

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
*«Металлургия – 2022»***

***Труды
XXIII Международной научно-практической конференции***

23– 25 ноября 2022 г.

Часть 2

**Новокузнецк
2022**

Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 **Металлургия : технологии, инновации, качество : труды XXIII Международной научно-практической конференции. В 2 частях. Часть 2 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 410 с. : ил.**

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

**АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА
ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»

АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»

АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»

ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЬШАНЬ, КНР

ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»

ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

legrove, P. Wire + Arc Additive Manufacturing. Mater. Sci. Technol. 2016, 32, 641–647.

11. Xu, F.; Lv, Y.; Liu, Y.; Shu, F.; He, P.; Xu, B. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Inconel 625 Alloy during Pulsed Plasma Arc Deposition Process. J. Mater. Sci. Technol. 2013, 29, 480–488.

12. Bressan, J.; Daros, D.; Sokolowski, A.; Mesquita, R.; Barbosa, C. Influence of hardness on the wear resistance of 17-4 PH stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing. J. Mater. Process. Technol. 2008, 205, 353–359.

13. Stützer, J.; Totzauer, T.; Wittig, B.; Zinke, M.; Jüttner, S. GMAW Cold Wire Technology for Adjusting the Ferrite–Austenite Ratio of Wire and Arc Additive Manufactured Duplex Stainless Steel Components. Metals 2019, 9, 564.

14. STAINLESS STEEL TECHNICAL HANDBOOK.ESAB [электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.url: https:// www. alas-kuul.ee/media/wysiwyg/CMS/Stainless%20handbook.pdf](http://www.url:https://www.alas-kuul.ee/media/wysiwyg/CMS/Stainless%20handbook.pdf). - 09.07.2021.

15. Zimmermann R., Günther K. Metallurgie und Werkstofftechnik: ein Wissensspeicher Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1977. 679 pp.

УДК 538.9:[519.876.5:621.79]

ВИХРЕВОЕ ТЕЧЕНИЕ В КАПЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРОСВАРКЕ

**Сарычев В.Д., Чинахов Д.А., Грановский А.Ю.,
Устюжанин С.В., Сарычев Д.В., Коновалов С.В.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, chinakhov_da@mail.ru*

Аннотация. Проведено численное моделирование формирования капель в пакете Comsol Physics. Выявлено формирование вихревой зоны вблизи расплавленного торца электрода при формировании капли. Полученные данные могут стать подмоделью комплексного проекта сварка и других технологических процессов.

Ключевые слова: сварка, формирование капель, численная модель, уравнения Навье-Стокса и Максвелла, Comsol Physics.

VORTEX FLOW IN A DROP DURING ELECTRIC WELDING

Sarychev V.D., Chinakhov D.A., Granovsky A.Yu., Ustyuzhanin S.V., Sarychev D.V., Kononov S.V.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, chinakhov_da@mail.ru*

Abstract. Numerical modeling of droplet formation in the Comsol Physics package is carried out. The formation of a vortex zone near the molten end of the electrode during the formation of a drop was revealed. The data obtained can become a model for a complex welding project and other technological processes.

Keywords: *welding, droplet formation, numerical model, Navier-Stokes and Maxwell equations, Comsol Physics.*

Процесс сварки плавящимся электродом можно представить в виде четырех основных этапов: формирование капли на торце электрода, течение газоплазменной гетерогенной струи, формирование ванны расплава, кристаллизация и структурно-фазовые превращения в металле шва. Для повышения качества технологий сварки, используется компьютерное моделирование как отдельных этапов так и всего процесса сварки в целом [1–3]. Центральной задачей является повышение качества управления процессом образования и отрыва капли. В [4] рассмотрены нерешенные вопросы и будущие направления исследования сварочной дуги, указано, что механизм формирования и его моделирование требуют дальнейших исследований и разработки. Обозначенная тема исследований весьма актуальна для аддитивных электродуговых технологий. Определение технологических режимов для качественного формирования изделия с максимально гладкой поверхностью для каждого материала является новой отдельной задачей, успешное решение которой определяет надежность и долговечность выращенного изделия.

