

УДК 621.7.044.7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ И ИХ АНАЛИЗ

© 2024 В. А. Глушечков¹, К.В. Никитин²

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

²Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 20.05.2024

В статье даны физические основы и факторы магнитно - импульсного воздействия на расплав. Основное внимание уделено возможным схемам перемешивания: внешним (осевым, радиальным, гибридным) внутренним, струйным и другим., обеспечивающим необходимый тепло- массоперенос. Рассмотрены особенности и дан анализ эффективности каждой схемы с точки зрения расхода энергии и обеспечения требуемого качества перемешивания. В заключении представлен классификатор способов магнитно импульсного перемешивания расплава, дающий направление их дальнейшего развития и экспериментального исследования.

Ключевые слова: расплав, перемешивание, технологические схемы, импульсное магнитное поле, факторы воздействия.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-3-74-83

EDN: BJIQGG

ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

Расплавленные металлы (расплавы) не являются однородными по составу и по объему. Причинами неоднородности могут быть дисперсные частицы, неравномерность теплообмена и массопереноса при реализации металлургических процессов создания сплавов [1-3]. Неравномерность состава литейных расплавов возникает в плавильных печах и сохраняется в промежуточных разливочных ковшах различной вместимости от 1,5 т до 30 кг [4]. Для повышения качества литейной продукции необходимо обеспечение равномерности (гомогенности) расплава, что может быть достигнуто с помощью дополнительного внешнего воздействия – различного вида перемешиванием. При этом равномерность расплава достигается за счет возникающих при перемешивании вихревых потоков или волновых напряжений. Цель перемешивания – создание условий для равномерной объемной кристаллизации, достижения равномерности состава по всему объему, формирования мелкозернистой структуры при последующей кристаллизации. Для перемешивания расплава могут использоваться механические мешалки, электромагнитные поля, ультразвуковая вибрация, газоимпульсное воздействие и другие методы [5-8]. К сожалению, ни один из

Глушечков Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением. E-mail: vgl@ssau.ru
Никитин Константин Владимирович, доктор технических наук, профессор, декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта. E-mail: tlp@samgtu.ru

имеющихся методов не лишен недостатков или имеет определенные ограничения: низкий коэффициент использования энергии, громоздкость устройств, захват воздуха, загрязнение расплава поверхностными пленками и другие. Поэтому разработка новых способов перемешивания расплавов является актуальной задачей.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМП НА РАСПЛАВ

Для перемешивания расплавов предлагается использовать бесконтактное воздействие на них импульсным магнитным полем (ИМП) [9-14]. ИМП генерируется вокруг витков катушки – индуктора при разряде на нее батареи конденсаторов магнитно импульсной установки (рис. 1) [12].

Импульсное магнитное поле, проникая через стенку тигля, изготовленного из немагнитного неэлектропроводного материала, воздействует на расплав, наводя в нем вихревые токи. Ток в индукторе и ток, наведенный в расплаве, носят характер затухающей синусоиды (рис. 2)

Амплитуда тока I зависит от величины запаасаемой в батарее конденсаторов электрической энергии $W = \frac{CU^2}{2}$ и может достигать десятков тысяч ампер, что является дополнительным внутренним источником тепла:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau,$$

где R – сопротивление току расплава.

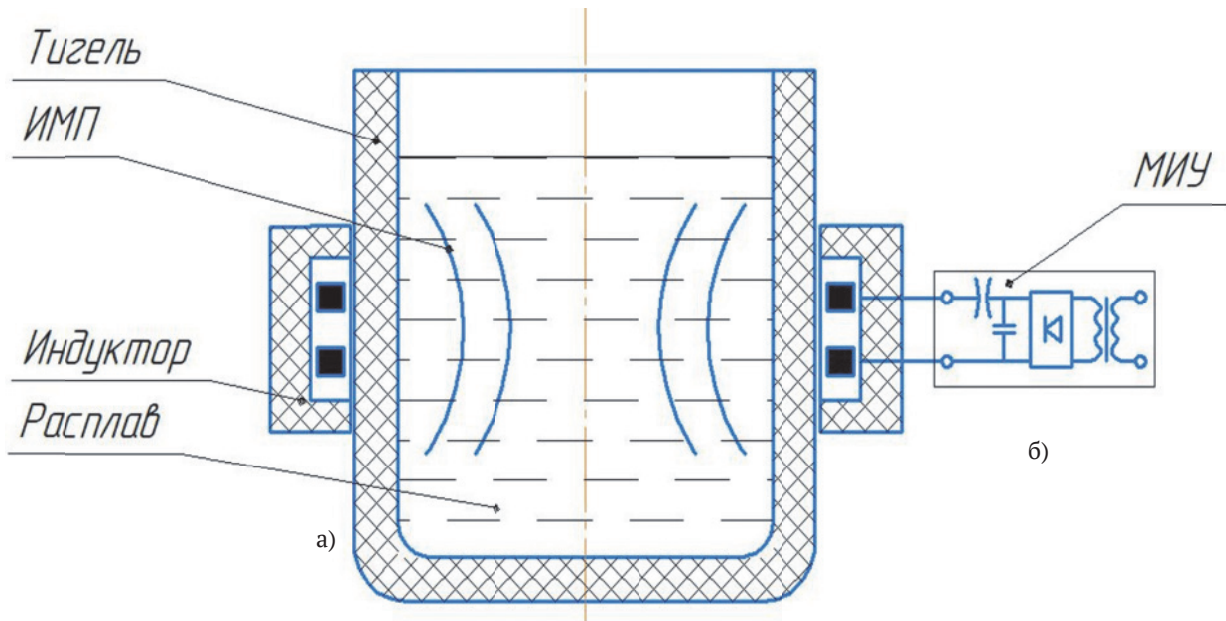


Рис. 1. Схема магнитно импульсного воздействия на расплав: а) расплав-тигель-индуктор; б) магнитно импульсная установка (МИУ)

