

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА НА ШЕСТИЭЛЕКТРОДНОЙ БИФИЛЯРНОЙ ПЕЧИ

Е. А. Волченков<sup>1</sup>, А. П. Стовпченко<sup>1,2</sup>, Л. Б. Медовар<sup>1</sup>,  
В. Л. Петренко<sup>1</sup>, Цонли Лиу<sup>3</sup>, Чуанхао Янг<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Инжиниринговая компания «Элмет-Рол».

03150, г. Киев-150, а. я. 259. E-mail: office@elmet-roll.com.ua

<sup>3</sup>Yantai Taihai Manoir Nuclear Equipment Co., Ltd. (THM)

264000, Hengyuan Road, 6, Laishan Zone, Yantai, China

Проведено компьютерное моделирование электрошлакового переплава (ЭШП) крупных кузнечных слитков на шестиэлектродной бифилярной печи. Исследованы особенности электромагнитных явлений и выделения тепла при использовании трехфазной схемы питания. Рассмотрены различные конфигурации расположения электродов, изучено влияние наличия и отсутствия сдвига фаз. Показано, что при трехфазной бифилярной схеме со сдвигом фаз на 120° происходит неравномерное выделение тепла в шлаковой ванне. Это явление наблюдается при идентичных электродах, что расходится с мнением о том, что именно различие между электродами является первопричиной неравномерного плавления при бифилярном подключении. Обсуждены преимущества и недостатки применения таких бифилярных печей ЭШП для выплавки крупных кузнечных слитков массой вплоть до 300 т. Библиогр. 13, табл. 4, ил. 6.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав (ЭШП); кузнечный слиток; бифилярная схема; трехфазное питание; неравномерное плавление

Электрошлаковый переплав (ЭШП) по-прежнему остается одним из основных способов производства высококачественных слитков из легированных сталей и специальных сплавов. В наибольшей мере преимущества ЭШП проявляются при выплавке крупных кузнечных слитков (масса которых сегодня составляет до 250 т) для поковок ответственного назначения [1–6]. Выделяют две основные схемы электрического питания печей ЭШП (рис. 1): монофилярную и бифилярную, каждая из которых имеет хорошо известные преимущества и недостатки [7].

Монофилярную и бифилярную схемы электрошлакового переплава применяют в промышленности как в однофазном [4–6, 9], так и в трехфазном [3, 10] вариантах.

Применение бифилярной схемы подключения предложено специалистами ИЭС им. Е. О. Патона [7] для уменьшения площади электрического контура и, соответственно, потерь в короткой сети печи ЭШП.

Теоретические и экспериментальные работы по изучению и применению трехфазной бифилярной схемы также проводились нашими предшественниками [7, 8, 11]. На Новокраматорском машиностроительном заводе была построена 200-тонная печь для выплавки крупных кузнечных слитков с

использованием такой схемы. При выплавке слитков большого диаметра на этой печи обнаружено неравномерное плавление электродов в бифилярных парах. Эту проблему не удалось полностью преодолеть из-за отсутствия отдельных приводов электродов, поэтому печь использовали для получения слитков меньшего размера.

Увеличение потребности в крупных кузнечных слитках ЭШП привело к постройке новых крупнотоннажных печей, число которых в мире продолжает расти. Это обуславливает интерес к обоснованию выбора монофилярной и/или бифилярной схемы, поскольку, несмотря на многолетний успешный опыт работы печей обоих типов, окончательный выбор в пользу той или иной схемы остается вопросом субъективных предпочтений. В Китае, который сегодня является безусловным лидером по общему производству электрошлакового металла, и, в частности, крупных кузнечных слитков ЭШП, преимущественно строят печи в трехфазном бифилярном исполнении. В то же время признанные производители крупных поковок в Японии, Германии, Южной Корее, Италии применяют однофазные монофилярные печи ЭШП (табл. 1).

