Redaktor naczelny - **Paweł Nowak**  
**Ewa Kowalczyk**

Rada naukowa

- **Dorota Dobija** Profesor i rachunkowości i zarządzania na uniwersytecie Koźmińskiego, dyrektor programu k. e. n.
- **Jemielniak Dariusz** - prof. dyrektor centrum naukowo-badawczego w zakresie organizacji i miejsc pracy, kierownik katedry zarządzania Międzynarodowego w Ku.
- **Henryka Danuta Stryczewska** - prof. dziekan Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.
- **Mateusz Jabłoński** - Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki.
- **Henryka Danuta Stryczewska** - prof. , dziekan Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej i prof. Zbigniew Grądzki, prorektor ds. Nauki.
- **Sani Lukács** — eötvösa Loránd University, Faculty of Social Sciences, phd in sociology7
- **Király Tamás** — Szegedi Tudományegyetem, gyógyszerésztudományi Kar, phd gyógyszertár9
- **Gazstav Lewandowski** — węgierski uniwersytet sztuk pięknych, Graficzny wydział / Specjalizacja w dziedzinie projektowania graficznego.
- **Bulakh Iryna Valerievna** - k.arh., Profesor nadzwyczajny w Katedrze Projektowania Środowiska Architektonicznego, Kijowski Narodowy Uniwersytet Budownictwa i Architektury



« Colloquium-journal »

Wydrukowano w « Chocimska 24, 00-001 Warszawa, Poland »

E-mail: [info@colloquium-journal.org](mailto:info@colloquium-journal.org)

<http://www.colloquium-journal.org/>

# CONTENTS

## EARTH SCIENCES

**Гресь Р.А.**

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АТТРАКТИВНОСТИ ПРОСТРАНСТВ РЕТРОСПЕКТИВНОЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ МОСКВЫ И САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ..... 4

**Gres R.A.**

RETROSPECTIVE AUGMENTED REALITY SPACES OF MOSCOW AND SAINT PETERSBURG: COMPARATIVE EVALUATION OF THE ATTRACTIVITY ..... 4

**Казачкова Ю.С.**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ERA5 ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ..... 7

**Kazachkova Y.S.**

SPATIAL ASSESSMENT OF WIND FLOW POTENTIAL BASED ON ERA5 IMPLEMENTATION DATA ..... 7

**Ефремова Е.А., Ефимова Ю.В., Мханна А.И.Н.**

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕСЕННИХ ПОЛОВОДЬЕВ НА РЕКЕ ЕМЦА ..... 14

**Efremova E.A., Efimova Y.V., Mkhanna A.I.N.**

ANALYSIS OF SPRING FLOOD FORMATION CONDITIONS ON THE RIVER EMTSA ..... 14

**Коржова Л.В., Хафизова Р.Р.**

АНАЛИЗ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ОБЪЕКТЕ ..... 18

**Korzhova L.V., Khafizova R.R.**

ANALYSIS OF THE AIR ENVIRONMENT OF AN OIL PRODUCTION FACILITY ..... 18

**Онякова А.М.**

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ ..... 26

**Onyakova A.M.**

STATE AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE ARKHANGELSK REGION'S MINERAL RESOURCES ..... 26

**Холматов Ш.Р., Сарафанов М.И.**

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ВОДЫ ВО ВРЕМЯ ПОЛОВОДЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ «NASA GLOBAL LAND DATA ASSIMILATION SYSTEM» НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ПЕЧОРА ..... 29

**Holmatov Sh.R., Sarafanov M. I.**

PREDICTION OF THE LEVEL OF WATER IN FLOOD USING DATA FROM THE «NASA GLOBAL LAND DATA ASSIMILATION SYSTEM» ON THE PECHORA RIVER ..... 29

## TECHNICAL SCIENCE

**Селютин А.Д.**

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ МОЗГОВЫХ ОПУХОЛЕЙ НА СНИМКАХ МРТ ..... 33

**Selyutin A.D.**

DEVELOPMENT OF INFORMATION SYSTEM FOR BRAIN TUMOR CLASSIFICATION ON MRI IMAGES ..... 33

**Кривцун И.В., Хаскин В.Ю., Коржик В.Н., Донг Ч., Клочков И.Н., Ло З.**

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНЕРГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕЗКИ И СВАРКИ ..... 36

**Krivtsov I., Khaskin V., Korzhyk V., Dong C., Klochkov I., Luo Z.**

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF USING THE SYNERGISTIC EFFECT TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF HYBRID CUTTING AND WELDING TECHNOLOGIES ..... 36

**Колязов К.А., Одинокова Е.В., Остапенко А.Е., Смирнов Д.Ю., Тучкина Л.К., Яшин Д.Д.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОСЛОЙНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ..... 44

**Kolyazov K.A., Odinokova E.V., Ostapenko A.E., Smirnov D.Y., Tuchkina L.K., Yashin D.D.**

MODELING OF SINGLE-LAYER NEURAL NETWORKS ..... 44

Исполнительно стоит заняться лишь дальнейшей сегментацией в случае наличия опухоли у пациента.

#### Список литературы:

1. BrainTumorDetection [Электронный ресурс] - URL: <https://www.kaggle.com/ruslankl/brain-tumor-detection> (дата обращения: 12.08.2019)
2. Глубокое обучение для новичков: распознаем изображения с помощью сверточных сетей [Электронный ресурс] -URL: <https://habr.com/ru/company/wunderfund/blog/314872/> (дата обращения: 11.08.2019)
3. Опухоль головного мозга [Электронный ресурс] -URL: <http://navigator.mosgorzdrav.ru/diseases/onkologiya/o>

pukhol-golovnogo-mozga/ (Дата обращения: 11.08.2019).

