



# ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА 1420, ПОЛУЧЕННЫХ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКОЙ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

Т. М. ЛАБУР, д-р техн. наук, А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук, А. А. ГРИНЮК, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Сопоставлены физико-механические характеристики соединений высокопрочного алюминиевого сплава 1420, полученных неплавящимся электродом в аргоне обычной стационарной и отклоняющейся от вертикальной оси (вследствие пропуска тока через присадочную проволоку) дугой. Определены показатели прочности и угла загиба сварных соединений, а также прочности и ударной вязкости металла швов при использовании серийной сварочной проволоки СвАМгБЗ. Установлены значения показателей вязкости разрушения, определяющие уровень надежности сварных соединений при эксплуатации конструкций. Проанализированы особенности микроструктуры швов и распределение их твердости.

*Ключевые слова:* аргонодуговая сварка, неплавящийся электрод, алюминиевые сплавы, сварные соединения, отклонения дуги, колебания ванны, физико-механические свойства, твердость, структура, сопротивление разрушению

При выполнении обычной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом современных сверхлегких высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов в швах образуются включения оксидной пленки, а в зоне сплавления шва с основным металлом — поры. Кроме того, наличие лития, являющегося легирующим элементом, приводит к появлению хрупких выделений и резкому увеличению концентрации напряжений, о чем свидетельствуют низкие значения показателей вязкости разрушения сварных соединений [1]. Для получения качественных сварных соединений применяют различные методы воздействия на расплавленный металл, обеспечивающие оптимальные теплофизические условия и способствующие активизации процессов катодного разрушения оксидной пленки на свариваемых поверхностях и удалению пузырьков газа из расплава. Особенно эффективными являются методы, вызывающие динамические колебания расплавленного металла сварочной ванны и его интенсивное перемешивание в процессе сварки. Для этого осуществляют механические колебания электрода, присадочную проволоку подают прерывисто, накладывают на дугу кратковременные импульсы тока, используют для питания дуги асимметричный или модулированный ток, а также создают дополнительные магнитные поля.

Перемещения расплавленного металла при колебаниях электрода активизируются вследствие изменения силового воздействия дуги на ванну (нормальной составляющей давления дуги, обратно пропорциональной углу отклонения электрода от вертикали) [2]. Прерывистая подача присадочной проволоки способствует возникновению колебаний жидкого металла в результате периодических изменений объема металла, поступающего в головную часть ванны [3]. При наложении кратковременных импульсов тока колебания в расплаве возникают вследствие резкого увеличения давления дуги во время прохождения этих импульсов [4], а при сварке модулированным током — благодаря разнице силового давления дуги во время импульсов и пауз сварочного тока [5, 6]. Использование асимметричного тока также способствует интенсивному перемешиванию расплавленного металла, которое происходит в результате изменения давления дуги при смене полярностей тока [7].

При использовании внешних магнитных полей интенсивность перемешивания жидкого металла сварочной ванны повышается в результате их взаимодействия с объемной электромагнитной силой, возникающей в дуговом промежутке [8–14]. В зависимости от направления линий магнитной индукции магнитное поле может быть продольным или поперечным, а по времени воздействия — постоянным или переменным. Постоянное магнитное поле, воздействуя на дугу, вызывает изменение геометрических размеров и положения дуги, сохраняя их на протяжении всего времени



существования магнитного поля. Переменное магнитное поле периодически отклоняет столб дуги от вертикального положения. Направление отклонения дуги зависит от направления линий магнитной индукции (продольное магнитное поле отклоняет дугу перпендикулярно относительно оси шва, а поперечное — параллельно направлению сварки). При этом амплитуда и частота колебаний дуги зависят от напряженности магнитного поля и частоты перемены его полюсов. Наиболее простой способ получения переменного магнитного поля — использование соленоидов, на которые подают переменный ток [15].

Для создания механических колебаний электрода или прерывистой подачи присадочной проволоки необходимо использовать специализированные приспособления. Сварку пульсирующей дугой можно выполнять только с помощью специальных источников питания. Наиболее распространенные способы электромагнитного воздействия на дугу усложняют конструкцию горелки, затрудняют процесс сборки, препятствуют слежению за дугой и т. д.