Совместно с китайскими коллегами авторы рассматривали технологию плавки на 150-тонной трехфазной шестиэлектродной бифилярной печи

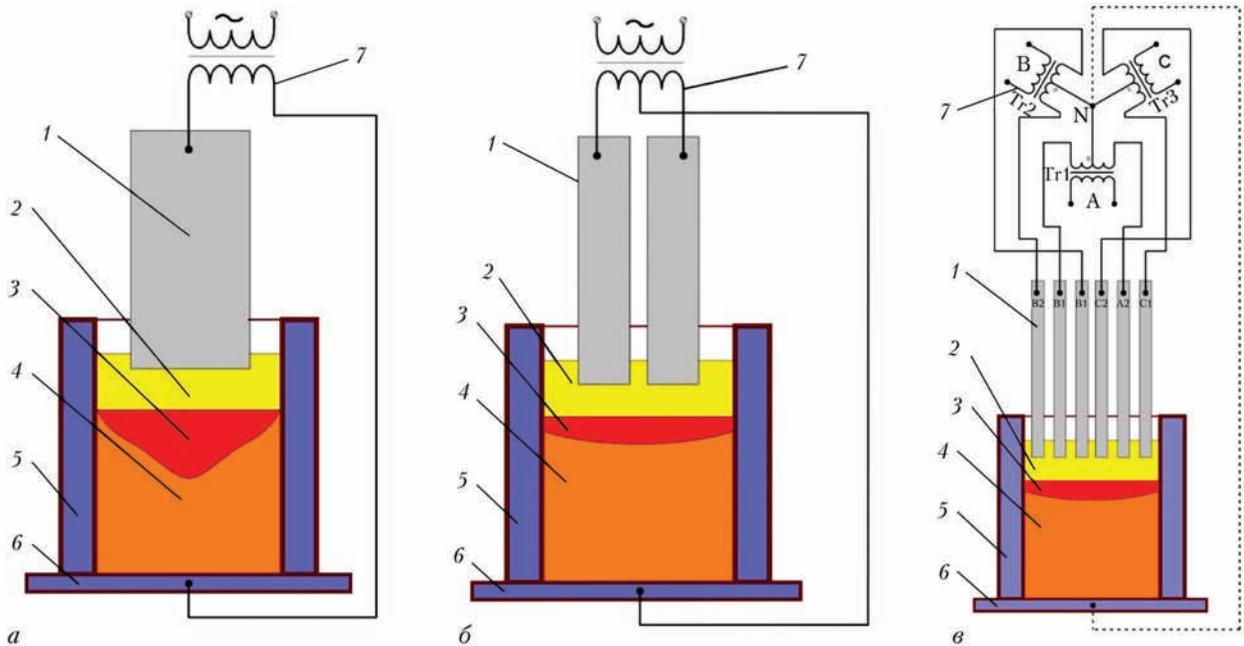


Рис. 1. Схемы ЭШП: однофазные монофилярная (а) и бифилярная (б); трехфазная бифилярная (в); 1 — расходимый электрод; 2 — шлаковая ванна; 3 — жидкая металлическая ванна; 4 — слиток; 5 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 6 — водоохлаждаемый поддон; 7 — источник питания

ЭШП (рис. 1, в) компании ТНМ (Китай). Эта печь построена для производства слитков из нержавеющей сталей для поковок атомного энергетического машиностроения.

При отработке технологии производства были случаи неравномерного плавления электродов в бифилярных парах, которое наблюдалось на подобных печах и ранее. В этой связи нами выполнено моделирование электромагнитных явлений и тепловыделения при ЭШП по трехфазной бифилярной схеме.

**Постановка задачи.** При моделировании приняты ряд допущений и упрощений [12], основным из которых было то, что все шесть электродов

идентичны по размерам и свойствам. Заглубление в шлак всех электродов одинаково и составило 50 мм. Электромагнитные свойства шлака по всему объему ванны одинаковы и соответствуют свойствам при температуре электрошлакового процесса (1750 °С).

Численные эксперименты провели с использованием параметров реальных плавок на трехфазной бифилярной печи ТНМ.