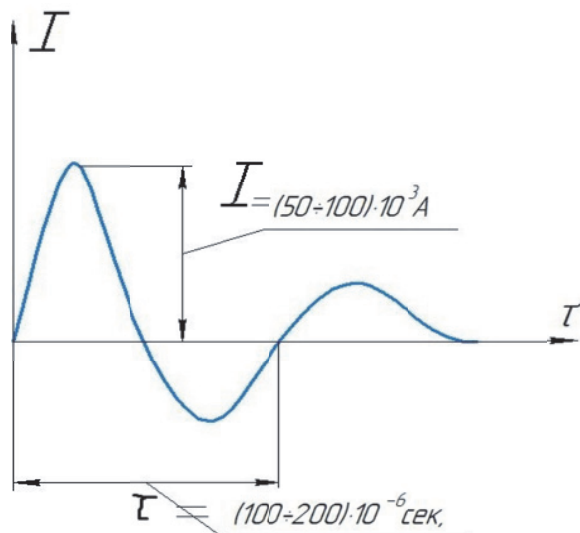


Рис. 2. Характер разрядного и наведенного токов

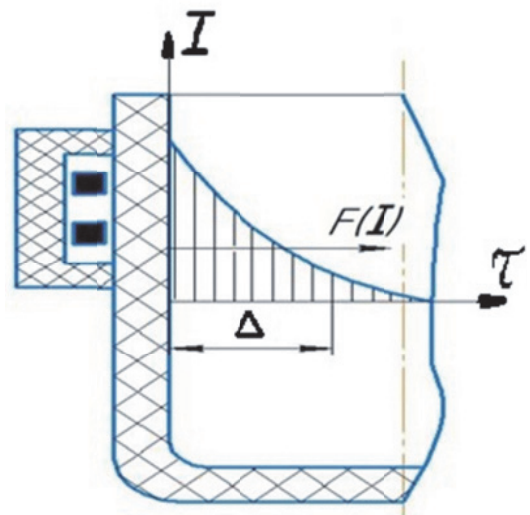


Рис. 3. Схема объемного воздействия ИМП на расплав

При этом время протекания тока τ составляет мили секунды. Взаимодействие магнитных полей токов в индукторе и в расплаве порождает возникновение и действие электродинамических, бесконтактных сил, которые и используются для перемешивания расплава. Такие усилия могут достигать значительных величин и широко используются в настоящее время в технике при пластическом деформировании листовых заготовок [11]. Электродинамические усилия, действующие на расплав, являются объемными, действующие на некоторую глубину расплава, определяемую величиной скин-слоя Δ (рис. 3)

Величина скин-слоя определяется следующим выражением:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}},$$

где ω – круговая частота разрядного тока, ($\omega = 2\pi \frac{1}{\tau}$).

μ – магнитная проницаемость материала расплава,

γ – удельная электропроводимость расплава.

Следовательно, электродинамические силы максимальны со стороны действия ИМП и убывают в глубину по экспоненциальному закону. На расстоянии Δ они убывают в «e» раз. Для алюминиевых расплавов скин слой может составлять 10 мм и более в зависимости от параметров разрядной цепи.

Направление действия электродинамических сил F перпендикулярно силовым линиям

магнитного поля. Величина силового воздействия F определяется напряженностью магнитного поля H ($F = 0,5\mu H^2$) или в конечном счете величиной наведенных токов. С другой стороны, силовое воздействие может быть определено через энергию, запасенную в батарее конденсаторов, и объем пространства, в котором она реализуется, т.е. объемом «зазора» между витками индуктора и расплавом. Например, для схемы воздействия ИМП на расплав, приведенной на рис. 4, усилие воздействия будет составлять

$$F = \frac{W}{2\pi rsl},$$

где r – радиус тигля,

s – величина зазора между витками индуктора и расплава,

l – высота рабочей зоны индуктора.

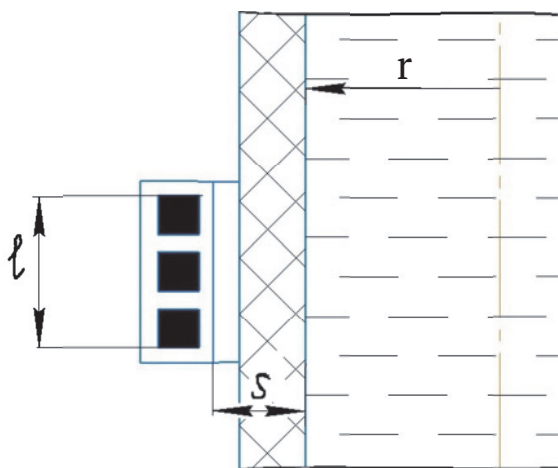


Рис. 4. Геометрические составляющие системы «индуктор-тигель-расплав»

Приведенное соотношение дает представление о влиянии геометрических размеров системы «индуктор-тигель-расплав» на величину электродинамического воздействия. Силовое воздействие в соответствии с приведенными соотношениями представляет собой квадрат синусоиды, т.е. оказывает небольшое пульсирующее действие (рис. 5)

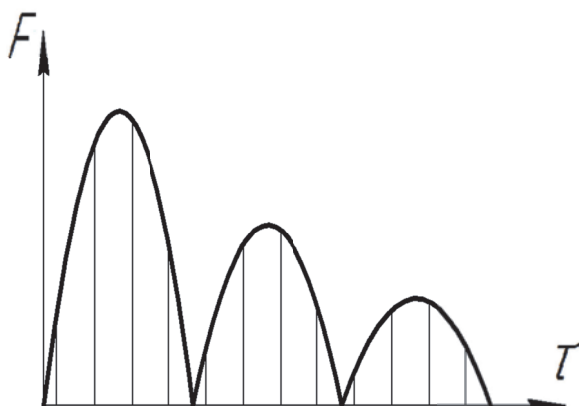


Рис. 5. Характер единичного силового воздействия ИМП на расплав во времени

При некоторых параметрах разрядной цепи: установка – индуктор- расплав импульс силового воздействия может иметь аperiодический характер. Кроме того, варьируя параметрами разрядной цепи, каждый импульс можно растягивать или сжимать во времени, т.е. обеспечивать высоко или низко частотный характер его воздействия. Магнитно импульсные установки могут обеспечить требуемую скважность разрядов (с требуемой пачкой импульсов) с частотой следования импульсов вплоть до 1-2 герц.