Перспективным и простым в применении способом эффективного электромагнитного воздействия на дугу может быть пропускание электрического тока через участок присадочной проволоки. В результате взаимодействия переменного электромагнитного поля, возникающего вокруг дугового разряда, с постоянным или переменным электромагнитным полем вокруг присадочной проволоки дуга отклоняется от вертикального положения. В зависимости от значений и полярностей токов, проходящих через дуговой промежуток и участок присадочной проволоки, результирующая магнитной индукции будет изменять свое значение и направление, вызывая при этом изменение действующей на дугу силы Ампера и ее направление. Периодическая смена полярностей токов приводит к изменению положения дуги относительно вертикальной оси. Силовое воздействие сварочной дуги  $P_{дн}$  на ванну в этом случае будет изменяться в зависимости от угла отклонения ее относительно вертикали  $\alpha$  и определяться по формуле

$$P_{дн} = KI_d^2 \cos \alpha,$$

где  $P_{дн}$  — сила давления дуги при ее вертикальном расположении (вдоль нормали);  $K$  — коэффициент пропорциональности;  $I_d$  — сила тока в дуговом промежутке.

Отклонения дуги от ее вертикального положения вызывают колебания расплавленного металла сварочной ванны, изменяя условия его перемешивания, дегазации и кристаллизации. Применение аргонодуговой сварки неплавящимся электродом с колебаниями сварочной ванны,

обусловленными пропуском тока через присадку, позволит получать качественные сварные соединения с высокими показателями сопротивления их разрушению.

Стыковые соединения листов (400×200×4 мм) сплава 1420 (Al-5,4Mg-2,1Li) сваривали на переменном токе 195 А автоматической аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом от источника питания MW-450 («Фрониус», Австрия). Для перемещения горелки и подачи присадочной проволоки использовали установку АСТВ-2м. Скорость сварки составляла 12 м/ч, скорость подачи проволоки 75 м/ч, расход аргона 15 л/мин. В качестве присадочной проволоки использовали серийную сварочную проволоку СвАМг63 (Al-6,3Mg-0,6Mn-0,2Zr) диаметром 1,6 мм. Основные показатели прочности и пластичности основного металла по результатам испытаний пяти-семи образцов, вырезанных вдоль проката, следующие:  $\sigma_b = 463,8$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 352,5$  МПа;  $\delta = 5,8$  %;  $\alpha = 37^\circ$ ;  $KCV = 11,8$  Дж/см<sup>2</sup>.

Листы и проволоку перед сваркой подвергали химическому травлению в водном растворе NaOH (50 г/л), осветлению в 30%-м растворе HNO<sub>3</sub>, промывке и последующей сушке. Свариваемые кромки зачищали с трех сторон механическим способом на глубину не менее 0,15 мм. Для создания колебаний расплавленного металла сварочной ванны через участок присадочной проволоки пропускали постоянный или переменный ток  $I_p = 220$  А (рис. 1).

После сварки из полученных стыков изготавливали плоские образцы для определения их механических свойств в условиях одноосного растяжения и вырезали шлифы для исследований твердости, а также микро- и макроструктуры швов. Для определения физико-механических свойств сварных соединений при внецентренном растяжении использовали метод Канна, при котором испытывают плоские образцы размером 36×57 мм с глубоким острым надрезом и радиусом в его вершине 0,1 мм [16]. Скорость растяжения образцов с надрезом при испытании составляла 2 мм/мин (3,3·10<sup>5</sup> м/с). В процессе внецентренного растяжения на осциллографе записывали диаграммы нагрузка-деформация ( $P-f$ ), которые фиксировали моменты зарождения и развития тре-

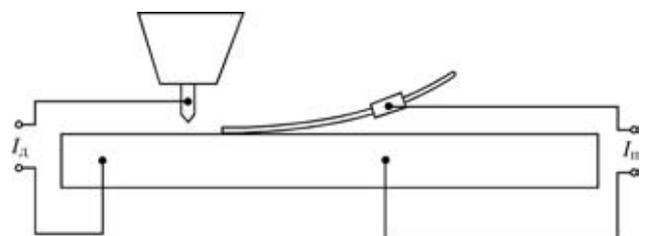


Рис. 1. Схема процесса аргонодуговой сварки неплавящимся электродом с колебаниями сварочной ванны, возникающими в результате пропускания электрического тока через участок присадочной проволоки



щин в исследуемых образцах до полного их разрушения. Диаграммы позволяют количественно оценить не только интенсивность напряжений в процессе деформации образца при внецентренном растяжении, но и протяженность стадии стабильного течения металла и работу, которую он затрачивает на отдельных этапах развития трещины. Условия испытания отвечали техническим требованиям ГОСТ 25.506. Экспериментальные результаты получены при испытании пяти образцов с использованием универсальной машины РУ-5.