Геометрия расчетной области показана на рис. 2. Размеры объектов моделирования (шлак, электроды, кристаллизатор) и их основные свойства приведены в табл. 2.

При моделировании рассматривали фактическую геометрию (рис. 3, а) плавильного пространства в

Таблица 1. Современные крупнотоннажные печи ЭШП

Масса слитка, т	Завод (страна)	Схема подключения	Число электродов	k
450	Shanghai Heavy Machinery (Китай)	Трехфазная бифилярная	6	<0,35
200	Shanghai Heavy Machinery (Китай)	Трехфазная бифилярная	6	<0,35
150	ТНМ (Китай)	Трехфазная бифилярная	6	<0,35
130	Zhejiang ESR Nuclear Material Co. (Китай)	Трехфазная монофилярная	3	0,3...0,5
120	CFHI (Китай)	Трехфазная бифилярная	6	<0,35
80	ТНМ (Китай)	Трехфазная монофилярная	3	0,3...0,5
250	Forgiatura A. Vienna (Италия)	Однофазная монофилярная	1	0,5...0,7
150	Japan Steel Works (Япония)	Однофазная монофилярная	1	0,5...0,7
150	Doosan Heavy Industries (Южная Корея)	Однофазная монофилярная	1	0,5...0,7
145	ASO Siderurgica (Италия)	Однофазная монофилярная	1	0,5...0,7
145	Saarschmiede (Германия)	Однофазная монофилярная	1	0,5...0,7
145	Japan Casting & Forging Corp. (Япония)	Однофазная монофилярная	1	0,5...0,7
125	FOMAS Group (Италия)	Однофазная монофилярная	1	0,5...0,7
110	Japan Steel Works (Япония)	Однофазная монофилярная	1	0,5...0,7

Примечание. Коэффициент заполнения k определяется как отношение площади поперечного сечения расходимых электродов к площади поперечного сечения слитка.

Таблица 2. Исходные данные для моделирования

Шлак	состав	70 % CaF <sub>2</sub> + + 30 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	высота	300	мм
	электропроводность	300	См/м
	относительная магнитная проницаемость	30	
Электроды	материал	сталь AISI 316LN	
	диаметр	420	мм
	длина	3000	мм
	заглубление в шлак	50	мм
	количество	6	шт
	электропроводность	8,50·10 <sup>5</sup>	См/м
	относительная магнитная проницаемость	1,003	
Кристаллизатор	материал	медь М1	
	диаметр	2100	мм
	электропроводность	5,99·10 <sup>7</sup>	См/м
	относительная магнитная проницаемость	0,999	

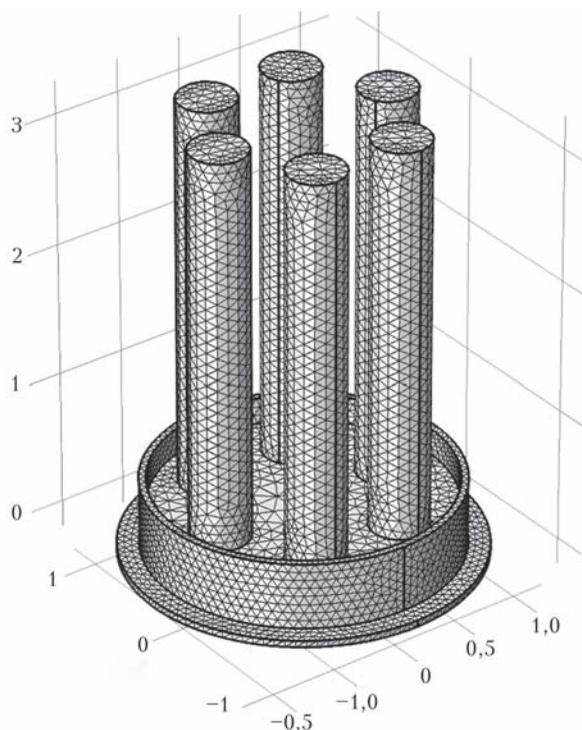


Рис. 2. Геометрия расчетной области

кристаллизаторе диаметром 2100 мм: шесть электродов расположили по окружности на расстоянии 150 мм от стенки кристаллизатора. Схема реализации в модели трехфазной бифилярной схемы с подключением средних точек трех однофазных трансформаторов к поддону печи приведена на рис. 3, б.

