



Оригинальная статья

УДК 669.187

DOI 10.17073/0368-0797-2021-7-530-535



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КАПЛЮ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

И. В. Чуманов, И. А. Алексеев, Д. В. Сергеев

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), филиал в г. Златоуст (Россия, 456217, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева, 16)

**Аннотация.** Представлено математическое и компьютерное моделирование поведения капель жидкого электродного металла при протекании процесса электрошлакового переплава (ЭШП) на постоянном источнике тока. Изучение воздействия электрического поля, создаваемого постоянным током, позволило показать отклонение траектории движения капли от оси электрода. Поток электронов и капли электродного металла подвергаются воздействию электромагнитных сил, что приводит к их смещению относительно оси переплавляемого электрода. Данное воздействие влечет за собой дестабилизацию ванны жидкого металла и кристаллическую неоднородность. В свою очередь, внешнее воздействие на протекание процесса ЭШП может дать возможность стабилизации ванны жидкого металла даже с использованием постоянного тока. В данном качестве могут выступать центробежные силы, которые возникают в случае применения технологии с вращением расходного электрода вокруг собственной оси. Для установления оптимальных показателей скорости вращения необходимо оценить величину воздействия магнитного поля, возникающего в процессе переплава на постоянном токе. Моделирование проводилось с использованием программного пакета Ansys Fluent 16.0 на примере переплава стали 12Х18Н10Т под флюсом АНФ-6. Алгоритм вычисления Ansys Fluent основан на методе конечных элементов. В данной работе математический аппарат изменению не подвергался и использовался в первоначальном виде. Применялся метод магнитной индукции. База сведений о протекающем процессе строилась по сетке конечных элементов с определенным, но достаточным уровнем адекватности и качества. Каждый элемент содержит сведения о модели в данной точке, заданные для данного процесса моделирования. Выявлено изменение траектории движения капли электродного металла электрическим полем с противоположного направления, по которому стекает капля. Средняя длина пути, преодолеваемого каплей жидкого металла от оси кристаллизатора до внутренней поверхности, составляет от 5 до 15 см. Смоделировано движение капли электродного металла без наложенного внешнего магнитного поля. Моделирование позволило определить (оценить) направление движения капель электродного металла и показатель необходимой внешней силы для стабилизации ванны жидкого металла при протекании процесса ЭШП на постоянном токе, равный 0,067 Н.

**Ключевые слова:** моделирование, электрошлаковый переплав, постоянный ток, джоулево тепло, кристаллизация, энергоэффективность, магнитные силы

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90081.

**Для цитирования:** Чуманов И.В., Алексеев И.А., Сергеев Д.В. Моделирование поведения электромагнитных сил постоянного тока, действующих на каплю жидкого металла в процессе электрошлакового переплава // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 7. С. 530–535. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-530-535>

Original article

## MODELING THE BEHAVIOR OF DIRECT CURRENT ELECTROMAGNETIC FORCES ACTING ON A DROP OF LIQUID METAL DURING ELECTROSLAG REMELTING

I. V. Chumanov, I. A. Alekseev, D. V. Sergeev

Zlatoust Branch of the South Ural State University (16 Turgeneva Str., Zlatoust, Chelyabinsk Region 456217, Russian Federation)

**Abstract.** The article presents mathematical and computer modeling of the behavior of liquid electrode metal drops during the process of electroslag remelting (ESR) at a constant current source. The study of the effect of electric field created by direct current allowed us to show the deviation of the drop trajectory from the electrode axis. The flow of electrons and drops of the electrode metal are exposed to electromagnetic forces, which leads to their displacement relative to the remelted electrode axis. This effect entails destabilization of the liquid metal bath and crystal heterogeneity. In turn, the use of external influence on the flow of ESR process can make it possible to stabilize the liquid metal bath even with the use of direct current. Centrifugal forces can act as such forces. They can arise when implementing the technology with the consumable electrode rotation around its own

axis. To establish the optimal parameters of rotation speed, it is necessary to estimate the magnitude of impact of the magnetic field that occurs during direct current remelting process. The modeling was carried out using the Ansys Fluent 16.0 software package on the example of remelting 12Kh18N10T steel under the flux ANF-6. The algorithm for calculating of Ansys Fluent is based on the finite element method. In this paper, the mathematical apparatus was not changed and was used in its initial form. The method of magnetic induction was used. The database of information about the ongoing process was built on a grid of finite elements with certain, but sufficient level of adequacy and quality. Each element contains information about the model at a given point, specified for this modeling process. We have revealed the change in the trajectory of the electrode metal drop by electric field from the opposite direction along which the drop flows. The average length of the path traversed by liquid metal drop from the mold axis to the inner surface is from 5 to 15 cm. The motion of an electrode metal drop without an external magnetic field was simulated. This simulation made it possible to determine (estimate) the direction of movement of electrode metal drops and the indicator of necessary external force to stabilize the liquid metal bath during ESP process at direct current equal to 0.067 N.