4. Признаки опухоли головного мозга [Электронный ресурс] -URL: <https://doctor-neurologist.ru/priznaki-opuxoli-golovnogo-mozga/> (Дата обращения: 11.08.2019).
5. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики / В.Г. Редько. - Москва: РГГУ, 2017. - 233 с.
6. Справочник по онкологии. - М.: Здоров'я, 2009. - 127 с.
7. Тархов, В.Г. Нейросетевые модели и алгоритмы: Справочник / Д.А. Тархов. - М.: Радиотехника, 2014. - 81 с.

УДК 621.791.725: 621.791.755.5

*Кривцун И.В.<sup>1</sup>, Хаскин В.Ю.<sup>2</sup>, Коржик В.Н.<sup>1,2</sup>,*

*Донг Ч.<sup>2</sup>, Клочков И.Н.<sup>1</sup>, Ло З.<sup>2</sup>*

*1 – Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, Украина*

*2 – Китайско-украинский институт сварки им. Е. О. Патона, Гуанчжоу, КНР*

[DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10556](https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10556)

### АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНЕРГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕЗКИ И СВАРКИ

*Krivtsun I.<sup>1</sup>, Khaskin V.<sup>2</sup>, Korzhyk V.<sup>1,2</sup>,*

*Dong Chunlin<sup>2</sup>, Klochkov I.<sup>1</sup>, Luo Ziyi<sup>2</sup>*

*1 – The Paton Electric Welding Institute of the NASU, Kiev, Ukraine*

*2 – China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding, Guangzhou, China*

### ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF USING THE SYNERGISTIC EFFECT TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF HYBRID CUTTING AND WELDING TECHNOLOGIES

#### Аннотация

Статья посвящена анализу положительного влияния синергетического эффекта на вызывающие его гибридные процессы резки и сварки. Показано, что при совместном использовании лазерного излучения и электрической дуги при соотношении мощностей от 1:1 до 1:3 нарушается аддитивность теплового воздействия на изделие лазерного пучка и дуговой плазмы. Наиболее явно этот эффект выражен в лазерно-плазменных процессах. Технологическая эффективность проявления синергетического эффекта прямо пропорциональна величине плотности мощности лазерного излучения и заключается в сужении и повышении глубины пароголового канала. Этот эффект, в том числе, проявляется в «привязке» анодной области дуги к плазменному факелу, создаваемому над поверхностью металла лазерным пучком, и в соответствии с принципом минимума Штеенбека (M. Steenbeck) способствует снижению напряжения на дуговом промежутке.

#### Abstract

The article analyzes the positive effect of the synergetic effect on the hybrid processes of cutting and welding that cause it. It is shown that the combined use of laser radiation and electric arc at a power ratio of 1:1 to 1:3 violates the additivity of the thermal effect on the product of the laser beam and arc plasma. This effect is most clearly expressed in laser-plasma processes. The technological efficiency of the synergetic effect is directly proportional to the power density of the laser radiation and consists in narrowing and increasing the depth of the keyhole. This effect, in particular, manifests itself in the "binding" of the anode region of the arc to the plasma torch is generated above the surface of the metal with a laser beam, and in accordance with the principle of minimum Steenbeck (M. Steenbeck) it contributes to the reduction of the voltage at the arc gap.

**Ключевые слова:** гибриды, лазер-TIG, лазер-MIG, лазер-плазма, сварка, резка, повышение показателей.

**Keywords:** hybrid, laser-TIG, laser-MIG, laser-plasma, welding, cutting, synergetic effect, improving performance.

В конце 1970-х годов под руководством проф. Уильяма Стина (William M. Steen) были предложены процессы гибридной лазерно-дуговой (лазерно-плазменной) сварки и резки сталей и сплавов [1, 2]. С тех пор наблюдается неослабевающий рост интереса исследователей к этим процессам, обусловленный эффектом неаддитивного увеличения объема расплавленного металла при совместном действии лазерного и дугового (плазменного) источников энергии. Такой эффект называют гибридным или синергетическим [3]. С технологических позиций желательно, чтобы синергетический эффект позволял увеличивать глубину провара и реза в гибридных процессах обработки металлов. Причем глубина гибридной обработки должна превышать сумму глубин обработки с помощью составляющих источников энергии при равенстве погонных энергий.

Анализируя публикации 1980-х – 1990-х годов, посвященные комбинированным лазерно-дуговым процессам, можно сделать вывод о постепенном перемещении интереса к гибридным технологиям из сферы экспериментальных исследований в сферу промышленного производства. Вопрос о перспективах дальнейшего развития лазерно-дуговых технологий звучит и в названии статьи [4], которое сформулировано автором следующим образом: «Синергетический эффект совместного использования сварочной дуги и лазерного пучка – для практического применения или только для научных исследований?» Эта работа является по существу обзорной, обобщающей и анализирующей достижения ученых разных стран в области лазерно-дуговых процессов.

