

УДК 621.791.75

© Носовский Б.И.<sup>1</sup>, Чудинов В.Н.<sup>2</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНИЙ ТОКА НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ДВУХДУГОВОЙ СВАРКЕ**

Установлено, что плотность тока по глубине сварочной ванны убывает линейно и значительно зависит от расстояния между электродами.

**Ключевые слова:** двухдуговая сварка, электромагнитные воздействия, плотность тока, сварочная ванна.

**Носовський Б.І., Чудінов В.М. Дослідження розподілу ліній струму на фізичній моделі при дводуговому зварюванні.** Встановлено, що щільність струму по глибині зварювальної ванни збуває лінійно і значно залежить від відстані між електродами.

**Ключові слова:** дводугове зварювання, електромагнітний вплив, щільність струму, зварювальна ванна.

**V.I. Nosovskiy, V.M. Chudinov. Study of current distribution lines on physical model for twin-arc welding.** It is found that the current density at the depth of the weld pool and significantly decreases linearly depends on the distance between the electrodes.

**Keywords:** twin-arc welding, electromagnetic effects, the current density, the weld pool.

**Постановка проблемы.** Исследование способа сварки двумя последовательно включенными дугами с электромагнитным управлением сварочной ванной [1], описание закономерностей физических явлений, протекающих в сварочной ванне при данном способе.

**Анализ последних исследований и публикаций.** При сварке с электромагнитными воздействиями (ЭМВ), как указывают в работе [2] в случае применения аксиальных управляющих магнитных полей (УМП) возможно управление гидродинамикой сварочной ванны с целью, как дегазации, так и значительного улучшения параметров кристаллизации швов. В работе [3] сказано, что применение ЭМВ способствует выравниванию температуры в периферийных и центральных областях ванны, снижению перепада концентрации примесей и газов в расплаве, улучшению дегазации сварочной ванны.

Недостатком применения ЭМВ при однодуговой сварке является сложный характер распределения тока по сварочной ванне и изделию, на что влияет место расположения токоподвода.

Японские исследователи [4] предложили способ ТИГ сварки с двумя дополнительными погруженными в сварочную ванну проволоками, по которым пропускали электрический ток. В ходе испытаний удалось обеспечить стабильный процесс сварки с высокой массовой скоростью наплавки (100...150 г/мин) и улучшить форму наплавленного валика.

Однако исследования способа сварки двумя последовательно включенными дугами отсутствуют.

**Цель статьи** – изучение и совершенствование теоретических основ и базовых закономерностей управляемого движения расплава сварочной ванны при двухдуговой сварке последовательно включенными дугами.

Для реализации целенаправленного силового воздействия на жидкий металл сварочной ванны необходимо сконцентрировать линии тока в верхних слоях сварочной ванны и приложить внешнее аксиальное магнитное поле. Выполнить это условие можно, если использовать схему сварки двумя электродами, расположенными параллельно или под углом друг к другу, включив обе сварочные дуги 1, 5 (рис. 1) последовательно в цепь одного источника питания 3 [1]. В этом случае электрический ток от положительного полюса источника питания, протекает через электрод 4, дугу 5, изделие 6, вторую дугу 1, электрод 2 и к отрицательному полюсу источника. Между катодным пятном 7 дуги 5 и анодным пятном 9 второй дуги 1 ток протекает по

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

жидкой сварочной ванне по пути наименьшего сопротивления. Поэтому линии тока в сварочной ванне 8 сгущаются в верхней ее части между дугами 1, 5. Вектор магнитной индукции  $B$  направлен вдоль дуг и будет перпендикулярен линиям тока 8 в сварочной ванне. В соответствии с правилом левой руки на проводник с током (часть сварочной ванны, заключенной между активными пятнами на ее поверхности) действует сила  $F$ :

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;

$I$  – сила тока, А;

$l$  – длина линий тока (расстоянием между дугами), м;

$\alpha$  – угол между линиями тока и направлением магнитных линий, град.

Однако ввиду одностороннего подвода магнитного поля, а также разветвления линий тока вглубь сварочной ванны, возникающая сила будет меньше рассчитанной по формуле.

Величина объемных пондеромоторных сил определяется векторным произведением:

$$\vec{f} = \vec{B} \cdot \vec{i}, \quad (2)$$

где  $i$  – плотность сварочного тока в расплаве.