**Keywords:** modeling, electrosag remelting, direct current, Joule's heat, crystallization, energy efficiency, magnetic forces

**Funding:** The reported study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-38-90081.

**For citation:** Chumanov I.V., Alekseev I.A., Sergeev D.V. Modeling the behavior of direct current electromagnetic forces acting on a drop of liquid metal during electrosag remelting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 7, pp. 530–535. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-530-535>

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс электрошлакового переплава (ЭШП) на сегодняшний день является неотъемлемой частью производства специальных сталей и сплавов, которые находят широкое применение в авиационной, атомной и нефтегазовой промышленности [1, 2]. Во время протекания процесса ток проходит от электрода к поддону через ванну жидкого шлака, обладающего высоким сопротивлением, что вызывает нагрев джоулевым теплом. Вследствие этого происходит оплавление электрода. В результате образуется пленка жидкого металла на торце электрода, что приводит к формированию капли жидкого металла под действием гравитационных сил. После отрыва капля металла проходит через менее плотный расплавленный шлак, формируя жидкую ванну расплавленного металла. Процесс позволяет получить не только металл, обладающий высокими показателями чистоты по неметаллическим включениям, но и обеспечить высокий уровень десульфурации [3 – 9]. В то же время, процесс ЭШП является энергозатратным и повышение его энерго- и теплоэффективности является актуальной задачей для исследований как в России, так и за рубежом [10]. Нынешний уровень развития технологической базы позволяет смоделировать различные процессы, происходящие во время переплава с целью установления оптимальных условий [11 – 13], что особенно важно при высоких температурах, оптически не прозрачных средах и химически активных фазах. Простым и энергоэффективным способом ЭШП является использование одноэлектродной схемы переплава. Одним из вариантов повышения энергоэффективности одноэлектродной схемы переплава является переход от переменного источника тока к постоянному [14]. В то же время, переменный ток наиболее распространен, это связано с большей стабильностью ванны жидкого металлического расплава в сравнении с процессом ЭШП на постоянном токе. Нестабильность жидкой ванны при переплаве на постоянном токе связана с воздействием электромагнитного поля на

подаваемый электродный металл [15]. Согласно теории о вихревых токах, токопроводящие материалы, движущиеся внутри магнитного поля, порождают внутри себя электрический ток. Поле, создаваемое постоянным током при работе установки ЭШП, лежит в плоскости, перпендикулярной оси установки. Вектор магнитной индукции направлен по правилу буравчика. Движение токопроводящего материала внутри постоянного магнитного поля порождает внутри него электрический ток, вихревые токи или токи Фуко. Капли металла имеют заряд, аналогичный полярности переплавляемого электрода. Нестабильность приводит к неоднородной кристаллической структуре металла, появлению дефектов на дальнейших стадиях обработки металла давлением. Стабилизировать ванну жидкого расплава можно за счет воздействия внешних сил на жидкий электродный металл [16]. Возможно воздействовать на жидкий металл путем создания внешнего электрического поля вокруг кристаллизатора. Однако воздействие путем создания электрического поля не позволяет в полной мере гарантировать стабильность процесса, более стабильным является способ создания центробежных сил, возникающих вследствие применения технологии вращения расходуемого электрода [17]. Для определения оптимальной величины компенсирующего воздействия было необходимо вычислить величину силы Лоренца. В данном случае компенсирующим воздействием для сил Лоренца является поле гравитационных сил, имеющее в себе центробежные силы. Вращение электрода необходимо для создания гравитационного поля.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

Взаимодействие между потоком жидкости и магнитным полем может быть описано двумя фундаментальными явлениями: индукцией электрического тока в движущемся токопроводящем материале в пределах магнитного поля и действием силы Лоренца, как результат взаимодействия электрического тока с магнитным полем.