Автор работы [4] делает краткий экскурс в историю развития лазерно-дуговой сварки, описывает преимущества гибридных процессов, особо подчеркивает синергетический эффект совместного использования лазерного излучения и электрической дуги. Отметив недостатки лазерной сварки с дугой неплавящегося электрода (лазер-TIG сварки) автор переходит к анализу работ по лазерной сварке с дугой плавящегося электрода (лазер-MIG), а также лазер-плазменной сварке и делает вывод, что последние способы являются более перспективными для практического применения с точки зрения диапазона толщин и типа свариваемых металлов. Что касается лазер-TIG процесса, то он, несмотря на определенные недостатки, также должен найти в будущем более широкое применение, в чем убеждает имеющийся положительный опыт его использования (в частности, с присадкой) для сварки сложных тонкостенных конструкций и в ряде других случаев.

Автор работы [4] считал, что на тот момент лазерно-дуговые процессы представляли интерес с точки зрения теоретических и экспериментальных исследований, поскольку существовало много нерешенных вопросов, например, касающихся влияния длины волны и мощности лазерного излучения на степень ионизации дуговой плазмы при разных

тока дуги. Тем самым он предсказывал перспективы и направления развития гибридных лазер-TIG, лазер-MIG и лазер-плазменных процессов.

Сведения о реализации лазер-TIG сварки алюминия и его сплавов малых толщин, также как и других тонколистовых металлов, представлены в публикациях [5-10]. Авторы этих работ отмечают так называемый синергетический эффект совместного использования лазерного излучения и электрической дуги (эффект нарушения аддитивности теплового воздействия на изделие лазерного пучка и дуговой плазмы, о котором упоминалось выше). В работе [5], например, указывается, что в экспериментах по лазерно-дуговой сварке алюминия CO<sub>2</sub>-лазером мощностью 1,2 кВт и дугой с неплавящимся электродом при токе 60 А и скорости сварки 0,25 м/мин объем расплавленного металла на 77% превышал простую сумму объемов расплавов, полученных в случае использования каждого из источников тепла в отдельности. В вышеупомянутых публикациях подчеркивается, что гибридным способом удается получить качественные швы на алюминии при относительно малых мощностях лазерного пучка и дуги, а также высокой скорости сварки, чего не удавалось достичь лазерной сваркой при гораздо более высокой мощности лазерного излучения. Этим преимуществом гибридного процесса воспользовались авторы работы [7], применив для сварки алюминиевого сплава толщиной  $\delta \geq 3$  мм твердотельный Nd:YAG-лазер мощностью всего 360 Вт совместно с горелкой для TIG сварки на токе 50 А. Достигнутые ими параметры проплавления и производительность процесса оказались сравнимыми с получаемыми при сварке Nd:YAG-лазером мощностью 2 кВт.

Достоинства лазерно-дуговой сварки тонколистового алюминия и нержавеющей стали демонстрируются в работах [6, 8], где сравниваются основные параметры режимов для трех способов сварки: TIG, гибридной лазер-TIG и лазерной. Так, при мощности лазерного излучения в интервале от 0,1 до 1,5 кВт (для двух последних способов), длине дуги 6 мм и 10 мм (соответственно для двух первых способов), типичная скорость сварки составляла 0,5; 2,0 и 1,0 м/мин, отношение глубины проплавления к ширине шва – 0,5; 2,0 и 1,0, а погонная энергия – 320; 50 и 160 Дж/мм соответственно. Отмечается улучшение стабильности горения дуги в комбинированном процессе и облегчение ее зажигания. Подчеркивается, что гибридным способом удается сваривать листы весьма малой толщины и соединять разнотолщинные элементы, не обеспечивая высокой точности сборки стыков, как это необходимо для лазерной сварки. Помимо гибридной лазер-TIG сварки для соединения тонких (1...2 мм) алюминиевых листов предлагается использовать лазер-MIG процесс в котором используется излучение Nd:YAG- и диодного лазеров в сочетании с импульсным MIG процессом [11].

Положительные результаты по комбинированной сварке тонколистовых (0,5...1,0 мм) металлов, в том числе алюминия, но уже лазерно-плазменным способом получены в работе [12], опубликованной

английскими учеными из университета в Ковентри. Сварка осуществлялась с использованием CO<sub>2</sub>-лазера непрерывного действия мощностью 400 Вт и стандартной плазменной горелки, расположенной под углом к оси лазерного пучка впереди по ходу сварки (рис.1). Обосновывая целесообразность замены в гибридном процессе свободно горящей (открытой) TIG дуги на плазменную (сжатую) дугу, авторы работы [11] указывают на целый ряд существенных недостатков лазер-TIG процесса, из-за которых он, несмотря на отмечаемые всеми исследователями потенциальные возможности, до сих

пор не нашел широкого промышленного применения. Ограничения лазер-TIG способа сварки обусловлены главным образом особенностями поведения открытой дуги, которые проявляются даже в присутствии лазерного пучка, отрицательно влияя на характер гибридного процесса в целом. Это общеизвестные трудности, связанные с зажиганием дуги и пространственной неустойчивостью ее столба при малых токах и больших скоростях перемещения дуговой горелки относительно изделия.