Из формулы (2) следует, что пондеромоторные силы будут наибольшими при взаимной перпендикулярности силовых линий внешнего магнитного поля и линий тока.

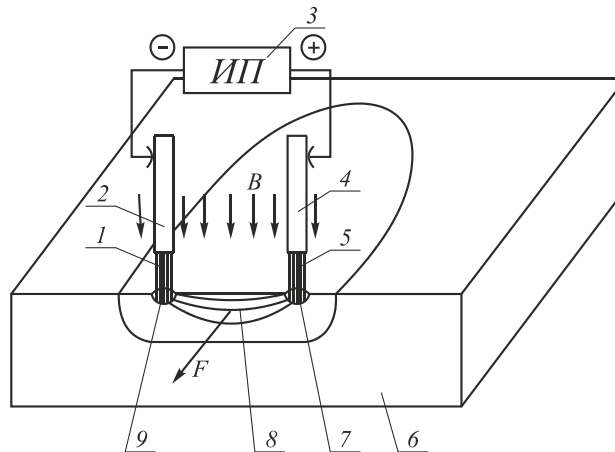


Рис. 1 – Схема разветвления линий тока в изделии при сварке двумя последовательно включенными дугами (обозначения в тексте)

Возникающая сила создает поток жидкого перегретого металла в направлении расплавляемой поверхности сварочной ванны. Благодаря этому тепло, накопленное сварочной ванной, более эффективно расходуется на плавление свариваемого изделия, увеличивается глубина проплавления, скорость сварки, уменьшается длина сварочной ванны, что позволяет резко увеличить производительность сварки, снизить расходы на электроэнергию. Интенсивное перемешивание сварочной ванны, как показано в работах [2, 3] приводит к повышению эксплуатационных характеристик сварного соединения.

Следует отметить, что при данном способе сварки сварочная ванна более объемна, чем при однодуговой сварке, что соответственно приведет к увеличению жидкой прослойки под дугой. В работе [5] показано влияние жидкой прослойки на эффективность плавления основного металла: жидкая прослойка препятствует эффективной передаче тепла. Однако, еще в работе [6] указывалось, что перенос тепла в сварочной ванне осуществляется не только за счет теплопроводности, но и путем конвекции, вызванной газодинамическим давлением дуги и градиентом температур по сечению ванны. Также можно отметить различную концентрацию примесей, что вызывает диффузионные потоки. Это свидетельствует, как отмечалось авторами ранее опубликованных работ [7, 8], что слой жидкого металла под дугой может не только оказывать сопротивление потоку тепла от дуги к фронту плавления, но и способствовать тепломассопереносу, существенно влияя на эффективность плавления основного металла.

От плотности тока в сварочной ванне существенно зависит эффективность управления

теплопереносом. Поэтому исследование распределения плотности тока является важной задачей.

Для данных исследований изготовили две модели сварочной ванны. Рассмотрим холодную модель для исследования распределения линий тока по глубине сварочной ванны (рис. 2, а). «Основной металл» вырезан из листовой низкоуглеродистой стали; сварочную ванну имитировали пластиной из стали аустенитного класса 18-10, проводимость которой близка к проводимости расплавленного металла. Толщина пластин – 0,5 мм. Пластины между собой сваривали по периметру контактной точечной сваркой. Сварку производили с перекрытием точек для хорошего электрического контакта.

Напряжение к модели сварочной ванны подводили двумя электродами. Опыты проводили при различном расстоянии между токоподводами (электродами) – 20 и 40 мм. Сила тока, протекающего по электродам, составляла 20 А. Измеряли падение напряжения по оси модели сварочной ванны через каждые 2 мм специальным щупом с базой измерительных игл 5 мм. Величину напряжения измеряли универсальным мультиметром фирмы UNI-T (модель M890F). Полученные значения напряжения пересчитывали в силу тока через удельное сопротивление аустенитной стали.

Холодную модель сварочной ванны для исследования распределения линий тока по поверхности ванны (рис. 2, б) изготавливали способом аналогичным описанному выше, а напряжение снимали при передвижении щупа вдоль оси модели сварочной ванны и поперек модели по оси электродов. Сила тока при этом составляла 30 А.

Электроды изготовили из медных стержней диаметром 5 мм и располагали их снизу пластины для свободного доступа к поверхностям пластин.

По полученным данным построены зависимости распределения плотности тока по глубине и поверхности моделей сварочной ванны (рис. 3-5).