Для определения величины электромагнитной силы, возникающей во время протекания ЭШП на постоянном токе, проведено моделирование с использованием программного комплекса Ansys Fluent, который является универсальным инструментом в области изучения динамики жидкостей и может использоваться для решения задач металлургического профиля [18]. Ansys Fluent позволяет решать задачи с разным количеством фаз различного типа по математическому описанию с учетом межфазного трения, турбулентности, плавления, кристаллизации, внедрения дисперсных частиц и др. В частности, в структуре Ansys присутствует опциональный модуль – Magnetohydrodynamics, который акцентирован на решение задачи поведения токопроводящих жидкостей в создаваемом внешнем магнитном или электрическом поле, симулируя движение электрического тока в проводнике [19, 20].

Для облегчения процесса настройки сетки ее внутренние области и грани разделялись на категории. Это позволило манипулировать целыми массивами клеток при инициализации процесса и корректно считывать данные о модели в ходе процесса симуляции. Каждая клетка хранит некоторые параметры среды в численном виде. Благодаря итерационному (многократно повторяющемуся) процессу моделирования осуществляется изменение свойств модели в каждой клетке. Это происходит за счет пропускания значения каждой клетки через специальный алгоритм решателя, в который включены формулы, описывающие физическое состояние среды. Итерирование в каждой клетке через решатель с заданным временным шагом позволяет получить изменяющуюся картину событий в модели, зависящую от текущего состояния данных в каждой клетке модели.

В существующей модели в качестве задающего начального значения указывается внешнее магнитное поле, которое является составляющей полного магнитного поля для каждой клетки. За каждый проход решателя в каждой клетке происходит пересчет всех ее данных о магнитном поле, электрическом поле, плотности тока, силах Лоренца и пр. В местах, где возможно изменение картины, происходит пересчет состояния модели. Такие места в модели определяются исключительно значениями в клетках сетки, описывающих состояние системы в данный момент.

Для получения конечной картины событий в компьютерной модели проводилась ее инициализация и далее она пропусклась через правильно настроенный решатель. Многократное итерирование компьютерной модели дало результат с некоторыми допустимыми отклонениями (уровнем сходимости решения) в конкретный момент времени. С математической точки зрения сетка конечных элементов – это обыкновенная многомерная матрица с множеством элементов, каждый из которых характеризуется набором переменных, описывающих

текущее состояние моделируемого процесса и поведение веществ в нем.

Принципиальная схема моделирования заключается в следующем: в шлаковую ванну, ограниченную справа, слева, снизу медными стенками и газовой фазой, дозированно подается жидкий металл, имитируя формирование капли. Шлаковая ванна находится внутри наведенного магнитного поля, которое создает электрический ток в движущихся каплях металла. Подача происходит с интервалом в одну секунду между началом каждого цикла и длится 0,1 секунды. Данные для моделирования приведены ниже:

Параметр	Значение
Атмосфера	
Плотность	1,225 кг/м <sup>3</sup>
Динамическая вязкость	1,79·10 <sup>-5</sup> Па·с
Электропроводность	1 см/м
Магнитная проницаемость	1,257·10 <sup>-6</sup> Гн/м
Шлак (аналог АНФ-6)	
Плотность	2880 кг/м <sup>3</sup>
Динамическая вязкость	0,006 Па·с
Электропроводность	500 см/м
Магнитная проницаемость	1,257·10 <sup>-6</sup> Гн/м
Металл (Аналог стали 12Х18Н10Т)	
Плотность	7800 кг/м <sup>3</sup>
Динамическая вязкость	0,006 Па·с
Электропроводность	7,69·10 <sup>6</sup> см/м
Магнитная проницаемость	1,257·10 <sup>-4</sup> Гн/м
Диаметр электрода	60 мм
Медь	
Плотность	8978 кг/м <sup>3</sup>
Электропроводность	5,8·10 <sup>7</sup> см/м
Магнитная проницаемость	1,257·10 <sup>-6</sup> Гн/м
Силы поверхностного натяжения	
Газ – Шлак	0,45 Н/м
Газ – Сталь	1,5 Н/м
Шлак – Сталь	1,1 Н/м

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Под действием внешнего магнитного поля капли жидкой стали двигаются по определенной траектории, которая повторяется каждой следующей каплей с некоторым отклонением. Раскадровка процесса моделирования представлена на рис. 1. В ходе эксперимента капли меняли первоначальное направление движения (т. е. в качестве начального направления была выбрана правая стенка, которая плавно сменилась на левую). Видно, что капли жидкой стали не касаются медной стенки кристаллизатора и начинают менять направление на противоположное. При рассмотрении распре-