Цель настоящей работы - моделирование и анализ распределения гидродинамического течения в капле электродного металла на различных этапах ее формирования.

Для моделирования и анализа вихревых течений в капле расплавленного металла использовали проект моделирования формирования капель вблизи торца электрода, созданный в Comsol Physics [5]. В модели используются уравнения непрерывности, Навье-Стокса с учетом электромагнитных сил, энергии, непрерывности электротока и уравнение для векторного потенциала [6-7]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \bar{v} = 0, \quad \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} = \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu_e \Delta \bar{v} + \bar{j} \times \bar{B} + \bar{g}, \\ \frac{\partial H}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla H = \nabla(k \nabla T) + |\bar{j}|^2 / \sigma, \quad \nabla(\sigma \nabla V) = 0, \quad \nabla^2 \bar{A} = -\mu_0 \bar{j}. \end{aligned} \quad (1)$$

где \bar{v} – вектор скорости;

ρ – плотность;

p – давление,

\bar{j} – плотность электрического тока;

$\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$ – вектор магнитной индукции;

\bar{g} – ускорение свободного падения;

\bar{A} – векторный потенциал;

H – энтальпия;

T – температура;

V – электрический потенциал;

ν_e – кинематическая вязкость;

σ – электропроводность;

μ_0 – магнитная проницаемость.

Эффективная вязкость задается как

$$v_e = \begin{cases} \nu, & T \geq T_l, \\ 10^8 \nu, & T < T_l. \end{cases} \quad (2)$$

Для постановки граничных условий обратимся к рисунку 1, на котором AD – ось симметрии (осесимметричный случай), AB – изменяющаяся по времени граница расплавленного металла, соответствующая контакту жидкого металла с плазмой электрической дуги, DC – сечение электрода, находящегося в твердом состоянии, CB – боковая поверхность электрода.

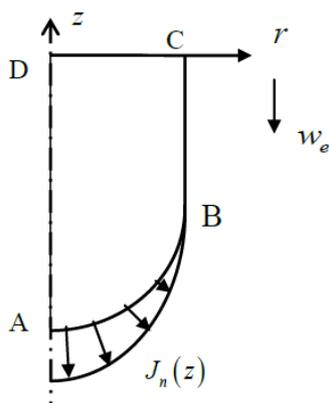


Рисунок 1 - Схема расчета

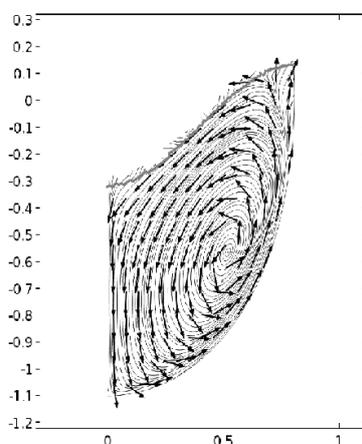


Рисунок 2 - Течение внутри расплавленного электрода

Рассматривается осесимметричная задача с осью симметрии AD в центре электрода. На границе CD задается напряжение и скорость движения электрода. Граница AB является активной поверхностью, принимающей тепловое воздействие плазменной струи. Непосредственно течение плазменной струи в данной постановке не моделируется, поэтому ее воздействие на электрод будем моделировать через постановку соответствующих граничных условий. Плотность электрического тока на поверхности аппроксимируем функцией линейно зависящей от координаты z . Весь ток распределяется по активной поверхности AB электрода как показано на рисунке 1.