По результатам испытаний определяли значения номинального напряжения  $\sigma_p$  и критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_c$ , а также удельной работы зарождения УРЗТ и распространения УРРТ трещины. Значения показателя  $J_c$  оценивали путем расчета функции изменения энергии деформации в зависимости от длины трещины, используя соотношение Меркли-Кортена [17].

Характер и особенности структурных изменений, которые происходят в металле при аргонодуговой сваре неплавящимся электродом в условиях колебаний сварочной ванны, изучали с использованием растрового электронного микроскопа JSM-840 с системой микроанализаторов Analytic Link — 860/500 Obtek при ускоряющем напряжении 15, 20, 30 кВ. Результаты анализа сравнивали с данными о характере изменения рельефа излома соединений, полученных в обычных условиях сварки. Такой комплексный подход позволил рассмотреть процессы, происходящие в металле шва.

Образцы с усилением шва, полученные как стационарной дугой, так и с колебаниями сварочной ванны, при одноосном растяжении разрушаются по зоне сплавления. Предел прочности сварных соединений, полученных обычной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, находится на уровне 326 МПа. Пропускание электрического тока через участок присадочной проволоки позволяет повысить этот показатель до 338 МПа.

Прочность металла шва, полученного стационарной дугой с присадочной проволокой СВАМг63, составляет в среднем 322 МПа, а с колебаниями

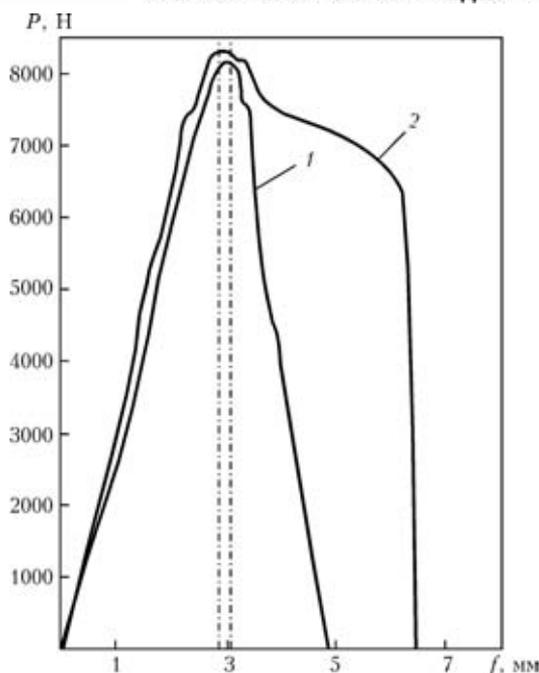


Рис. 2. Диаграммы испытания при внецентренном растяжении сварных соединений сплава 1420, полученных обычной стационарной дугой (1) и с колебаниями ванны (2)

ванны, обусловленными пропуском через нее постоянного или переменного тока, — 344 МПа. Однако при этом ударная вязкость швов снижается с 26 до 12 Дж/см<sup>2</sup>, а угол загиба сварных соединений с 90 до 88°. Следует отметить, что значения прочности и ударной вязкости металла швов, полученных при сварке с колебаниями ванны, находятся на уровне, достигаемом после искусственного старения образцов (120°, 8 ч), сваренных обычной стационарной дугой.

При внецентренном растяжении образцов, полученных обычной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, значение разрушающего напряжения металла шва  $\sigma_p$  находится в пределах 298...320 МПа, а в зоне сплавления — 279...300 МПа (таблица). Критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_c$ , при котором начинается самопроизвольное распространение трещины, для металла шва составляет 18...24, а для зоны сплавления — 17...19 МПа√м. Пропускание тока через присадочную проволоку в про-

**Показатели сопротивления разрушению сварных соединений сплава 1420 при испытании в условиях внецентренного растяжения**

Исследуемый участок шва	$\sigma_p$ , МПа	$K_c$ , МПа√м	$J_c$	УРРТ	KCV
			Дж/см <sup>2</sup>		
Металл шва	298...320	18...24	5,3...6,1	3,0...4,8	5,4...7,3
	379...402	34...50	7,1...12,4	8,3...13,6	8,5...12,0
Зона сплавления	279...300	17...19	4,2...5,5	3,9...4,8	4,9...6,3
	345...371	22...24	7,1...7,9	6,3...7,8	6,7...7,8

Примечание В числителе приведены значения показателей для образцов, полученных обычной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом, в знаменателе — с колебаниями сварочной ванны, возникающими в результате пропуска тока через присадку.