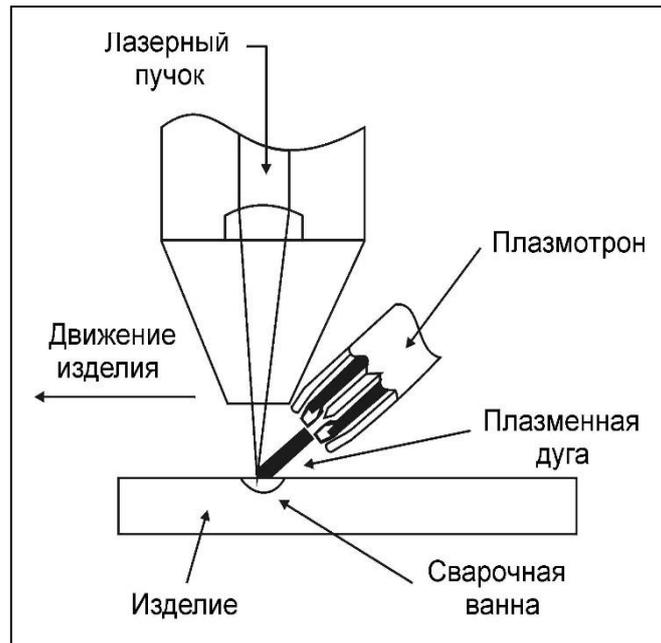


Рис.1. Схема процесса лазерно-плазменной сварки [12].

Как и ожидалось, применение в гибридном процессе вместо свободно горящей TIG дуги плазменной (сжатой) дуги позволило реализовать преимущества последней и такой комбинации в целом. Были получены следующие результаты: обеспечено надежное возбуждение дуги (за счет использования дежурной дуги) и увеличен срок службы вольфрамового электрода. Основным положительным эффектом, достигаемым за счет применения лазерно-плазменного способа, являлся явно выраженный синергетический эффект, в результате которого объем расплавленного металла оказывался больше суммы соответствующих объемов при лазерной и плазменной сварке по отдельности. Благодаря этому авторам работы [12] удалось увеличить

скорость сварки тонколистовых металлов в 2...3 раза по сравнению с лазерной сваркой. Так, стыковой шов с полным проплавлением на нержавеющей стали толщиной 0,6 мм был выполнен при мощности лазера 400 Вт и токе дуги 50 А на скорости 2,5 м/мин, которая в 2,5 раза превышает скорость достигаемую при использовании одного лишь лазера той же мощности. Взаимосвязь между током плазменной дуги и скоростью гибридной сварки нержавеющей стали указанной толщины может быть проиллюстрирована с помощью рис.2. Швы с полным проплавлением при тех же значениях параметров режима сварки были успешно выполнены и на титановом сплаве Ti-6Al-4V толщиной 0,75 мм.

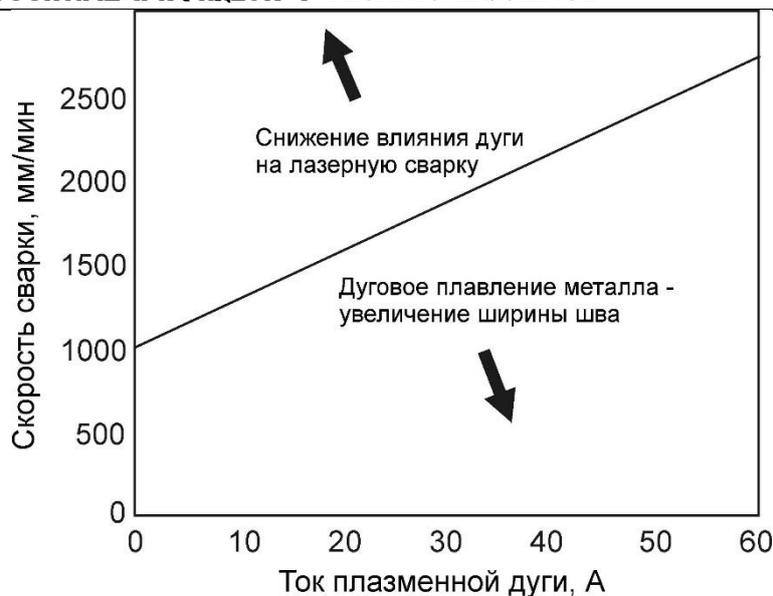


Рис.2. Оптимальное соотношение между скоростью сварки и током плазменной дуги при лазерно-плазменной сварке нержавеющей стали толщиной 0,6 мм (мощность CO<sub>2</sub>-лазера 400 Вт) [12].

Метод лазерно-плазменной сварки особенно отчетливо проявил свои достоинства при сварке алюминия и его сплавов. Авторами [12] получены качественные стыковые швы с полным проплавлением на неочищенном алюминии толщиной 0,6 мм при скорости сварки 0,5 м/мин и малых токах дуги (скорость сварки ограничивалась лишь мощностью имеющегося лазера). При этом анодное пятно дуги, сформировавшись в пределах зоны нагрева металла, создаваемой лазерным пучком, перемещалось вместе с ней, что обеспечивало непрерывность швов и полное проплавление образца. Отметим, что попытки авторов рассматриваемой работы выполнить швы на алюминии с помощью плазменной либо лазерной сварки оказались безуспешными, в первом случае из-за блуждания анодного пятна дуги, во втором – из-за недостаточной мощности лазера.

Как преимущества лазерно-плазменной сварки по сравнению с лазерной в работе [12] отмечаются более благоприятная с точки зрения прочности сварного соединения форма поперечного сечения швов и значительно более мягкие требования к точности сборки стыков и величине допустимого отклонения лазерного пучка от линии сплавления. Так, в отличие от лазерной сварки, где зазоры между стыкуемыми элементами не должны превышать 5...10% толщины металла, при комбинированной сварке допустимы зазоры вплоть до 25...30%.