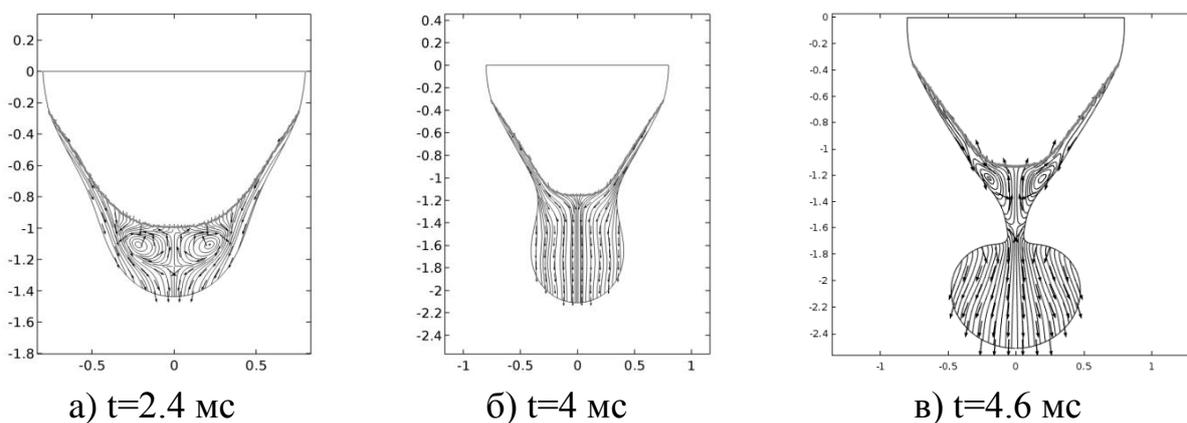


Рисунок 3 - Линии тока в расплавленном электроде в разные моменты времени

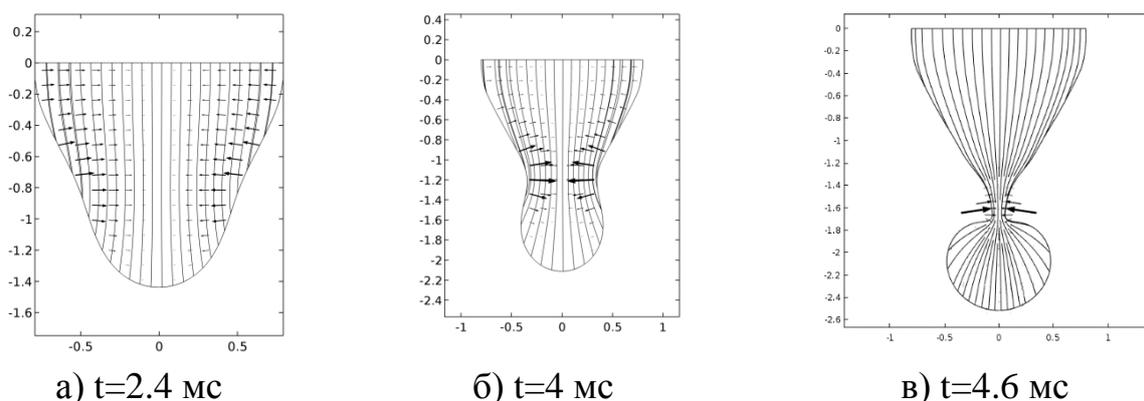
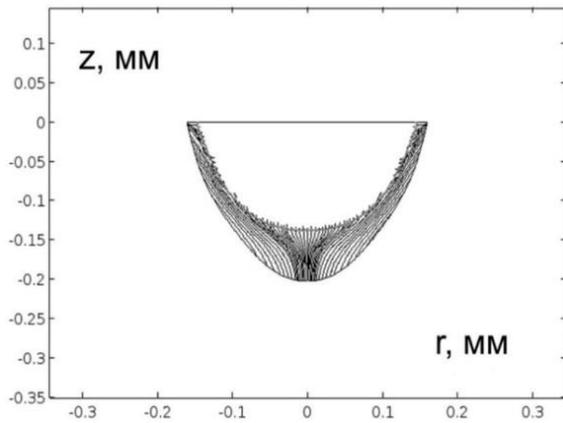