Из рис. 3 видно, что наибольшая плотность тока сосредоточена в поверхностном слое модели сварочной ванны и по глубине ванны убывает практически линейно, поэтому наиболее эффективно с помощью магнитных полей можно управлять именно поверхностным слоем сварочной ванны. Причем расстояние между токоподводами (дугами), играет первостепенную роль в распределении линий (плотности) тока на участке ванны между электродами, на который и осуществляют электромагнитное воздействие.

Анализируя рис. 4, сделаем вывод, что наибольшая плотность тока сосредоточена на продольной оси модели сварочной ванны между электродами и резко падает при удалении от поперечной оси электродов на 15-20 мм в обе стороны.

При измерении плотности тока поперек модели сварочной ванны линии тока на продольной оси ванны между электродами становятся параллельными измерительным щупам и разность потенциалов между последними равна нулю. При этом наибольшая плотность тока наблюдалась в месте контакта электрод-пластина и резким падением в радиусе 5 мм от оси электрода (рис. 5).

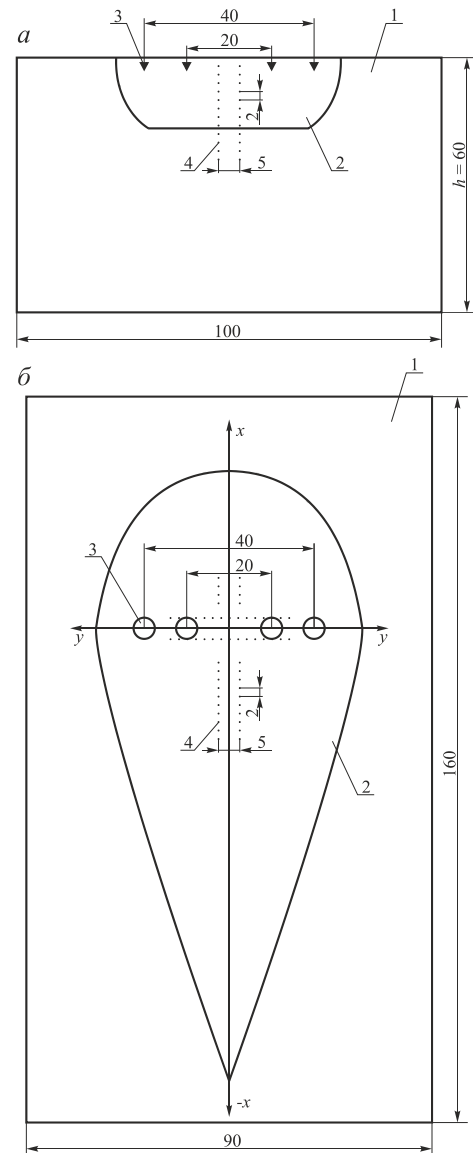


Рис. 2 – Модели сварочной ванны: а – по глубине ванны; б – по поверхности ванны; 1 – пластина из низкоуглеродистой стали; 2 – пластина из аустенитной немагнитной стали; 3 – токоподводы (электроды); 4 – точки измерения напряжения

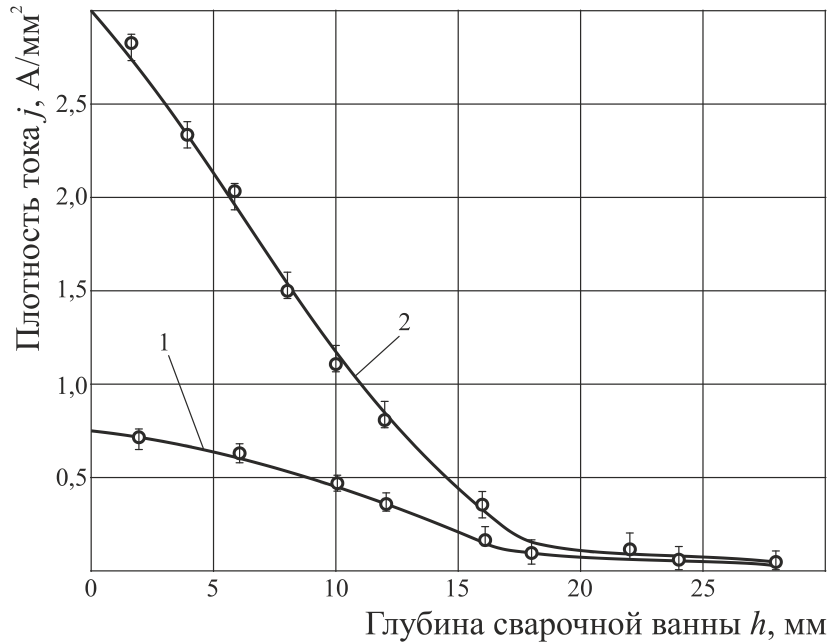


Рис. 3 – Распределение плотности тока по глубине модели сварочной ванны: 1 – база токоподводов 40 мм; 2 – база токоподводов 20 мм