Изменяли взаимное расположение бифилярных электродов (табл. 3): электроды максимально сдвинуты (варианты 1–1 и 1–2), расположены равномерно (2–1 и 2–2) и максимально удалены друг от друга (3–1 и 3–2). Для каждого варианта изучили влияние наличия и отсутствия сдвига фаз. Варианты со сдвигом фаз на 120° описывают реальные условия.

Следует отметить, что отсутствие сдвига фаз (варианты 1–1, 2–1 и 3–1) означает синфазность

и параллельную работу всех трансформаторов. В этом случае имеет место уже не трехфазная бифилярная схема, а однофазная бифилярная с тремя парами электродов и чередованием полярности. Свойственное трехфазной схеме преимущество в энергоэффективности при использовании такой схемы подключения теряется.

**Результаты моделирования.** Для каждого варианта получено распределение магнитных полей и разности потенциалов, а также тепловыделения в шлаке.

Анализ данных, приведенных на рис. 4, а, позволяет сравнить интенсивность и характер распределения магнитных полей и электрических потенциалов в начальный момент времени в поперечном сечении шлаковой ванны на расстоянии 50 мм от зеркала

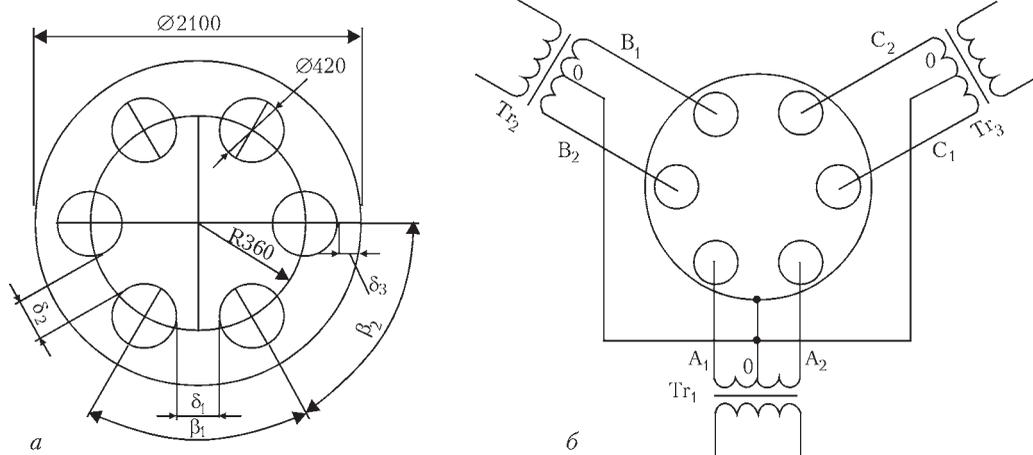


Рис. 3. Схема расположения (а) электродов в кристаллизаторе (обозначения в соответствии с табл. 3). Принципиальная схема электрического подключения (б): А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub> — электроды фазы А (подключены к трансформатору Tr<sub>1</sub>); В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub> — электроды фазы В (трансформатор Tr<sub>2</sub>); С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub> — электроды фазы С (трансформатор Tr<sub>3</sub>)

Т а б л и ц а 3. Варианты расчетов

Параметр	Варианты					
	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
Сдвиг фаз, $\varphi$ (град)	0	120	0	120	0	120
Расстояние между бифилярными электродами, $\delta_1$ (мм)	100		268			423
Расстояние между электродами соседних фаз, $\delta_2$ (мм)	423		268			100
Расстояние между электродами и стенкой кристаллизатора, $\delta_3$ (мм)			150			
Угол между бифилярными электродами, $\beta_1$ (град)	44		60			76
Угол между электродами соседних фаз, $\beta_2$ (град)	76		60			44

ванны (в одном сечении с торцами электродов). Направления магнитных полей показаны векторами, величина которых пропорциональна их интенсивности. Отметим, что под магнитными полями подразумевается результирующее магнитное поле, которое представляет собой суперпозицию магнитных полей, вызванных током каждого электрода. Электрические потенциалы показаны цветной заливкой, их величина определяется цветной шкалой.