Таким образом, под действием импульсного магнитного поля наведенные в расплаве вихревые токи порождают бесконтактное силовое электродинамическое воздействие и являются внутренними дополнительными источниками тепла. Силовое воздействие на расплав может быть осуществлено через стенки литейной оснастки, изготовленной из неэлектропроводных материалов. Электродинамические усилия вызывают в расплаве возникновение металлопотоков или генерируют распространение по объему волн напряжений, перемешивающих расплав. Воздействие на расплав является объемным неравномерным: максимальным со стороны индуктора и убывающим в глубину по экспоненте (скин эффект) и по своим силовым возможностям значительно превышает имеющиеся на сегодня воздействия от внешних источников перемешивания, ограничиваясь лишь возникновением внутри расплава кавитационных явлений. Внутренние дополнительные источники тепла способствуют формированию в расплаве более равномерных по объему тепловых полей. Комплексное тепловое и силовое воздействие ИМП на расплав обуславливает более благоприятный массо- и теплоперенос для формирования гомогенной его структуры. Воздействие ИМП на расплав может быть одно и много кратным со скважностью до одного герца. Параметры ИМП позволяют управлять формой и величиной термосилового воздействия на расплав при реализации технологии перемешивания.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Схема внешнего осевого воздействия. Предлагаемая схема может быть осуществлена с помощью плоского индуктора, расположенного непосредственно над зеркалом расплава. При этом, индуктор может перекрывать всю поверхность расплава или только его часть, т.е. обеспечивая симметричность и несимметричность воздействия (рис. 6)

Если плоский многовитковый индуктор полностью перекрывает зеркало расплава и создает равномерное силовое воздействие, то в этом слу-

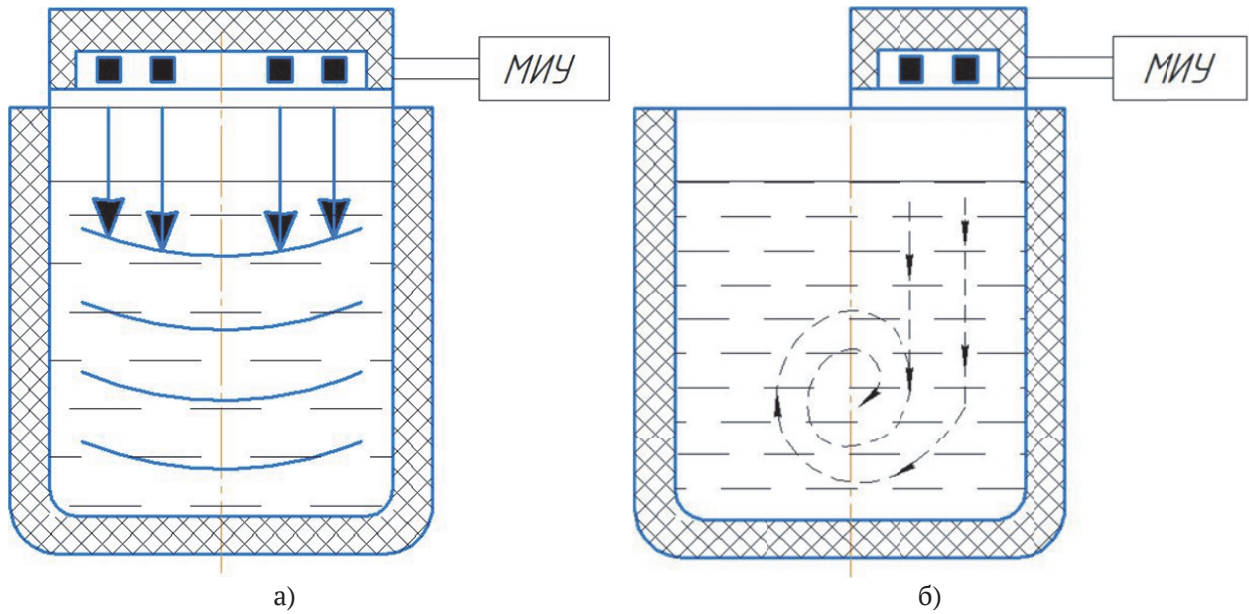


Рис 6. Схема внешнего осевого воздействия ИМП на расплав:
 а) равномерное нагружение ИМП по всей поверхности зеркала расплава;
 б) несимметричное локальное воздействие ИМП на расплав

чае возникновение металлопотоков затруднено. По расплаву более вероятно распространение волновых возмущений с учетом взаимодействия прямых и отраженных волн напряжений. При несимметричном нагружении создаются условия возникновения металлопотоков. Кратность нагружения и уровень силового воздействия определяют скорость металлопотока и объем вовлеченного в круговорот расплава. При чрезмерном нагружении металлопоток может разрушить зеркало расплава или привести к его вы-

плеску из тигля. Разрабатываемая в этом случае технология перемешивания должна обеспечить «мягкость» нагружения, чтобы минимизировать разрушение зеркала расплава и вовлечение его в оборот со всеми дефектами, примесями и захватом кислорода воздуха. Неравномерность нагружения может быть осуществлена изменением конструкции индуктора (профилирования его витков) или его расположением над зеркалом расплава, например, угла наклона индуктора по отношению к поверхности расплава (рис. 7).