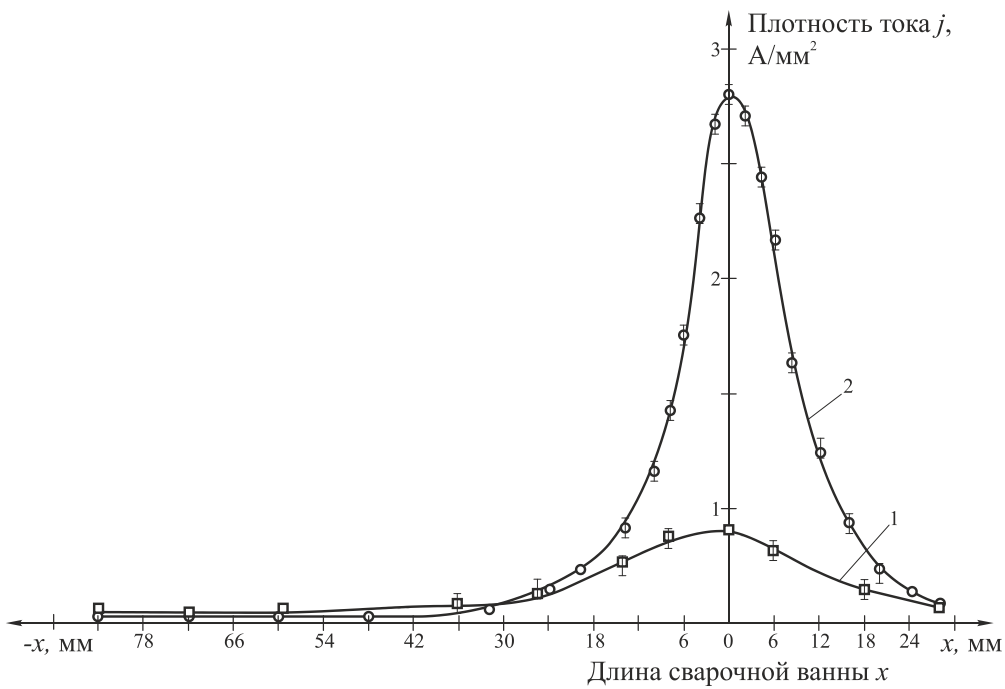


Рис. 4 – Распределение плотности тока по длине модели сварочной ванны: 1 – база токоподводов 40 мм; 2 – база токоподводов 20 мм

Полученные зависимости (см. рис. 3-5) свидетельствуют о резком падении (в 2-3 раза) плотности тока в сечении между электродами на продольной оси ванны при увеличении расстояния между ними с 20 до 40 мм.

Очевидно, это связано с тем, что ток стремится пройти по пути наименьшего сопротивления, а так как проводимость низкоуглеродистой стали в 7-8 раз больше проводимости аустенитной стали, то линии тока проходят по низкоуглеродистой стали, огибая тем самым «сварочную ванну». Подобная картина предположительно будет наблюдаться и на реальных сварочных ваннах.