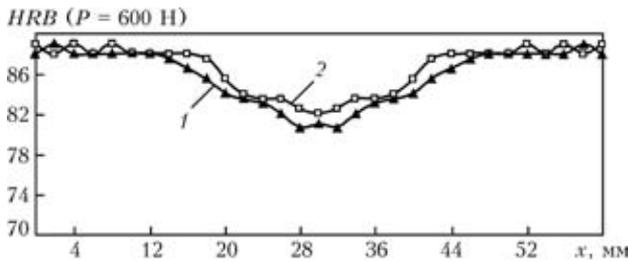


Рис. 3. Изменение твердости сварных соединений сплава 1420 толщиной 4 мм, полученных неплавящимся электродом с присадочной проволокой СвАМг63 обычной стационарной дугой (1) и с колебаниями ванны (2)

цессе сварки позволяет повысить уровень показателя  $\sigma_p$  до 379...402 МПа для металла шва и до 345...371 МПа для зоны сплавления. Энергетические показатели зарождения  $J_c$  и распространения трещины также возрастают более чем в 1,5 раза при сварке с колебаниями сварочной ванны по сравнению с обычной сваркой неплавящимся электродом (рис. 2). Показатель ударной вязкости  $KCV$  для металла шва увеличивается с 5,4...7,3 до 8,5...12 Дж/см<sup>2</sup>, а для зоны сплавления — с 4,9...6,3 до 6,7...7,8 Дж/см<sup>2</sup>.

При сварке сплава 1420 неплавящимся электродом стационарной дугой минимальная твердость в центральной части шва при  $P = 600$  Н составляет  $HRB$  84, а в металле ЗТВ  $HRB$  91 (рис. 3). Колебания сварочной ванны, обусловленные пропуском тока через участок присадочной проволоки, способствуют повышению этих значений до  $HRB$  87 в шве и до  $HRB$  92 в металле ЗТВ.

Повышение прочности и снижение степени разупрочнения швов и сварных соединений в целом можно объяснить измельчением структуры швов при сварке с колебаниями сварочной ванны. Основной объем шва, сваренного с колебаниями ванны, составляют мелкие равноосные дендриты, намного меньшие по размеру от образующихся в швах, сваренных стационарной дугой (рис. 4). Уменьшение размеров зерен ограничивает микротрещину эффективными барьерами — границами зерен и кристаллитов. Вследствие этого зародившаяся микротрещина остается в пределах докритических размеров или изменяет

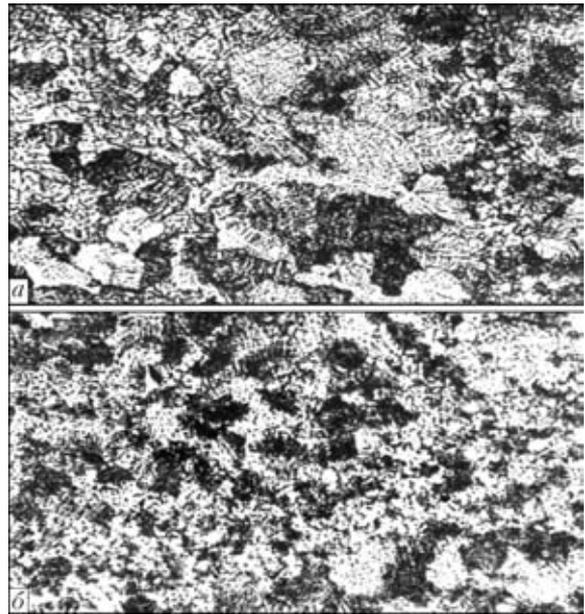


Рис. 4. Микроструктура металла шва ( $\times 100$ ), полученного при аргодуговой сварке неплавящимся электродом стационарной дугой (а) и с колебаниями ванны (б)

свое направление при последующем распространении под воздействием внешних сил. Подобный характер разрушения может быть связан с тем, что в мелкозернистом металле у границ зерен (кристаллитов) скапливается меньше дефектов (дислокаций) [16].