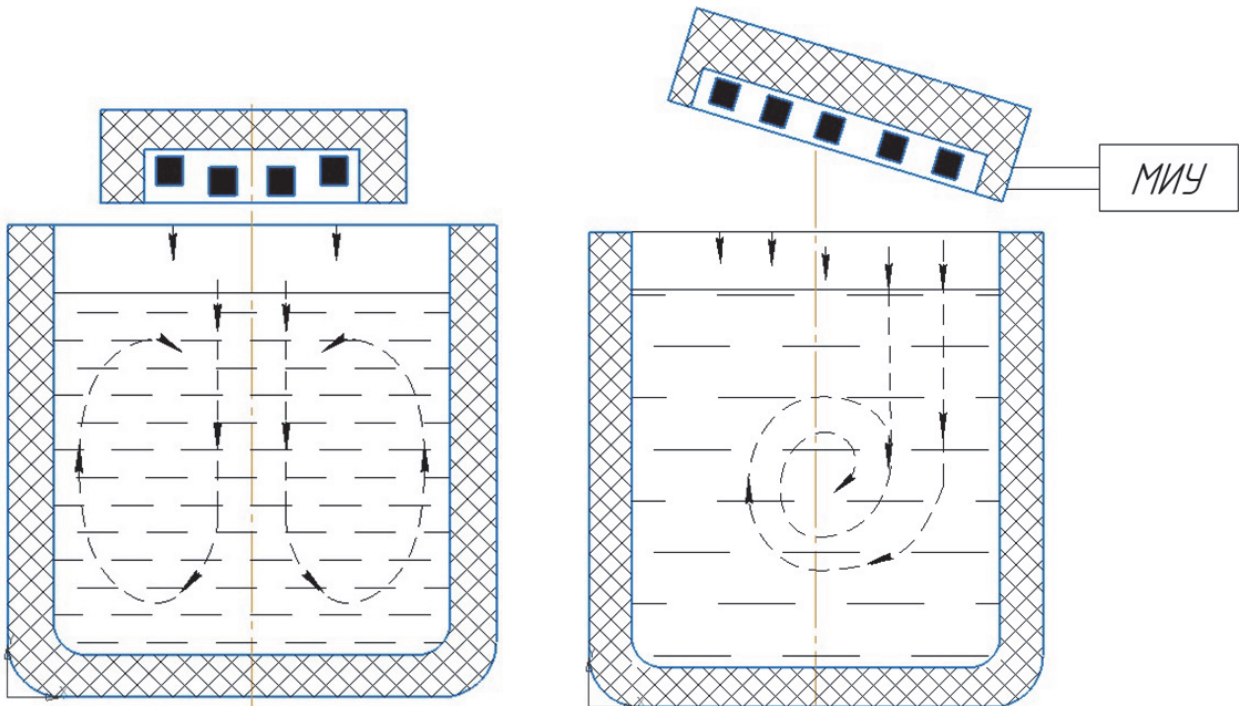


Рис. 7. Схемы создания неравномерного силового нагружения при внешнем осевом воздействии ИМП на расплав

Схема непосредственного воздействия ИМП на расплав требует меньшего расхода электроэнергии W вследствие возможного обеспечения минимально зазора между индуктором и зеркалом расплава. Однако открытая поверхность расплава приводит к значительным потерям тепловой энергии в окружающую среду, нежелательному взаимодействию с ней самого расплава.

Схема внешнего радиального воздействия. Такая схема может быть реализована с помощью плоского или цилиндрического индукторов. На рис. 8 показан плоский индуктор, расположенный на боковой поверхности тигля (ковша)

Импульсное магнитное поле проникает через стенку тигля и, воздействуя на расплав, формирует несколько областей перемешива-

ния. Варьирование энергией и кратностью воздействия с одновременным программируемым перемещением индуктора по оси и окружности обеспечивает более тщательное и интенсивное перемешивание с широкими возможностями управления формируемыми металлопотоками. Кроме того, боковое размещение индуктора дает возможность осуществлять перемешивание расплава в закрытом объеме (закрытый тигель), в том числе, при необходимости, с использованием инертных газов. Объемы вовлекаемого в перемешивание расплава зависят от геометрических размеров индуктора.

На рис. 9 показана схема радиального воздействия ИМП на расплав с помощью цилиндрического индуктора.

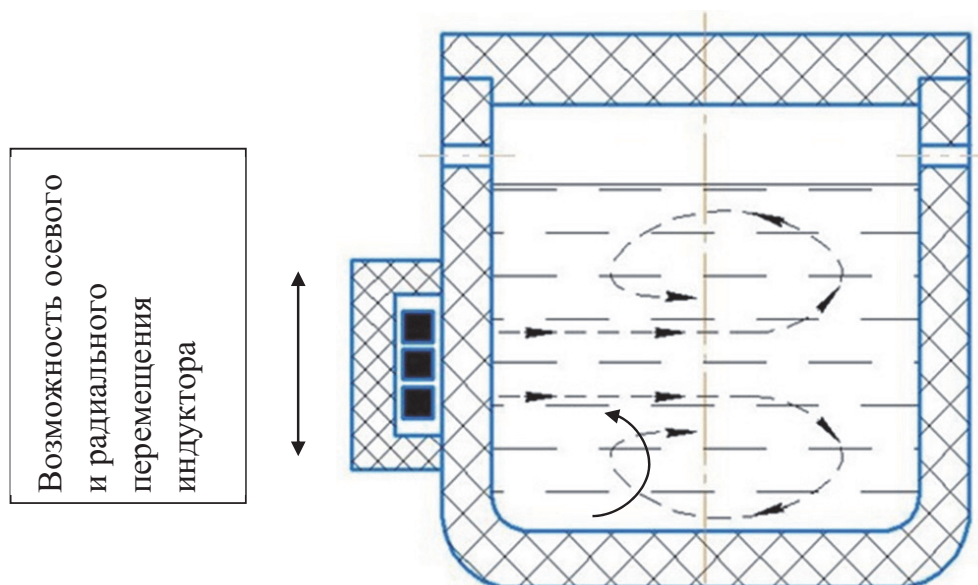


Рис. 8. Схема радиального воздействия ИМП на расплав с использованием плоского индуктора