Проведенные авторами работы [12] исследования позволили сделать вывод о более широких возможностях применения в промышленности лазерно-плазменной сварки по сравнению с лазерно-TIG сваркой и о необходимости дальнейшего изучения лазерно-плазменных процессов. Отметим также актуальность поставленной авторами [12] задачи создания специализированных устройств для промышленной реализации лазерно-плазменных

процессов – интегрированных лазерно-дуговых плазмотронов.

В более поздней работе [13] сотрудника того же университета, представлены результаты дальнейших исследований процесса лазерно-плазменной сварки тонколистовых сталей и алюминиевых сплавов с использованием как CO<sub>2</sub>-лазеров, так и Nd:YAG-лазеров мощностью от 400 Вт до 6 кВт. В ходе этих исследований были получены хорошие результаты по комбинированной сварке стыковых соединений из разнотолщинных металлов, отмечено существенное снижение растрескивания шва вблизи основного металла по сравнению с лазерной сваркой алюминиевого сплава 6000 толщиной 2 мм, достигнуты скорости сварки на 40% превышающие соответствующие значения при лазерной сварке. Так, например, при лазерно-плазменной сварке тонколистовых сталей непрерывные швы с полным проплавлением были получены на скоростях до 60 м/мин, причем стабильность процесса сварки сохранялась вплоть до скоростей порядка 90 м/мин. На основании полученных данных автор работы [13] делает вывод о том, что комбинированные лазерно-плазменные процессы позволяют преодолеть многие проблемы традиционной лазерной сварки и могут в ближайшем будущем существенно потеснить промышленные лазерные технологии.

Вопрос о расширении промышленного применения новых лазерно-дуговых технологий, в частности, об использовании их при производстве автомобилей, впервые обсуждался на международной конференции ИВЕС-94 в Детройте [14]. В ходе представления гибридного лазерно-дугового способа сварки листовых сталей и алюминия, осуществляемого путем гибридного воздействия на изделие излучения Nd:YAG-лазера и TIG дуги, было подчеркнуто, что этот способ имеет ряд достоинств, особенно важных для автомобильной промышленности, а именно: 50% уменьшение сто-

имости сварки; такое же (50%) увеличение производительности; снижение затрат на подготовку кромок; возможность контроля ширины шва и, наконец, сохранение первоначальной гибкости конструкции после сварки.

Статья [15] примечательна тем, что для гибридной резки пластин из нержавеющей стали толщиной до 2 мм в качестве составляющих источника тепла были применены сфокусированное излучение твердотельного лазера и плазменная дуга косвенного действия. Авторы использовали Nd:YAG-лазер непрерывного действия мощностью около 200 Вт, работающий на длине волны излучения 1,06 мкм, и плазматрон мощностью до 1 кВт со сменным соплом-анодом дуги, горячей с вольфрамового электрода в потоке аргона. Лазерная головка, в сопло которой подавался воздух, устанавливалась над пластиной под углом  $60^\circ$  к ее поверхности, а плазматрон – вертикально под пластиной.

В рассматриваемой работе приводятся результаты экспериментальных исследований влияния основных параметров режима лазерно-плазменной резки на ее производительность. Эксперименты показали, что лазерно-плазменная резка позволяет значительно повысить скорость обработки по сравнению с лазерной резкой, не снижая качества реза. Так, при электрической мощности плазменной дуги

880 Вт (по оценке авторов это соответствует мощности, вкладываемой в изделие, 440 Вт) и мощности лазерного излучения 150 Вт скорость увеличилась приблизительно вдвое (рис.3), при этом ширина реза и размер зоны термического влияния оставались близкими к соответствующим значениям, характерным для лазерного процесса (рис.4, 5). Отмечая, что с увеличением мощности плазменной дуги выше указанного значения скорость гибридной резки не возрастала, а параметры и качество реза становились типичными для плазменного процесса, авторы делают вывод о существовании некоторого оптимального соотношения мощностей, вкладываемых плазменной струей и лазерным пучком в обрабатываемый металл, и оценивают его как не превышающее 3:1. Однако при определении теплового вклада плазменной струи в изделие авторы учитывают лишь КПД нагрева металла плазмой, забывая, например, о потерях энергии на аноде плазмотрона. С учетом этих потерь мощность, вкладываемая в изделие плазменной струей, будет существенно меньше 440 Вт. Поэтому более точным будет следующий вывод: для получения наилучшего эффекта при лазерно-плазменной резке мощности, вносимые в обрабатываемый металл плазменной струей и лазерным излучением, должны быть приблизительно равными [16].

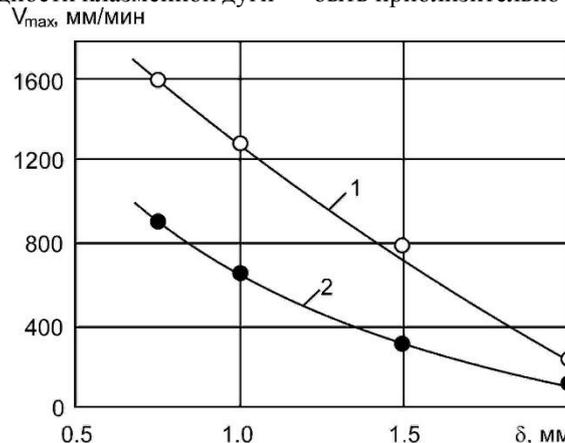


Рис.3. Максимальная скорость резки пластин из нержавеющей стали в зависимости от их толщины: 1 – лазерно-плазменная резка (мощность лазера 150 Вт, диаметр сопла плазмотрона 1,5 мм, мощность, вводимая плазменной струей, 440 Вт); 2 – лазерная резка (мощность лазера 150 Вт, размер пятна фокусировки 0,5 мм) [15].