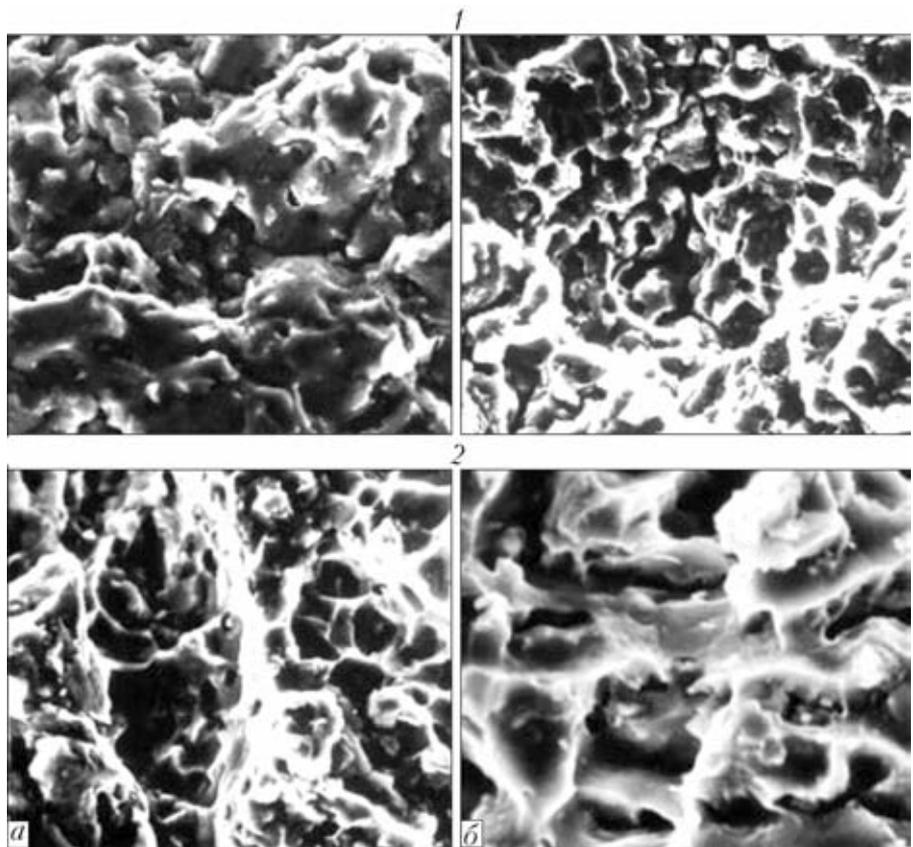


Рис. 5. Фрактограммы поверхности разрушения ( $\times 500$ ) шва (а) и зоны сплавления (б) образцов, полученных при сварке сплава 1420 с присадочной проволокой СвАМг63 обычной стационарной дугой (1) и с колебаниями ванны (2)



Данные фрактографического анализа изломов образцов также подтверждают, что увеличение показателей сопротивления разрушению обусловлено образованием более однородной мелкодисперсной структуры в металле шва и зоне сплавления (рис. 5). На образцах, полученных стационарной дугой, отмечается большее количество хрупких участков, а доля интеркристаллитного рельефа составляет примерно 50 % площади излома. Применение сварки с колебаниями сварочной ванны способствует увеличению доли интеркристаллитного рельефа более чем в 1,5 раза.

Физической предпосылкой повышения механических характеристик сварных соединений являются динамические колебания сварочной ванны, возникающие при пропускании тока через присадочную проволоку в процессе сварки. Формирование мелкокристаллической структуры металла шва и зоны сплавления приводит к увеличению суммарной протяженности границ кристаллов, что затрудняет резкое повышение концентрации напряжений и тем самым сдерживает распространение зародившихся микротрещин.

## Выводы

1. Колебания расплавленного металла сварочной ванны, обусловленные постоянным изменением давления дуги вследствие отклонения ее от вертикального положения, способствуют интенсивному перемешиванию основного и присадочного металла, дегазации расплава, разрушению включений оксидной пленки и формированию мелкокристаллической структуры швов, обеспечивая при этом стабильно высокие механические свойства швов и сварных соединений в целом.