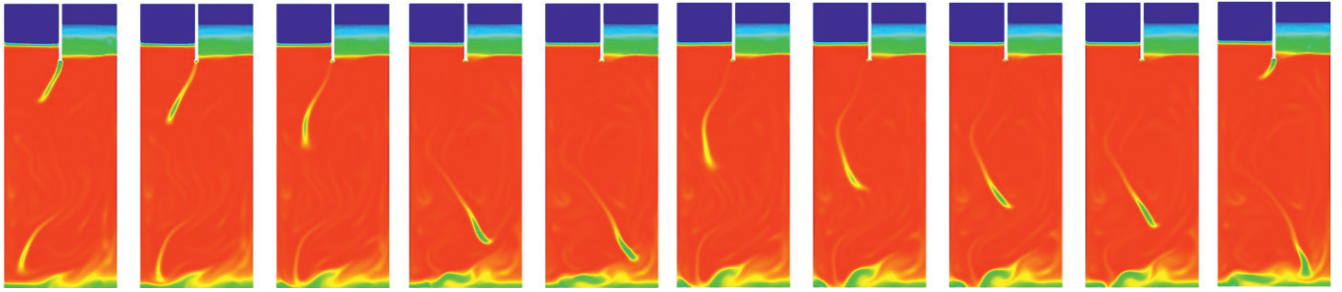


Рис. 1. Результаты раскадровки моделирования движения капли

Fig. 1. Results of storyboard of drop movement modeling

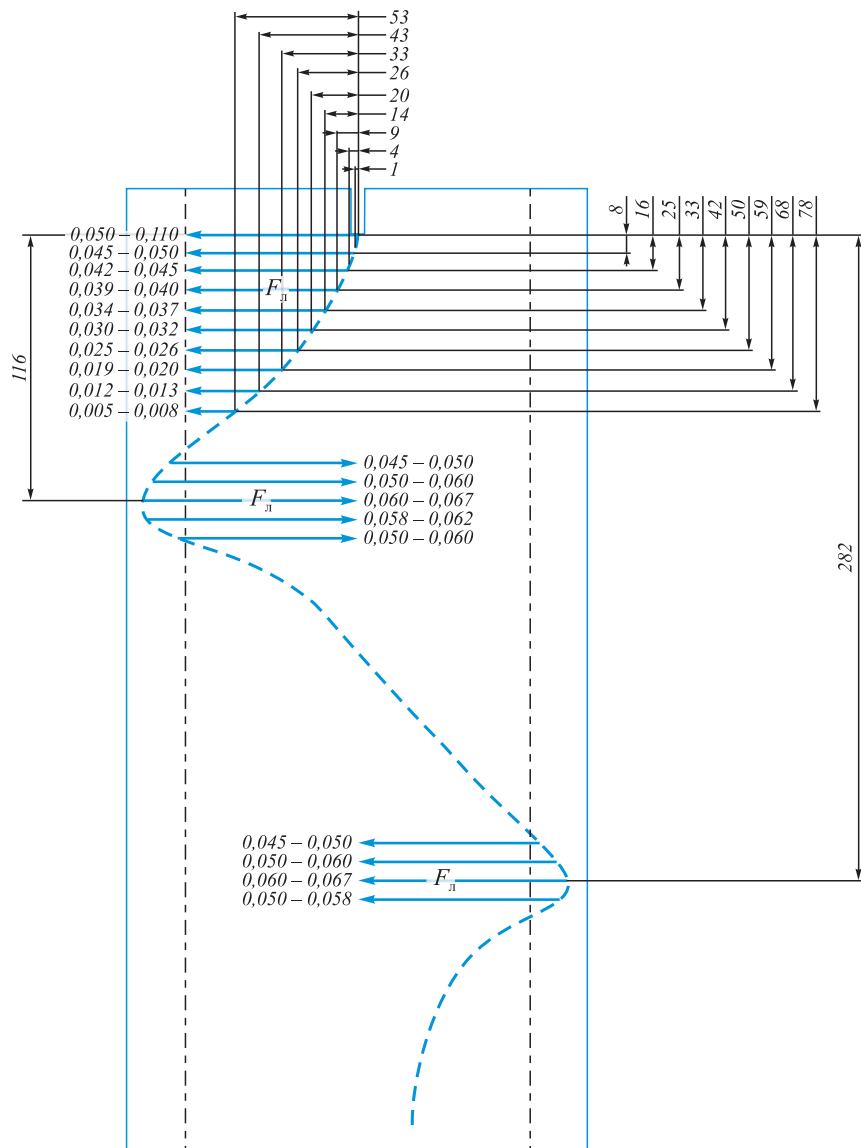


Рис. 2. Значения силы Лоренца, действующей на каплю электродного металла

Fig. 2. Values of the Lorentz force acting on the electrode metal drop

деления силы Лоренца в векторном представлении наблюдается появление и рост векторов, направленных перпендикулярно стенке в противоположную от вектора скорости движения капли (рис. 2).

При каждом изменении направления движения капли наблюдается электрическое поле с противоположного направления ее движения, что можно расценить как своеобразный подпор, по которому скользит

капля. В среднем длина пробега капли от оси кристаллизатора до ближайшей стенки (в одном направлении относительно стенки кристаллизатора) составляет от 5 до 15 см. Проведено сравнительное моделирование движения капли металла без наложенного внешнего магнитного поля. Результаты показали, что изначально капли начинали двигаться по похожей траектории, как в первом эксперименте, но никогда ее не меняли и не отталкивались от нее, а наоборот, «стекали» по ней на дно кристаллизатора. Также замечено, что при нали-

чии внешнего магнитного поля капли двигаются более активно, чем при эксперименте без магнитного поля.