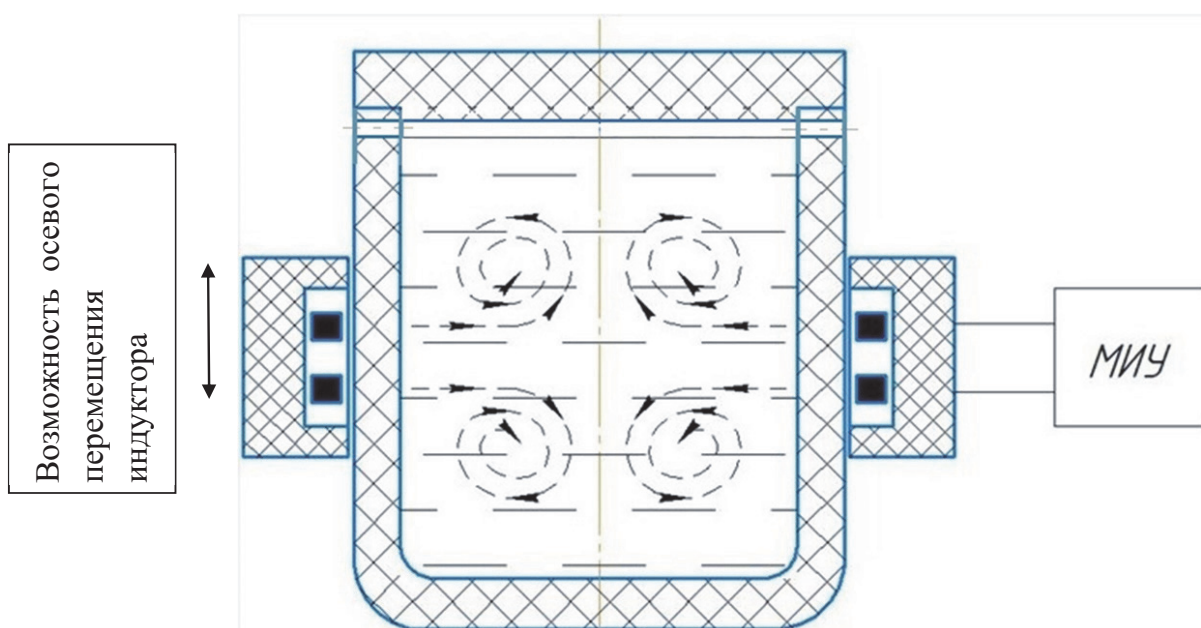


Рис. 9. Схема радиального воздействия ИМП на расплав с использованием цилиндрического индуктора

При этой схеме перемешивания формируются встречные потоки расплава, направленные к центру, что дает возможность достичь более глубокой проработки всего объема расплава. Возможно возникновение цилиндрических волн напряжений, сходящихся в центре. Изменение высоты индуктора (протяженность рабочей зоны) определяет количество металлопотоков и их взаимодействия. Как и в схеме с плоским индуктором возможно осевое перемещение цилиндрического индуктора вдоль оси литейной оснастки.

Схема радиально-осевого воздействия. Возможны различные комбинации совместного использования плоских и цилиндрических индукторов с одновременным или последовательным (по заданной программе) их действием. Для примера, на рисунке 10 дана схема применения плоского индуктора, создающего осевое воздействие, и цилиндрического, реализующего – радиальное воздействие. Гибридное воздействие дает возможность создания в расплаве сложной кинематической картины распространения и взаимодействия металлопотоков, не доступной при реализации других схем перемешивания.

Схемы перемешивания расплава с помощью погружного индуктора. Внутреннее воздействие ИМП на расплав осуществляется с помощью погружного индуктора. Для реализации таких схем предложен одновитковый индуктор с керамическим изолирующим покрытием, выполненным напылением. Проведенные испытания показали его работоспособность при температуре 700 градусов (расплав алюминия) при на-

пряжении до 5 кV. На рисунке 11 показаны некоторые схемы перемешивания с использованием погружного индуктора, по-разному ориентированного внутри тигля.

Ориентация индуктора определяет направление металлопотока. Индуктор может быть неподвижным или перемещаться по заданной программе, совмещая электродинамическое и механическое воздействия на перемешиваемый расплав. Сочетание силовых воздействий обеспечит интенсивное перемешивание. При этом, КПД электродинамического нагружения выше за счет полного двухстороннего по отношению к витку индуктора использования энергии магнитного поля. Недостатком этого способа перемешивания является сложность осуществления процесса в закрытом объеме.

Схема «струйного» перемешивания расплава. Формирование струи расплава осуществляется вне разливочной емкости с направлением ее воздействия внутрь. На рис. 12 дан пример конструктивного решения разливочной оснастки для реализации предлагаемой схемы. В корпусе емкости с расплавом выполнены каналы (отверстия), к которым крепятся сменные технологические стаканы с расположенными вокруг них индукторами. Воздействуя ИМП через стенку стакана на расплав, осуществляют его сжатие, преобразуемое в управляемую струю расплава. Количество, расположение, направленность стаканов, поочередное включение индукторов по заданной программе создают интенсивное перемешивание. Силовое и тепловое воздействие противодействуют «заморозке» расплава на стенках стакана. При использовании этой схемы