При сдвинутых электродах и без сдвига фаз (вариант 1-1) магнитные поля максимальной интенсивности наблюдаются в зазоре между бифилярными электродами, что закономерно для такого подключения. Поля располагаются по окружности вокруг электродов и направлены по часовой стрелке и против нее в зависимости от потенциалов. Направление полей последовательно изменяется на противоположное с частотой 50 Гц. При равноудаленном расположении электродов (вариант 2-1) магнитные поля наибольшей интенсивности также наблюдаются в зазорах между электродами, однако они расположены равномерно между всеми электродами. В центральной части шлаковой ванны интенсивных полей нет. При максимально удаленных электродах (вариант 3-1) общий характер распределения магнитных полей сохраняется, однако поля наибольшей интенсивности наблюдаются между сдвинутыми электродами соседних фаз.

При сдвиге фаз на 120° при всех вариантах расположения электродов магнитные поля наблюдаются практически по всему сечению ванны. Кольцевое распределение и противоположная направленность полей вокруг бифилярных электродов сохраняется. Однако возникают поля, которые образуют эллипсовидные контуры и попарно охватывают электроды соседних фаз. Из-за сдвига бифилярных пар на 120°

при чередовании полярности электроды соседних фаз также сдвинуты на 120°. Вследствие этого два электрода соседних фаз частично ведут себя как один расщепленный монофилярный электрод, вокруг которого и возникают кольцевые магнитные поля. Направление этих полей и потенциалы последовательно изменяются по синусоиде для трех фаз (рис. 4, б) с частотой 50 Гц. Картина поля потенциалов при этом теряет симметричность. Сдвинутое расположение (вариант 1-2) бифилярных электродов приводит к закономерному росту интенсивности полей в зазоре между ними. Напротив, сближение электродов соседних фаз (вариант 3-2) не приводит к повышению интенсивности магнитных полей между ними. При равноудаленном расположении (вариант 2-2) электродов наблюдается в целом равномерная картина полей по всему сечению шлаковой ванны.

Характер тепловыделения (рис. 5) при всех вариантах расположения электродов и сдвига фаз рассматривали в том же поперечном сечении шлаковой ванны на расстоянии 50 мм от зеркала шлака.

При равноудаленном расположении электродов и без сдвига фаз (вариант 2-1) наблюдается наиболее равномерное выделение тепла между всеми электродами. Такая картина закономерна для однофазной бифилярной схемы подключения с одинаковым расстоянием между электродами и чередованием полярности. Сближение бифилярных электродов (варианты 1-1 и 1-2) приводит к большему тепловыделению между ними, что объяснимо. Однако, при сдвиге фаз на 120° тепловыделение между электродами соседних фаз меньше, чем в отсутствие сдвига фаз. В случае увеличения расстояния между бифилярными электродами (варианты 3-1 и 3-2) наибольшее выделение тепла наблюдается между ближайшими электродами соседних фаз, что также объяснимо.

Для более полного представления о характере тепловыделения по высоте шлаковой ванны были изучены поперечные сечения на различных расстояниях от зеркала шлака (табл. 4): -50 мм (в одном сечении с торцами электродов), -150 мм (на половине высоты шлаковой ванны) и -250 мм (вблизи условной границы раздела с металлической ванной).