Рисунок 4 - Линии электрического тока и векторное поле силы Лоренца

На рисунках 2 – 5 приведены результаты расчетов. Как видно из рисунка 3 (а) зарождается вихревое течение в расплавленной зоне электрода, расплавленный металл стекает вниз электрода и начинается формирование капли при этом вихревое течение пропадает (рисунок 3,б). Из рисунка 3,в следует, что перед отрывом капли идёт зарождение вихревой зоны, что приводит к зарождению новой капли. Линии тока расплава в различные моменты времени в двух режимах представлены на рисунке 5. Из представленных расчетных данных следует, что формирование вихря в расплавленном металле вблизи электрода реализуется как в глобулярном, так и в спрей режиме. Из экспериментальных данных следует, что спрей-режим реализуется в том случае, когда из капли «выстреливается» тонкая струйка, которая впоследствии дробится на мелкие капли. Выстраивание тонкой струи наблюдается в других экспериментах и является основой формирования капель в микрофлюидике [8-9].

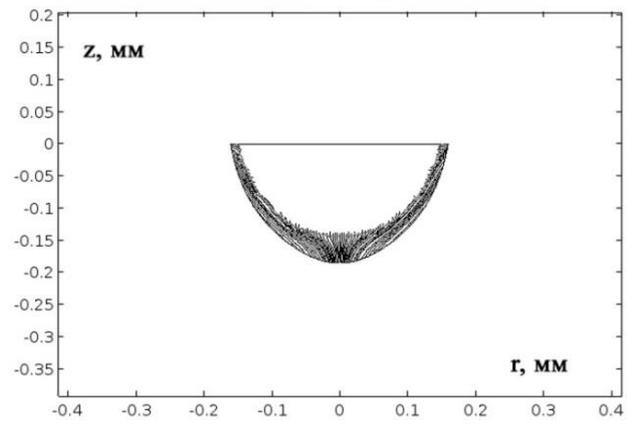
При сварке в защитном газе обнаружены принципиально разные распределения марганца, что можно связать с особенностью развития процессов вблизи электрода [10], которые должны развиваться на фоне развития вихревой зоны. Один из способов получения высокэнтальпийных сплавов (ВЭС) состоит в плавлении трёх электродов и формировании капель [11], поэтому разработанная модель будет полезной для создания и прогнозирования новых ВЭС.