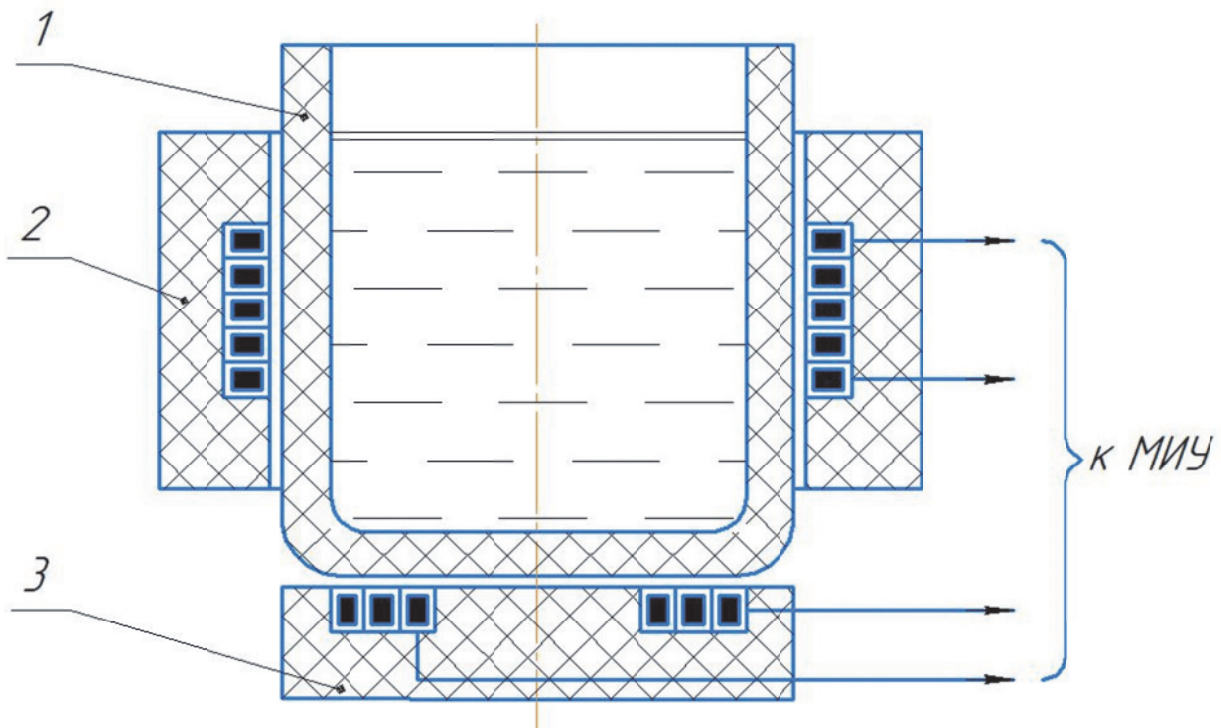


Рис. 10. Схемы гибридного (радиально-осевого) воздействия на расплав

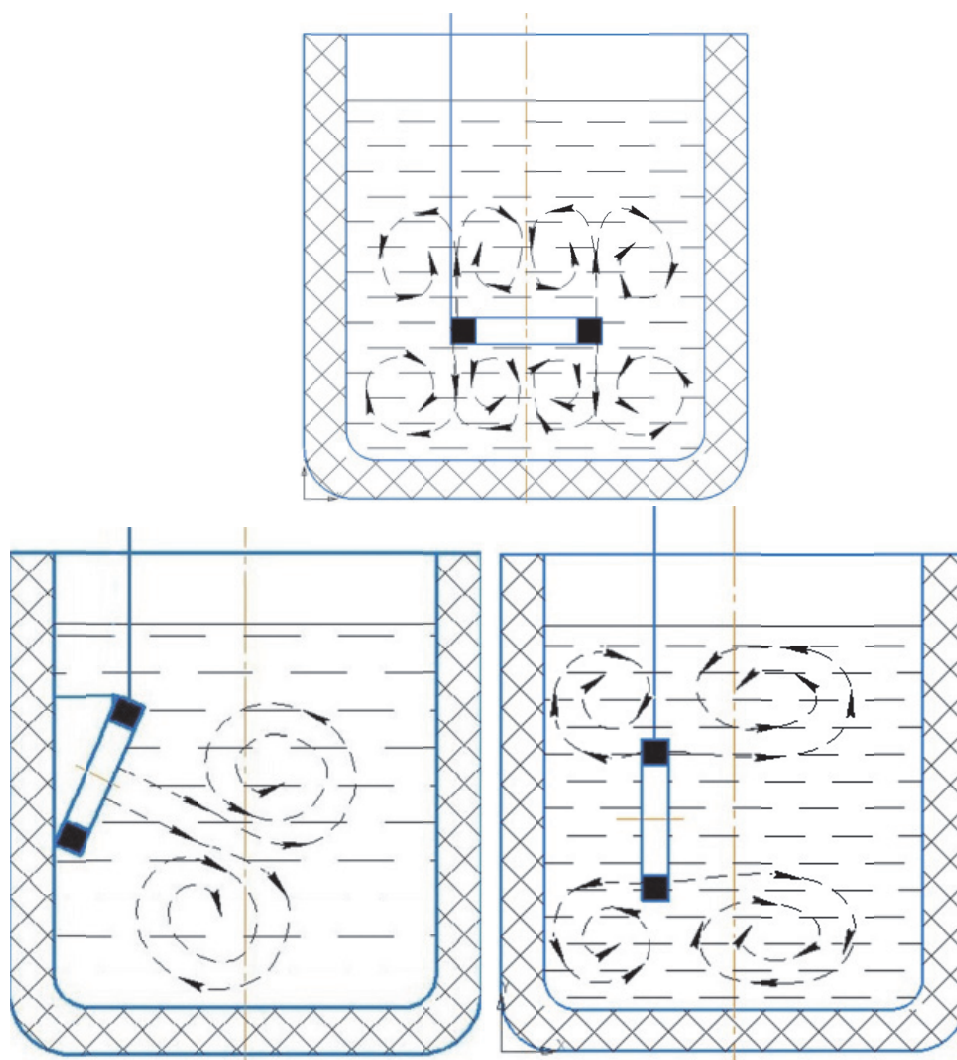


Рис. 11. Технологические схемы перемешивания расплава погружным индуктором

емкость с расплавом остается закрытой, обеспечивая экономию энергозатрат. При этом могут варьироваться формы стаканов и индукторов.

КЛАССИФИКАЦИЯ СХЕМ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМП

Приведенные в данной статье схемы перемешивания можно обобщить в виде классификатора, приведенного на рис. 13.

Предложенный классификатор определяет направления дальнейшего развития и совершенствования технологий подготовки расплавов в литейном производстве.

ВЫВОДЫ

1. Предложены новые способы перемешивания расплавов с использованием импульсного магнитного поля: с осевым, радиальным внешним и внутренним, струйным, волновым и гибридным воздействиями

2. Даны физика процесса и факторы магнитно импульсного воздействия на расплав,

раскрывающие его особенности и возможности применительно к процессу перемешивания.

3. Предложенные способы перемешивания значительно интенсифицируют процессы массопереноса и теплопередачи по всему объему расплава, обеспечивают более равномерное распределение зародышей центров кристаллизации, создают крупномасштабные вихри с высокой скоростью движения жидкого металла.

4. Наличие в предложенных схемах перемешивания расплавов дополнительных внутренних источников тепла способствует выравниванию температурных полей, уменьшают вероятность «намораживания» металла на стенках оснастки

5. Высокие технико-экономические показатели достигаются за счет использования схем перемешивания в закрытом объеме, за счет экономии электрической и тепловой энергии.

6. Разработанные схемы магнитно импульсного воздействия на расплав могут быть использованы и на этапе частичной кристаллизации при наличии жидкой и твердой фаз, способствуя разрушению крупных дендритных образований.