Полученные результаты показали интересное явление: при сдвиге фаз на 120° наблюдается неравномерное тепловыделение (табл. 4, выделено красными стрелками) под электродами бифилярных пар. Эта неравномерность характерна для всех изученных вариантов расположения электродов, сохраняется по высоте шлаковой ванны и может привести к неравномерному плавлению электродов. В вариантах без сдвига фаз неравномерного выделения тепла в бифилярных парах нет.

Следует подчеркнуть, что такое явление проявляется при абсолютно идентичных (по разме-

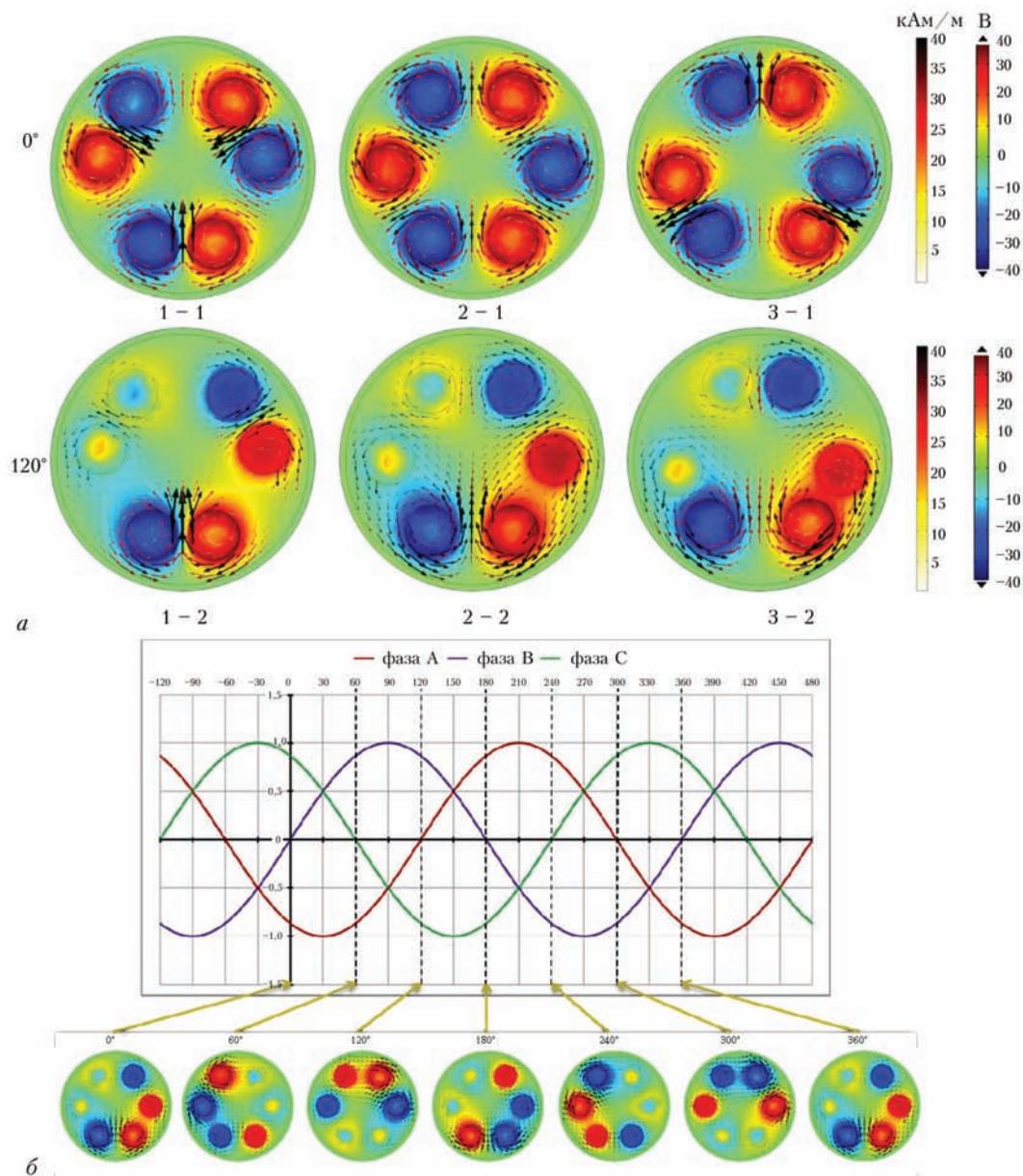


Рис. 4. Характер распределения потенциалов и магнитных полей (напряженностей магнитного поля) (а) для расчетных вариантов (табл. 3) и пример динамики изменения потенциалов для варианта 2–2 (б)