## Выводы

Моделирование позволило определить направление движения капель электродного металла и показатель необходимой внешней силы для стабилизации ванны жидкого металла при протекании процесса ЭШП на постоянном токе, равный 0,067 Н.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- Hernandez-Morales B., Mitchell A. Review of mathematical models of fluid flow, heat transfer, and mass transfer in electrosag remelting process // *Ironmaking and Steelmaking*. 1999. Vol. 26. No. 6. P. 423–438. <https://doi.org/10.1179/030192399677275>
- Ludwig A., Kharicha A., Wu M. Modeling of multiscale and multiphase phenomena in materials processing // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014. Vol. 45. No. 1. P. 36–43. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9820-1>
- Kawakami M., Takenaka T., Ishikawa M. Electrode reactions in DC electrosag remelting of steel rod // *Ironmaking and Steelmaking*. 2002. Vol. 29. No. 4. P. 287–292. <https://doi.org/10.1179/030192302225005132>
- Paar A., Schneider R., Zeller P., Reiter G., Paul S., Siller I., Würzinger P. Influence of the polarity on the cleanliness level and the inclusion types in the ESR process // *2013 Int. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting*. Hoboken: Wiley, 2013. P. 29–36. <https://doi.org/10.1002/9781118830857.ch4>
- Wang Q., Liu Y., He Z., Li G., Li B. Numerical analysis of effect of current on desulfurization in electrosag remelting process // *ISIJ International*. 2017. Vol. 57. No. 2. P. 329–336. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-566>
- Wang Q., Li G., He Z., Li B. A three-phase comprehensive mathematical model of desulfurization in electrosag remelting process // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 874–886. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.035>
- Wang Q., He Z., Li G., Li B., Zhu C., Chen P. Numerical investigation of desulfurization behavior in electrosag remelting process // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 104. P. 943–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.022>
- Wang Q., Liu Y., Wang F., Li G., Li B., Qiao W. Numerical study on the effect of electrode polarity on desulfurization in direct current electrosag remelting process // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017. Vol. 48. No. 5. P. 2649–2663. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1040-7>
- Wang Q., Liu Y., Li G., Gao Y., He Z., Li B. Predicting transfer behavior of oxygen and sulfur in electrosag remelting process // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 129. P. 378–388. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.062>
- Kelkar K.M., Suhas V., Patankar S.V., Srivatsa S., Srivatsa S., Minisandram R.S., Evans D.G., de Barbadillo J.J. Computational modeling of electrosag remelting (ESR) process used for the production of high-performance alloys // *2013 Int. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting*. Hoboken: Wiley, 2013. P. 3–12. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48102-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48102-9_1)
- Kharicha A., Ludwig A., Wu M. Droplet formation in small electrosag Remelting processes // *2011 Int. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting*. Krane M., Bellot J., Jardy A., Williamson R.L., Ballantyne S. eds. 2011. P. 113–119.