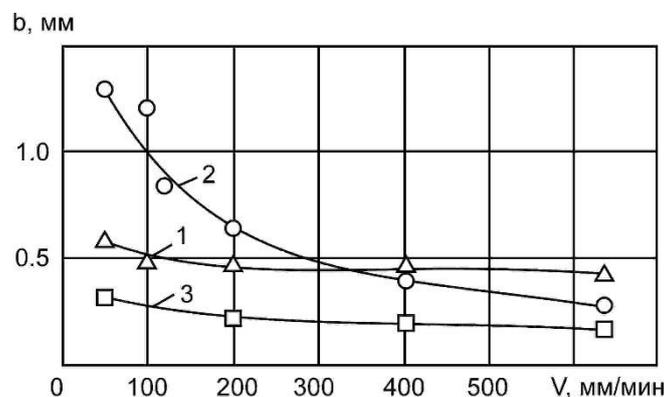


Рис.4. Зависимости ширины реза и размера зоны термического влияния от скорости лазерной резки нержавеющей стали толщиной 1,5 мм (расстояние лазерной головки от поверхности образца 1 мм, остальные параметры те же, что и на рис. 1.52): 1 и 3 – ширина реза со стороны лазерного пучка и с противоположной стороны; 2 – размер зоны термического влияния [15].

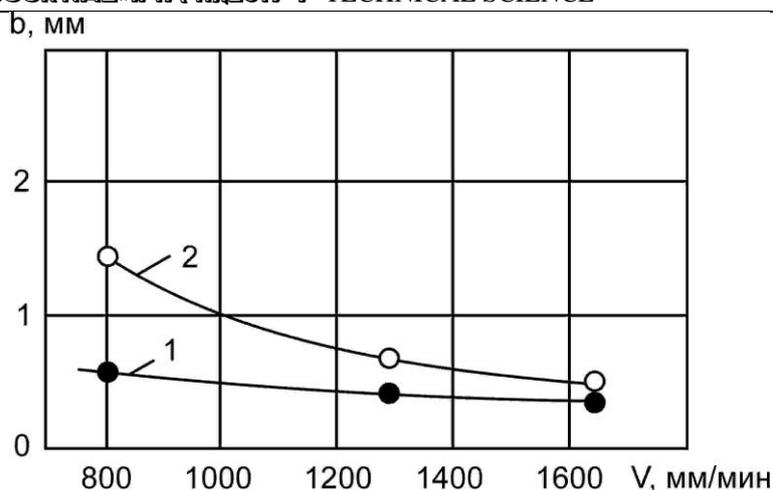


Рис.5. Размер зоны термического влияния и ширина реза в зависимости от скорости лазерно-плазменной резки нержавеющей стали толщиной 1,5 мм (параметры те же, что и на рис. 1.54, 1.55): 1 – ширина зоны термического влияния; 2 – ширина реза [15].

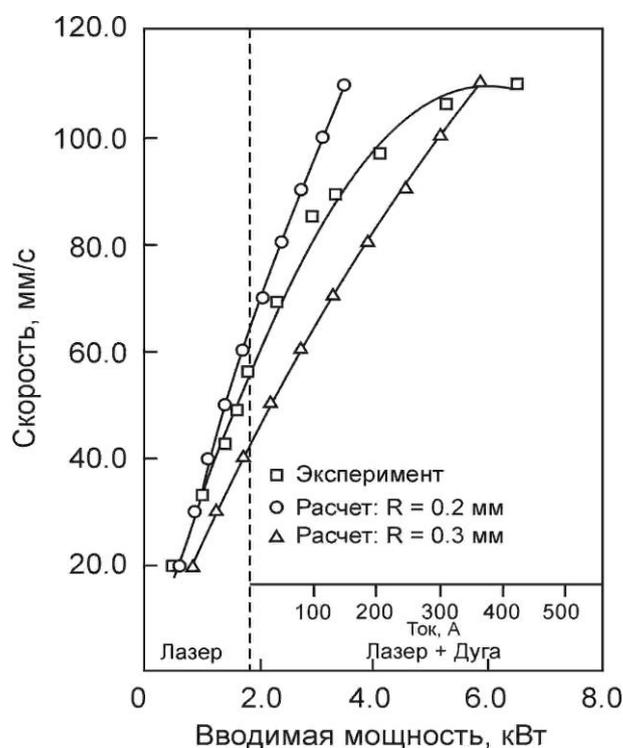


Рис.6. Зависимость скорости резки малоуглеродистой стали толщиной 3 мм от мощности, вводимой в изделие (вводимая мощность до 1870 Вт обеспечивается только лазерным пучком, а выше указанной величины – лазерным пучком и электрической дугой) [18].

Это утверждение аналогично сделанному в работах [17, 18] для комбинированной резки с использованием дуги прямого действия (рис.6). Кроме того, в работе [18] утверждается, что если лазерный и дуговой источники тепла располагаются с одной и той же стороны изделия, электрическое сопротивление дуги в режиме устойчивого горения (ток 100 А) под воздействием лазерного излучения уменьшается, о чем свидетельствует снижение напряжения на дуговом промежутке при одновременном росте тока. При этом анодная область дуги «привязывается» к плазменному факелу, создаваемому над поверхностью металла лазерным пучком, что является проявлением синергетического эффекта и соответствует принципу минимума Штеенбека (M.