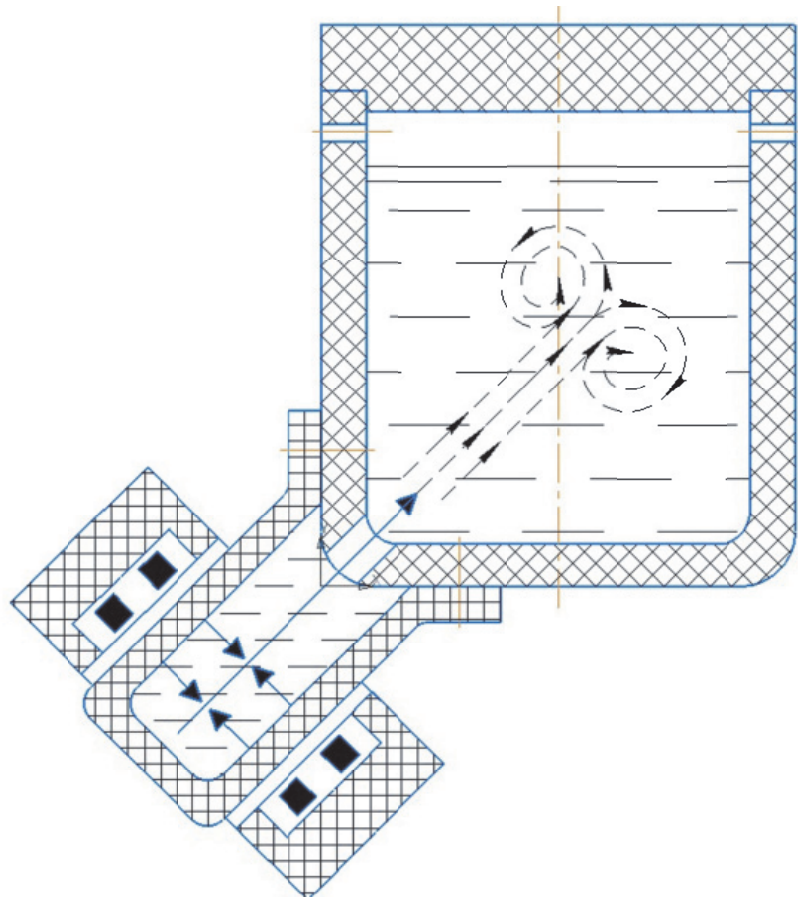


Рис. 12. Схема формирования струи расплава

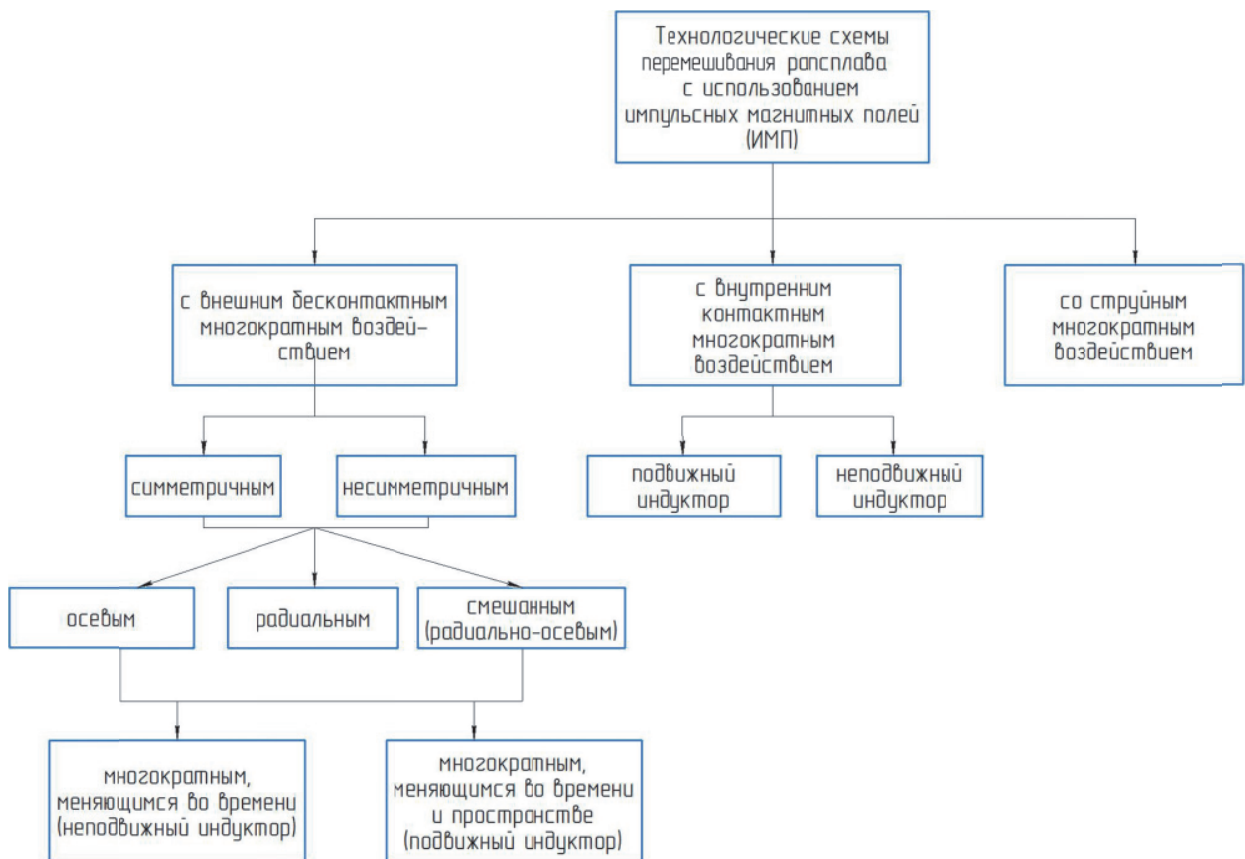


Рис. 13. Классификатор технологических схем перемешивания расплавов металла импульсным магнитным полем