- Kelkar K.M., Patankar S.V., Mitchell A. Computational modeling of the electrosag remelting (ESR) process for the production of ingots of high-performance alloys // *2005 Int. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting*. Lee P.D., etc. eds. 2005. P. 137–144.
- Hernandez-Morales B., Mitchell A. Review of mathematical models of fluid flow, heat transfer, and mass transfer in electrosag remelting process. *Ironmaking and Steelmaking*. 1999, vol. 26, no. 6, pp. 423–438. <https://doi.org/10.1179/030192399677275>
- Ludwig A., Kharicha A., Wu M. Modeling of multiscale and multiphase phenomena in materials processing. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014, vol. 45, no. 1, pp. 36–43. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9820-1>
- Kawakami M., Takenaka T., Ishikawa M. Electrode reactions in DC electrosag remelting of steel rod. *Ironmaking and Steelmaking*. 2002, vol. 29, no. 4, pp. 287–292. <https://doi.org/10.1179/030192302225005132>
- Paar A., Schneider R., Zeller P., Reiter G., Paul S., Siller I., Würzinger P. Influence of the polarity on the cleanliness level and the inclusion types in the ESR process. In: *2013 Int. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting*. Hoboken: Wiley, 2013, pp. 29–36. <https://doi.org/10.1002/9781118830857.ch4>
- Wang Q., Liu Y., He Z., Li G., Li B. Numerical analysis of effect of current on desulfurization in electrosag remelting process. *ISIJ International*. 2017, vol. 57, no. 2, pp. 329–336. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-566>
- Wang Q., Li G., He Z., Li B. A three-phase comprehensive mathematical model of desulfurization in electrosag remelting process. *Applied Thermal Engineering*. 2017, vol. 114, pp. 874–886. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.035>
- Wang Q., He Z., Li G., Li B., Zhu C., Chen P. Numerical investigation of desulfurization behavior in electrosag remelting process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, vol. 104, pp. 943–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.022>
- Wang Q., Liu Y., Wang F., Li G., Li B., Qiao W. Numerical study on the effect of electrode polarity on desulfurization in direct current electrosag remelting process. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017, vol. 48, no. 5, pp. 2649–2663. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1040-7>
- Wang Q., Liu Y., Li G., Gao Y., He Z., Li B. Predicting transfer behavior of oxygen and sulfur in electrosag remelting process. *Applied Thermal Engineering*. 2018, vol. 129, pp. 378–388. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.062>
- Kelkar K.M., Suhas V., Patankar S.V., Srivatsa S., Minisandram R.S., Evans D.G., de Barbadillo J.J. Computational modeling of electrosag remelting (ESR) process used for the production of high-performance alloys. In: *2013 Int. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting*. Hoboken: Wiley, 2013, pp. 3–12. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48102-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48102-9_1)
- Kharicha A., Ludwig A., Wu M. Droplet formation in small electrosag remelting processes. In: *2011 Int. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting*. Krane M., Bellot J., Jardy A., Williamson R.L., Ballantyne S. eds., 2011, pp. 113–119.
- Kelkar K.M., Patankar S.V., Mitchell A. Computational modeling of the electrosag remelting (ESR) process for the production of ingots of high-performance alloys. In: *2005 Int. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting*. Lee P.D., etc. eds. 2005, pp. 137–144.