Steenbeck), а именно: поскольку электропроводность лазерной плазмы, температура которой может достигать 20000 К, намного превышает электропроводность окружающего холодного газа, факел лазерной плазмы является предпочтительной, энергетически выгодной областью горения дуги. Происходящее при этом взаимодействие лазерного излучения с прианодной дуговой плазмой, приводит к повышению ее температуры, а, следовательно, и электропроводности, что объясняет снижение напряжения на дуговом промежутке [18].

Дальнейшие исследования возникновения синергетического эффекта в гибридных процессах сварки и резки показали, что его проявление, а

также привязка дуги (плазмы) к зоне действия лазерного излучения и стабильность процесса на высоких скоростях, в большей степени зависят от степени фокусировки лазерного излучения, чем от его длины волны [19, 20]. Более эффективное проявление синергетического эффекта, заключающееся в

сужении и повышении глубины парогазового канала, прямо пропорционально величине мощности лазерного излучения и, соответственно, значению его плотности мощности (рис.7) [21].

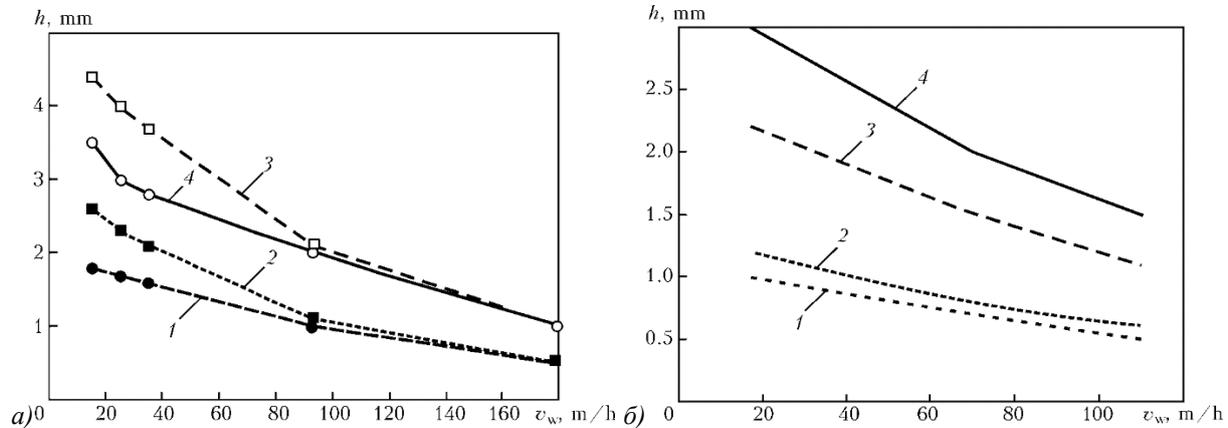


Рис.7. Зависимости глубины проплавления  $h$  от скорости  $V_{св}$  лазерно-плазменной сварки с использованием излучения диодного лазера:

- а) – мощностью 2 кВт и аргоновой плазмы 2 кВт для нержавеющей стали SUS321;  
 б) – мощностью 1,2 кВт и аргоновой плазмы 0,8 кВт для алюминиевого сплава 5083;  
 1 — лазерная сварка; 2 — плазменная;  
 3 — лазерная + плазменная (арифметическая сумма значений  $h$ ); 4 — гибридная [21].

В гибридных процессах сварки и резки могут применяться различные схемы взаимного расположения тепловых источников. Например, с коаксиальным или наклонным подводом лазерного излучения, с расположением источников энергии с одной или двух сторон обрабатываемых деталей [22]. Применение технологической схемы лазерно-плазменной резки и сварки с коаксиальным подведением обоих источников энергии с одной стороны обрабатываемой детали способствует повышению эффективности проявления синергетического эффекта, который заключается в «привязке» анодного пятна дуги к зоне действия излучения, стабилизации ее горения в гибридном процессе при токах до 300 А и снижении напряжения на дуговом промежутке из-за повышения его электропроводности за счет перегрева плазмы лазерным излучением [23]. Это позволяет значительно увеличить скорости процессов резки и сварки без повышения погонной энергии. Так, наличие синергетического эффекта при лазерно-плазменной сварке сталей и алюминиевых сплавов может приводить к повышению скорости до 3 раз по сравнению с лазерной сваркой и до 4 раз по сравнению с плазменной, а при лазерно-плазменной резке углеродистых сталей позволяет на 30-50% повысить скорость по сравнению с лазерной резкой при близких показателях энергозатрат [23].

Исходя из проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1) Гибридные процессы резки и сварки отличаются наличием синергетического эффекта совместного использования лазерного излучения и электрической дуги при соотношении мощностей от 1:1 до 1:3, заключающимся в нарушении аддитивности

теплового воздействия на изделие лазерного пучка и дуговой плазмы. Наиболее явно этот эффект выражен в лазерно-плазменных процессах.

2) Технологическая эффективность проявления синергетического эффекта прямо пропорциональна величине плотности мощности лазерного излучения и заключается в сужении и повышении глубины парогазового канала. Она способствует повышению скорости сварки (например, до 3 раз по сравнению с лазерной и до 4 раз по сравнению с плазменной) и резки (например, до 2 раз по сравнению с лазерной) сталей и сплавов с одновременным снижением (до 50%) стоимости процесса.