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ершов, Г.С.* Микронеоднородность металлов и сплавов / Г.С. Ершов, Л.А. Позняк. – М.: Металлургия, 1985. – 213 с.
2. *Напалков, В.И.* Структуры и дефекты слитков из алюминия и его сплавов: монография / В.И. Напалков, А.Е. Афанасьев, Б.В. Овсянников и др. – Красноярск: СФУ, 2018. – 170 с.
3. *Нурадинов А.С.* Процессы кристаллизации и формирования структуры литых заготовок монография / А.С. Нурадинов, М.Р. Нахаев. – Грозный, 2020. – 170 с.
4. *Ульянов, В.А.* Непрерывное литьё заготовок. Разливочные и промежуточные ковши МНЛЗ: учебное пособие / В.А. Ульянов, В.Н. Гушин. – М.: Инфра-Инженерия, 2023. – 212 с.
5. *Стренк, Ф.* Перемешивание и аппараты с мешалками / Ф. Стренк. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
6. *Шильяев А.С.* Ультразвуковая обработка расплавов / А.С. Шильяев. – Минск: Наука и техника, 1992. – 174 с.
7. *Протопопов, Е.В.* Перемешивание расплава при продувке инертным газом в агрегатах ковш-печь / Е.В. Протопопов, Л.В. Думова, М.В. Темлянцев и др. // Вестник Российской академии естественных наук. – 2021. – Вып 24. – С. 76-83.
8. *Гельфгат Ю.М.* Жидкий металл под действием электромагнитных сил / Ю.М. Гельфгат, О.А. Лиелаусис, Э.В. Щербинин. – Рига: Зинатне, 1976. – 247 с.
9. *Прокофьев, А.Б.* Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ): монография / А.Б. Прокофьев, И.А. Беляева, В.А. Глушченков и др. – Самара: Изд-во СНЦ, 2019. – 140.
10. *Глушченков, В.А.* Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография / В.А. Глушченков, В.Ф. Карпунин. – Самара: Федоров, 2014. – 208 с.
11. *Глушченков, В.А.* Технология и оборудование специальных видов листовой штамповки: учебник / В.А. Глушченков. – Самара: Изд-во СГАУ, 2013.
12. *Юсупов, Р. Ю.* Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов: монография / Р. Ю. Юсупов, В.А. Глушченков. – Самара: Федоров, 2013. – 123 с.
13. *Глушченков, В.А.* О воздействии импульсных магнитных полей на расплавы / В.А. Глушченков, Д. Г. Черников, В.И. Никитин и др. // Металлургия машиностроения. – 2012. – №4. – С. 47-50.
14. *Никитин, К.В.* Теоретическое и экспериментальное обоснование обработки расплавов на основе алюминия импульсными магнитными полями / К.В. Никитин, Е.А. Амосов, В.И. Никитин // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 5. – С. 11-19.

TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR MIXING THE MELT WITH A PULSED MAGNETIC FIELD AND THEIR ANALYSIS

© 2024 V. A. Glushchenkov¹, K. V. Nikitin²

¹Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

²Samara State Technical University, Samara, Russia

The article gives the physical basis and factors of magnetic pulse effects on the melt. The main attention is paid to the possible mixing schemes: external (axial, radial, hybrid), internal, jet and others, providing the necessary heat and mass transfer. The special features are considered and an analysis of the effectiveness of each scheme is given in terms of energy consumption and ensuring the required quality of mixing. In conclusion, a classifier of methods for magnetic pulse mixing of the melt is presented, giving the direction for their further development and experimental research.

Keywords: Melt, mixing, technological schemes, pulsed magnetic field, influencing factors.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-3-74-83

EDN: BJIQGG

REFERENCES

1. *Ershov, G.S.* Mikroneodnorodnost' metallov i spлавov / G.S. Ershov, L.A. Poznyak. – M.: Metallurgiya, 1985. – 213 s.
2. *Napalkov, V.I.* Struktury i defekty slitkov iz alyuminiya i ego spлавov: monografiya / V.I. Napalkov, A.E. Afanas'ev, B.V. Ovsyannikov i dr. – Krasnoyarsk: SFU, 2018. – 170 s.
3. *Nuradinov A.S.* Processy kristallizatsii i formirovaniya struktury lityh zagotovok monografiya / A.S. Nuradinov, M.R. Nahaev. – Groznyj, 2020. – 170 s.
4. *Ul'yanov, V.A.* Nепreryvnoe lit'yo zagotovok. Razlivochnye i promezhutochnye kovshi MNLZ: uchebnoe posobie / V.A. Ul'yanov, V.N. Gushchin. – M.: Infra-Inzheneriya, 2023. – 212 s.
5. *Strenk, F.* Peremeshivanie i apparaty s meshalkami / F. Strenk. – L.: Himiya, 1975. – 384 s.
6. *Shilyaev A.S.* Ul'trazvukovaya obrabotka rasplavov / A.S. Shilyaev. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1992. – 174 c.
7. *Protopopov, E.V.* Peremeshivanie rasplava pri produvke inertnym gazom v agregatah kovsh-pech' / E.V. Protopopov, L.V. Dumova, M.V. Temlyancev i dr. // Vestnik Rossijskoj akademii estestvennyh nauk. – 2021. – Vyp 24. – S. 76-83.
8. *Gel'fgat Yu.M.* Zhidkij metall pod dejstviem elektromagnitnyh sil / Yu.M. Gel'fgat, O.A. Lielausis, E.V. SHCHerbiniн. – Riga: Zinatne, 1976. – 247 s.
9. *Prokof'ev, A.B.* Magnitno-impul'snaya obrabotka materialov (MIOM): monografiya / A.B. Prokof'ev, I.A. Belyaeva, V.A. Glushchenkov i dr. – Samara: Izd-vo SNЦ, 2019. – 140.

- I.A. Belyaeva, V.A. Glushchenkov i dr. . – Samara : Izd-vo SNC, 2019. – 140.
10. *Glushchenkov, V.A.* Tekhnologiya magnitno-impul'snoj obrabotki materialov: monografiya / V.A. Glushchenkov, V.F. Karpuhin. – Samara : Fedorov, 2014. – 208 s.
11. *Glushchenkov, V.A.* Tekhnologiya i oborudovanie special'nyh vidov listovoj shtampovki: uchebnik / V.A. Glushchenkov. – Samara: Izd-vo SGAU, 2013.
12. *Yusupov, R. Yu.* Energeticheskie ustanovki dlya magnitno-impul'snoj obrabotki materialov: monografiya / R. Yu. Yusupov, V.A. Glushchenkov. – Samara: Fedorov, 2013. – 123 s.
13. *Glushchenkov, V.A.* O vozdeystvii impul'snyh magnitnyh polej na rasplavy / V.A. Glushchenkov, D. G. Chernikov, V.I. Nikitin i dr. // Metallurgiya mashinostroeniya. – 2012. – №4. – S. 47-50.
14. *Nikitin, K.V.* Teoreticheskoe i eksperimental'noe obosnovanie obrabotki rasplavov na osnove alyuminiya impul'snymi magnitnymi polyami / K.V. Nikitin, E.A. Amosov, V.I. Nikitin // Izvestiya vuzov. Cvetnaya metallurgiya. – 2015. – № 5. – S. 11–19.

Vladimir Glushchenkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Forming. E-mail: vgl@ssau.ru
Konstantin Nikitin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Metallurgy and Transport. E-mail: tlp@samgtu.ru