2. Применение сварки неплавящимся электродом с колебаниями сварочной ванны способствует формированию более однородной мелкокристаллической структуры швов сплава 1420, что повышает в 2 раза уровень критического коэффициента интенсивности напряжений, а также в 1,5...2 раза стойкость металла при разрушении на этапе распространения трещины.

Physico-chemical characteristics are compared of the joints of high-strength aluminium alloy 1420 produced by nonconsumable electrode welding in argon by a regular stationary arc and by an arc deflected from the vertical axis at current passing through the filler wire. Values of welded joint strength and bending angle, as well as strength and impact toughness of weld metal are determined, when batch-produced welding wire SvAMg63 was used. Values of fracture toughness were established, which determine the level of reliability of welded joints in structure service. Features of microstructure of welds and their hardness distribution are analyzed.

1. *Лабура Т. М., Ищенко А. Я., Козум Н. С.* Статическая трещиностойкость сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов // Автомат. сварка. — 1990. — № 4. — С. 9–11.
2. *Славин Г. А.* Формирование дезориентированной структуры металла шва при наложении низкочастотных возмущений на сварочную ванну // Свароч. пр-во. — 1980. — № 6. — С. 3–5.
3. *Аргоно-дуговая сварка алюминиевых сплавов с прерывистой подачей присадочной проволоки / Г. Л. Зубриенко, Н. П. Галкин, Д. А. Гапонов и др.* // Там же. — 1972. — № 4. — С. 46–47.
4. *Оптимизация параметров режимов ручной и автоматической сварки тонколистовых алюминиевых сплавов с наложением на дугу кратковременных импульсов тока / Г. А. Славин, Н. М. Трохинская, В. И. Рязанцев и др.* // Там же. — 1986. — № 1. — С. 14–15.
5. *Влияние параметров низкочастотной модуляции разнополярного тока прямоугольной формы на структуру шва при сварке алюминиевых сплавов / А. Я. Ищенко, А. Г. Покляцкий, А. В. Лозовская и др.* // Автомат. сварка. — 1990. — № 9. — С. 23–27.
6. *Современные способы дуговой сварки алюминиевых сплавов (Обзор) / А. Я. Ищенко, И. В. Довбищенко, В. П. Будник и др.* // Там же. — 1994. — № 5/6. — С. 35–37.
7. *Hiroshi M., Yoshinori H., Hiroshi M.* Rectangular wave AC TIG arc welding of aluminium alloy // Quarterly J. Jap. Welding Soc. — 1989. — № 1. — P. 63–69.
8. *Черныш В. П.* Использование магнитных полей при электродуговой сварке // Вопросы механики и машиностроения. — Киев: Киевский ун-т. — 1964. — С. 146–152.
9. *Бачелис И. А.* Магнитное управление сварочной дугой // Свароч. пр-во. — 1965. — № 1. — С. 17–19.
10. *Бачелис И. А., Варламов И. В.* Перемещение электрической дуги в магнитном поле // Автомат. сварка. — 1966. — № 5. — С. 45–48.
11. *Мечев В. С.* Амплитуда колебаний электрической дуги в переменном магнитном поле // Свароч. пр-во. — 1968. — № 3. — С. 9–11.
12. *Jayarajen T. N., Jackson C. E.* Magnetic control of gas tungsten-arc welding process // Welding J. — 1972. — **51**, № 8. — P. 377–385.
13. *Wendler H. D.* Die magnetische Beeinflussung des Schweißlichtbogens. — Otto-von-Guericke, Magdeburg, 1970. — **14**, № 7. — S. 741–744.
14. *Бродягина И. В.* Дуговая сварка алюминиевых сплавов с использованием магнитных полей // Свароч. пр-во. — 1998. — № 9. — С. 48–51.
15. *Черныш В. П.* Электромагнитное перемешивание сварочной ванны и качество наплавленного металла // Вестн. КПИ. Сер. машиностроение. — 1968. — № 5. — С. 61–67.
16. *Разрушение / Под ред. Г. Т. Либовица.* — Т.6. Разрушение металлов; пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — 496 с.
17. *Статическая прочность и механика разрушения сталей / Под ред. В. Даля, В. Антона; пер. с нем.* — М.: Металлургия, 1986. — 565 с.

Поступила в редакцию 15.07.2005