Глобулярный режим, ток 200А

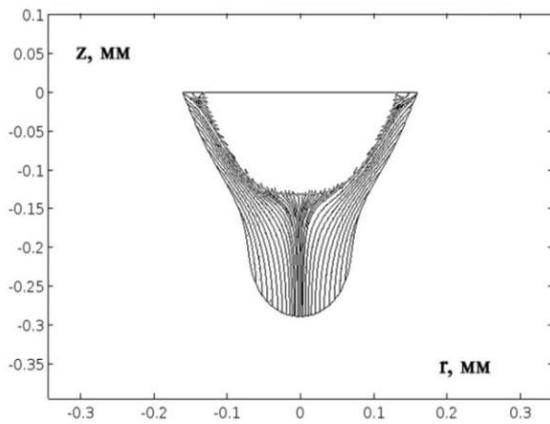


а) 58 мкс

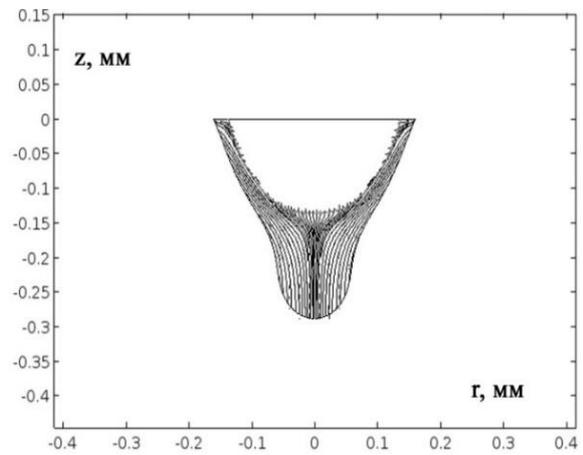
Спрей режим, ток 300А



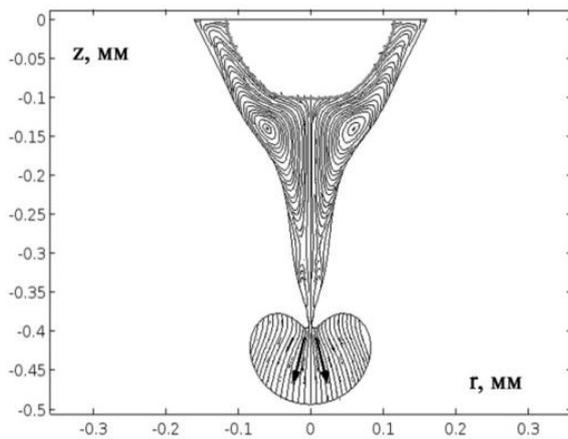
31 мкс



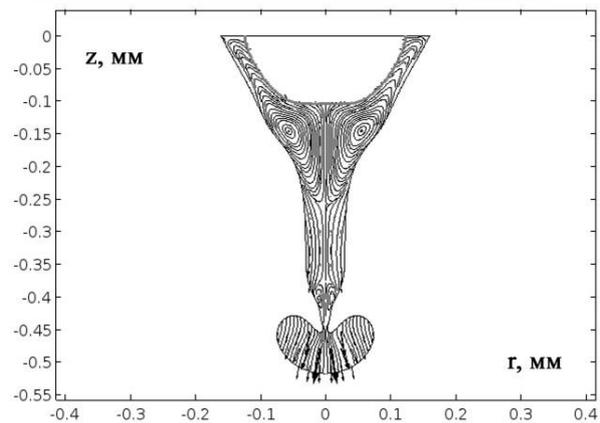
б) 98 мкс



59 мкс



в) 151 мкс



91 мкс

Рисунок 5 - Линии тока в расплаве для различных режимов

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10229).

Библиографический список

1. Aziz S. D. Impact, recoil and splashing of molten metal droplets. International journal of heat and mass transfer. 2000. V.4. No. 16. 2841–2857p.
2. Coussot P. Yield stress fluid flows: A review of experimental data // Journal of NonNewtonian Fluid Mechanics, 2014, 211. 31–49p.
3. Haidar J. J. Predictions of metal droplet formation in arc welding. Journal of Physics D: Applied Physics. 1996. V. 29. No.12: 2951-2960.
4. Murphy A.B. A Perspective on Arc Welding Research: The Importance of the Arc, Unresolved Questions and Future Directions / Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. V.5. No 1, 471-489 P.
5. Устюжанин С.В., Грановский А.Ю., Сарычев В.Д. Модели формирования капель на электроде при электросварных технологиях // Наука и молодежь: Проблемы, Поиски, Решения. 2017. – С. 39-42.
6. Zhao Y., Chung H. Numerical simulation of droplet transfer behavior in variable polarity gas metal arc welding. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. 111, 1129–1141P.
7. Wang W. K. Hou, S. J. Hu. Modeling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding // Journal of Physics D: Applied Physics. 2003. Vol. 36. № 9. 1143–1152 P.
8. Ganãñ-Calvo, A. M. Generation of steady liquid micro threads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams. Phys. Rev. Lett. // 1998. V.80, 285–288 P.
9. Anna S. L., Bontoux N., Stone H. A. Formation of dispersions using "flow focusing" in microchannels. Applied Physics Letters, 2003. V. 82. Nu 3. 364–366 P.
10. Чинахов Д.А. Влияние расхода активного защитного газа и сварочного тока на содержание марганца и кремния в металле сварного шва // Тяжелое машиностроение.–2013. – № 8. – С. 39–44.
11. Громов В.Е., Коновалов С.В., ЮФ Иванов Ю.Ф. и др. Высокоэнтропийные сплавы. Новокузнецк. 2021, 178с.

Научное издание

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**
«Металлургия – 2022»

Труды XXIII Международной научно-практической конференции

Часть 2

Под общей редакцией А.Б. Юрьева

Технический редактор	Г.А. Морина
Компьютерная верстка	Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 16.11.2022 г.

Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офисная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 24,0 Уч.-изд. л. 26,4 Тираж 300 экз. Заказ № 296

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Издательский центр СибГИУ