13. Patel A.D. Analytical model for electromagnetic fields in ESR and VAR processes // 2003 Int. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting. Lee P., etc. eds. 2003. P. 205–214.
14. Пятагин Д.А., Чуманов И.В. Удаление неметаллических включений при ЭШП на постоянном токе // Известия вузов. Черная металлургия. 2006. № 7. С. 25–26.
15. Пятагин Д.А., Чуманов И.В. К вопросу оценки электромагнитных сил, возникающих при ЭШП на постоянном токе // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. № 7. С. 19–22.
16. Чуманов В.И., Чуманов И.В., Сергеев Ю.С. Стабилизация ванны жидкого металла при ЭШП на постоянном токе // Электрометаллургия. 2018. № 3. С. 18–22.
17. Чуманов И.В., Пятагин Д.А. Особенности электрошлакового переплава на постоянном токе с вращением расходомера электрода // Известия вузов. Черная металлургия. 2006. № 3. С. 22–25.
18. Bale C.W., Chartrand P., Degterov S.A., Eriksson G., Hack K., Ben Mahfoud R., Melançon J., Pelton A.D., Petersen S. FactSage thermochemical software and databases // CALPHAD. 2014. Vol. 26. No. 2. P. 189–228. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(02)00035-4)
19. Bale C.W., Bélisle E., Chartrand P., Decterov S.A., Eriksson G., Hack K., Jung I.-H., Kang Y.-B., Melançon J., Pelton A.D., Robelin C., Petersen S. FactSage thermochemical software and databases – recent developments // CALPHAD. 2009. Vol. 33. No. 2. P. 295–311. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2008.09.009>
20. Bale C.W., Belise E., Chartrand P., Decterov S.A., Eriksson G., Gheribi A.E., Hack K., Jung I.-H., Kang Y.-B., Melançon J., Pelton A.D., Petersen S. Reprint of: FactSage thermochemical software and databases, 2010–2016 // CALPHAD. 2016. Vol. 55. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.07.004>
13. Patel A.D. Analytical model for electromagnetic fields in ESR and VAR processes. In: 2003 Int. Symp. on Liquid Metal Processing & Casting. Lee P.D., etc. eds. 2003, pp. 205–214.
14. Pyatygin D.A., Chumanov I.V. Removal of non-metallic inclusions at ESP at direct current. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2006, no. 7, pp. 25–26. (In Russ.).
15. Pyatygin D.A., Chumanov I.V. On the assessment of electromagnetic forces arising at ESP at constant current. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 7, pp. 19–22. (In Russ.).
16. Chumanov V.I., Chumanov I.V., Sergeev Yu.S. Stabilization of a liquid metal bath at ESP at constant current. *Electrometallurgiya*. 2018, no. 3, pp. 18–22. (In Russ.).
17. Chumanov I.V., Pyatygin D.A. Features of electroslag remelting at constant current with rotation of consumable electrode. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2006, no. 3, pp. 22–25. (In Russ.).
18. Bale C.W., Chartrand P., Degterov S.A., Eriksson G., Hack K., Ben Mahfoud R., Melançon J., Pelton A.D., Petersen S. FactSage thermochemical software and databases. *CALPHAD*. 2014, vol. 26, no. 2, pp. 189–228. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(02)00035-4)
19. Bale C.W., Bélisle E., Chartrand P., Decterov S.A., Eriksson G., Hack K., Jung I.-H., Kang Y.-B., Melançon J., Pelton A.D., Robelin C., Petersen S. FactSage thermochemical software and databases – recent developments. *CALPHAD*. 2009, vol. 33, no. 2, pp. 295–311. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2008.09.009>
20. Bale C.W., Belise E., Chartrand P., Decterov S.A., Eriksson G., Gheribi A.E., Hack K., Jung I.-H., Kang Y.-B., Melançon J., Pelton A.D., Petersen S. Reprint of: FactSage thermochemical software and databases, 2010–2016. *CALPHAD*. 2016, vol. 55, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2016.07.004>

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Илья Валерьевич Чуманов**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии производства материалов», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), филиал в г. Златоуст  
**E-mail:** [chumanoviv@susu.ru](mailto:chumanoviv@susu.ru)

**Иван Андреевич Алексеев**, магистр кафедры «Техника и технологии производства материалов», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), филиал в г. Златоуст  
**E-mail:** [79058311597@ya.ru](mailto:79058311597@ya.ru)

**Дмитрий Владимирович Сергеев**, заведующий лабораторией кафедры «Техника и технологии производства материалов», Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), филиал в г. Златоуст  
**E-mail:** [sergeevdv@susu.ru](mailto:sergeevdv@susu.ru)

**Ilya V. Chumanov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair “Technique and Technology of Materials Production”, Zlatoust Branch of the South Ural State University  
**E-mail:** [chumanoviv@susu.ru](mailto:chumanoviv@susu.ru)

**Ivan A. Alekseev**, Master Student of the Chair “Technique and Technology of Materials Production”, Zlatoust Branch of the South Ural State University  
**E-mail:** [79058311597@ya.ru](mailto:79058311597@ya.ru)

**Dmitrii V. Sergeev**, Head of the Laboratory of the Chair “Technique and Technology of Materials Production”, Zlatoust Branch of the South Ural State University  
**E-mail:** [sergeevdv@susu.ru](mailto:sergeevdv@susu.ru)

Поступила в редакцию 16.06.2020  
 После доработки 9.07.2021  
 Принята к публикации 12.06.2021

Received 16.06.2020  
 Revised 9.07.2021  
 Accepted 12.06.2021