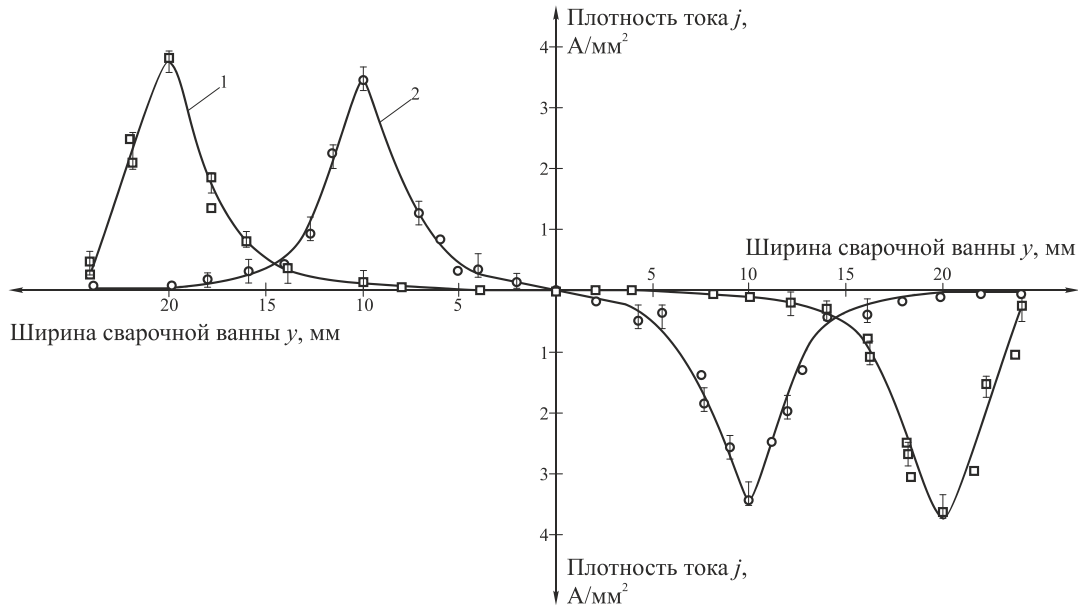


Рис. 5 – Распределение плотности тока по ширине модели сварочной ванны: 1 – база токоподводов 40 мм; 2 – база токоподводов 20 мм

По полученным данным (рис. 3) произвели расчет по формуле (1) силы, действующей на каждый глубинный слой ванны при наложении продольного магнитного поля для трех значений индукции  $B$  (рис. 6).

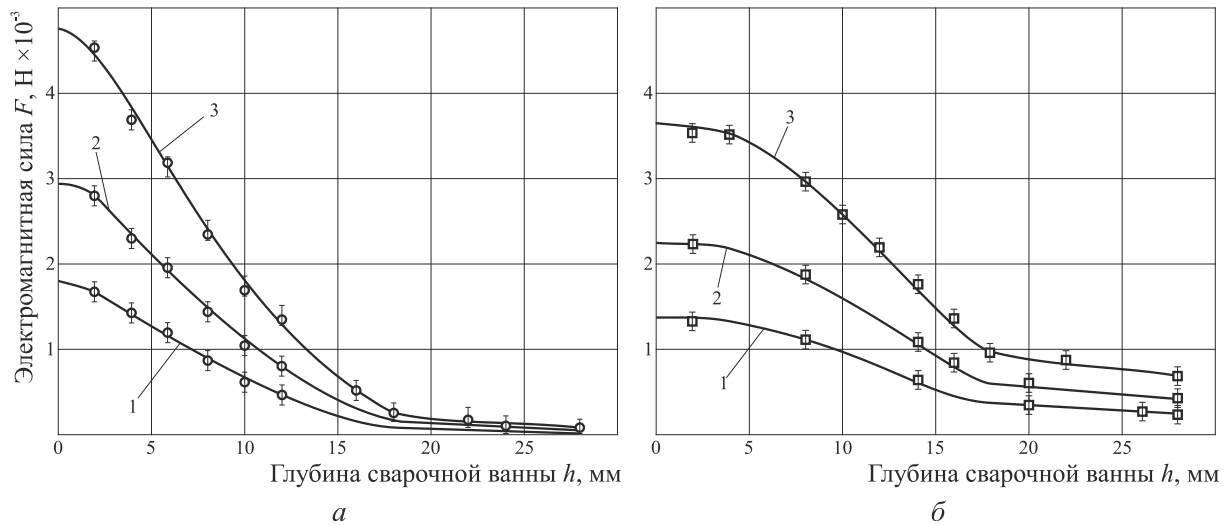


Рис. 6 – Распределение электромагнитной силы по глубине модели сварочной ванны при индукции внешнего магнитного поля: 1 – 30 мТл; 2 – 50 мТл; 3 – 80 мТл; а – база токоподводов 20 мм, сила тока 20 А; б – база токоподводов 40 мм, сила тока 30 А

Для эффективного управления тепломассопереносом необходимо как можно ближе располагать электроды друг к другу, однако, учитывая условие устойчивого протекания двухдугового процесса.