3) Синергетический эффект, в том числе, проявляется в «привязке» анодной области дуги к плазменному факелу, создаваемому над поверхностью металла лазерным пучком, и в соответствии с принципом минимума Штеенбека (M. Steenbeck) способствует снижению напряжения на дуговом промежутке.

**Примечание.** Работа выполнялась в рамках проекта № 2017GDASCX-04112017 Capacity - Building of Innovation - Driven Development for Special Fund Projects «Исследование физико-химических процессов при взаимодействии паровой плазмы с поверхностью металлов и разработка научных основ технологии водо-воздушной плазменной резки листовых сталей для получения сварных соединений» и проекта №2018GDASCX-0803 «Research and development of laser and plasma technologies for hybrid welding and cutting (Научно-исследовательские разработки лазерных и плазменных технологий гибридной сварки и резки)», Guangzhou, China.

**Список литературы.**

1. Eboo M., Steen W.M., Clarke J. Arc augmented laser welding // *Advances in welding processes: Proceedings of the 4<sup>th</sup> Int. Conf., England, Harrogate, 1978.* – Vol.1. – P. 257-265.
2. Steen W.M., Eboo M. Arc augmented laser welding // *Metal Construction.* – 1979. – Vol. 11, No. 7. – P. 332-335.
3. Кривцун И.В. Комбинированные лазерно-дуговые процессы обработки материалов и устройства для их реализации: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.10. / Кривцун Игорь Витальевич // Ин-т электросварки им. Е.О.Патона НАНУ, К., 2002. – 393 с.
4. Tusek J. Sinergic operation of welding arc and laser beam – for practical application or for scientific research only? // *Varilna tehnika.* – 1996. – Vol. 45, No. 2. – P. 39-46.
5. Arc-augmented laser welding of aluminium / Final Rept., New-York, Welding Research Council, 1987.
6. Wendelstorf J., Decker I., Wohlfahrt, H. Laser-enhanced gas tungsten arc welding (laser-TIG) // *Welding in the World.* – 1994. – Vol. 34. – P. 395-396.
7. Nakata K., Kurosawa T., Yoshikawa M. Sumitomo jukikai giho // *Techn. Rev.* – 1996. – Vol. 44, No. 131. – P. 25-28.
8. Moeniralam Z., Luijendijk T. Wisselwerking tussen laserlassen en booglassen // *Lastechniek.* – 1996. – Vol. 62, No. 7-8. – P. 3-6.
9. Ji J., Jasnau U., Seyffarth P. Prozesssporen beim Nd:YAG-Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen von Aluminiumlegierungen – Teil 1: Parametereinflüsse // *Schweißen und Schneiden.* – 2007. Vol. 59, No. 6. – S. 334-337.
10. Ji J., Jasnau U., Seyffarth P. Gefügeverbesserung im Schweißgut beim Nd:YAG-Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen von Aluminiumlegierungen // *Schweißen und Schneiden.* – 2007. Vol. 59 No. 11. – S. 608-612.
11. High speed welding of aluminium alloy sheets with using the laser/AC pulsed MIG hybrid process / H. Tong, T. Ueyama, T. Kihara, et al. // *Welding International.* – 2005. Vol. 19, No. 2. – P. 89-99.
12. Walduck R.P., Biffin J. Plasma arc augmented laser welding // *Welding and Metal Fabrication.* – 1994. – Vol. 62, No. 4. – P. 172-176.
13. Blundell N. J. Arc takes laser welding into new territory // *Materials World.* – 1998. – No. 9. – P. 537-538.
14. Irving B. Automotive engineers plunge into tomorrow's joining problems // *Welding Journal* – 1994. – Vol. 73, No. 11. – P. 47-50.
15. Повышение скорости лазерной резки металлов плазменным подогревом / А.П. Халбошин, Ю.В. Курочкин, А.М. Любченко и др. // *Сварочное производство.* – 1990. – № 12. – С. 3-5.
16. Application of diode and CO<sub>2</sub> lasers in laser-plasma welding of thin sheet aluminum alloys / I.V. Krivtsun, V.Yu. Khaskin, A.S. Zatserkovny, A.V. Bernatsky // *Sudare laser-plasma*, №3, 2009. – P. 47-51.
17. Clarke J., Steen W.M. Arc augmented laser cutting // *Proceedings of the Laser 1979 Conf., Germany, Munich, 1979.* – P. 247.
18. Steen W.M. Arc augmented laser processing of materials // *Journal of Applied Physics* – 1980. – Vol. 51, No. 11. – P. 5636-5641.
19. Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys / I.V. Krivtsun, V.D. Shelyagin, V.Yu. Khaskin, etc. // *The Paton Welding Journal*, №5, 2007. – P. 36-40.
20. Improving the efficiency of hybrid welding of aluminum alloys / V.Yu. Khaskin, V.N. Korzik, V.N. Sydorets, etc. // *The Paton Welding Journal*, №12, 2015. – P. 14-18.
21. Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies / V.D. Shelyagin, I.V. Krivtsun, Yu.S. Borisov, etc. // *The Paton Welding Journal*, №8, 2005. – P. 44-49.
22. Analysis of the Current State of the Processes of Hybrid Laser-Plasma Welding / V. Korzhyk, O. Bushma, V. Khaskin, C. Dong, V. Sydorets // *Advances in Engineering Research (AER)*, V.102, 2017. – P. 80-90.
23. Analysis of features of technological schemes of processes of laser-plasma cutting and welding / V. Khaskin, V. Korzhyk, A. Bernatsky, etc. // *Austria-science*, №20, 2018. – P. 34-43.