Наиболее эффективно можно управлять тепломассопереносом в сварочной ванне с помощью предложенной схемы. Так как существенный вклад в передачу тепла от активного пятна дуги к фронту плавления вносят потоки жидкого металла [8], то регулируя интенсивность этих потоков можно управлять размерами сварочной ванны и, следовательно, можно управлять формированием наплавленного металла, а также влиять на свойства наплавленного рабочего слоя либо сварного шва посредством управления кристаллизацией.

**Выводы**

1. Расстояние между электродами оказывает значительное влияние на распределение плотности тока по объему сварочной ванны. Оно должно быть минимальным, но с сохранением двухдугового процесса.
2. Наиболее эффективно можно управлять поверхностным слоем сварочной ванны, где плотность тока наибольшая.
3. Открываются новые возможности в управлении формой и размерами сварочной ванны, а, следовательно, и качеством сварных соединений.

**Список использованных источников:**

1. А. с. 1817742 СССР, МКИ В23К 9/08. Способ сварки магнитоуправляемой дугой / Б.И. Носовский; Мариуп. металлург. ин-т. - № 4800451/08; Заявл. 12.01.1990; Опубли. 23.05.1993, Бюл. № 19.
2. Рыжов Р.Н. Применение комбинированных электромагнитных воздействий для улучшения качества швов при сварке неплавящимся электродом / Р.Н. Рыжов // Автоматическая сварка. - 2005. - № 7. - С. 59-61.
3. Рыжов Р.Н. Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (обзор) / Р.Н. Рыжов, В.Д. Кузнецов // Автоматическая сварка. - 2006. - № 10. - С. 36-44.
4. Фуджита Ю. Разработка способа сварки ТИГ с применением двух проволок и электромагнитного управления сварочной ванной / Ю. Фуджита, Ю. Манабе, С. Зенитани, С. Уракава // Автоматическая сварка. - 2000. - № 9-10. - С. 152-156.
5. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности / А.А. Ерохин. - М.: Машиностроение, 1973. - 448 с.
6. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. - М.: Машгиз, 1951. - 296 с.
7. Гулаков С.В. О передаче тепла от источника к фронту плавления через жидкий металл сварочной ванны / С.В. Гулаков, Б.И. Носовский // Сварочное производство. - 1982. - № 6. - С. 5-6.
8. Гулаков С.В. Особенности формирования сварочной ванны / С.В. Гулаков, Б.И. Носовский // Автоматическая сварка. - 1981. - № 11. - С. 32-35.

**Bibliography:**

1. А. с. 1817742 USSR, MКИ V23K 9/08. The welding method of magnetically controlled arc / B.I. Nosovskiy; Mariup. metallurgist. Inst. - № 4800451/08; Appl 12.01.1990, Publ. 23.05.1993, Bull. № 19. (Rus.)
2. Ryzhov R.N. The use of combined electromagnetic effects to improve the quality of welds when welding GTAW / R.N. Ryzhov // Avtomaticheskaya svarka. - 2005. - № 7. - P. 59-61. (Rus.)
3. Ryzhov R.N. External electromagnetic influences in the process of arc welding and surfacing (review) / R.N. Ryzhov, V.D. Kuznetsov // Avtomaticheskaya svarka. - 2006. - № 10. - P. 36-44. (Rus.)
4. Fujita Y. Development of TIG welding process using two wires and electromagnetic control weld puddle / Y. Fujita, Y. Manabe, S. Zenitani, S. Urakava // Avtomaticheskaya svarka. - 2000. - №9-10. - P. 152-156. (Rus.)
5. Erohin A.A. Fundamentals of fusion welding. Physical and chemical laws / A.A. Erohin. - M.: Mashinostroyeniye, 1973. - 448 p. (Rus.)
6. Rykalin N.N. Calculations of thermal processes in welding / N.N. Rykalin. - M: Mashgiz, 1951. - 296 p. (Rus.)
7. Gulakov S.V. On the transfer of heat from the source to the edge of the melting liquid metal through the weld pool / S.V. Gulakov, B.I. Nosovskiy // Svarochnoe proizvodstvo. - 1982. - № 6. - P. 5-6. (Rus.)
8. Gulakov S.V. Features of the formation of the weld pool / S.V. Gulakov, B.I. Nosovskiy / Avtomaticheskaya svarka. - 1981. - № 11. - P. 32-35. (Rus.)