рам и свойствам) электродах. Это расходится с известным мнением о том, что именно различие между электродами является первопричиной неравномерности плавления при такой схеме подключения. Решить проблему только изменением взаимного расположения электродов не удастся: различное тепловыделение наблюдается и при максимально сдвинутых электродах, и при максимально отдаленных друг от друга.

Для предотвращения неравномерности плавления электродов при трехфазной бифилярной схеме следует предусматривать специальные меры в конструкции и системе управления печи для регулирования заглужения электродов.

**Обсуждение результатов,** преимуществ и недостатков исследованной схемы подключения.

Обнаруженный эффект неравномерности тепловыделения может привести к неравномерному плавлению электродов в бифилярной паре, что является одной из технологических проблем трехфазной бифилярной схемы.

Еще одним недостатком всех многоэлектродных схем ЭШП является низкий коэффициент заполнения. На рассматриваемой печи при выплавке слитков диаметром 2100 мм он составляет всего 0,24, а производительность плавки — 3000 кг/ч (в 1,5...2 раза выше производительности плавления аналогичного слитка на одноэлектродной печи с коэффициентом заполнения 0,5...0,7). Это только усугубляет проблему неравномерного плавления электродов. Уменьшение производительности плавления ведет к ухудшению качества поверхно-

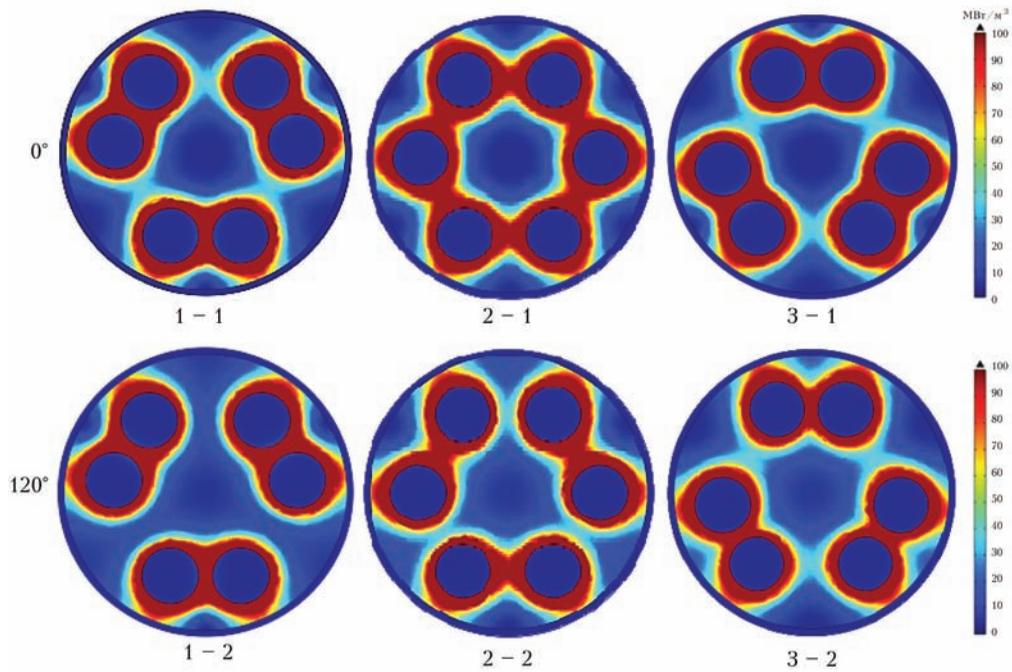
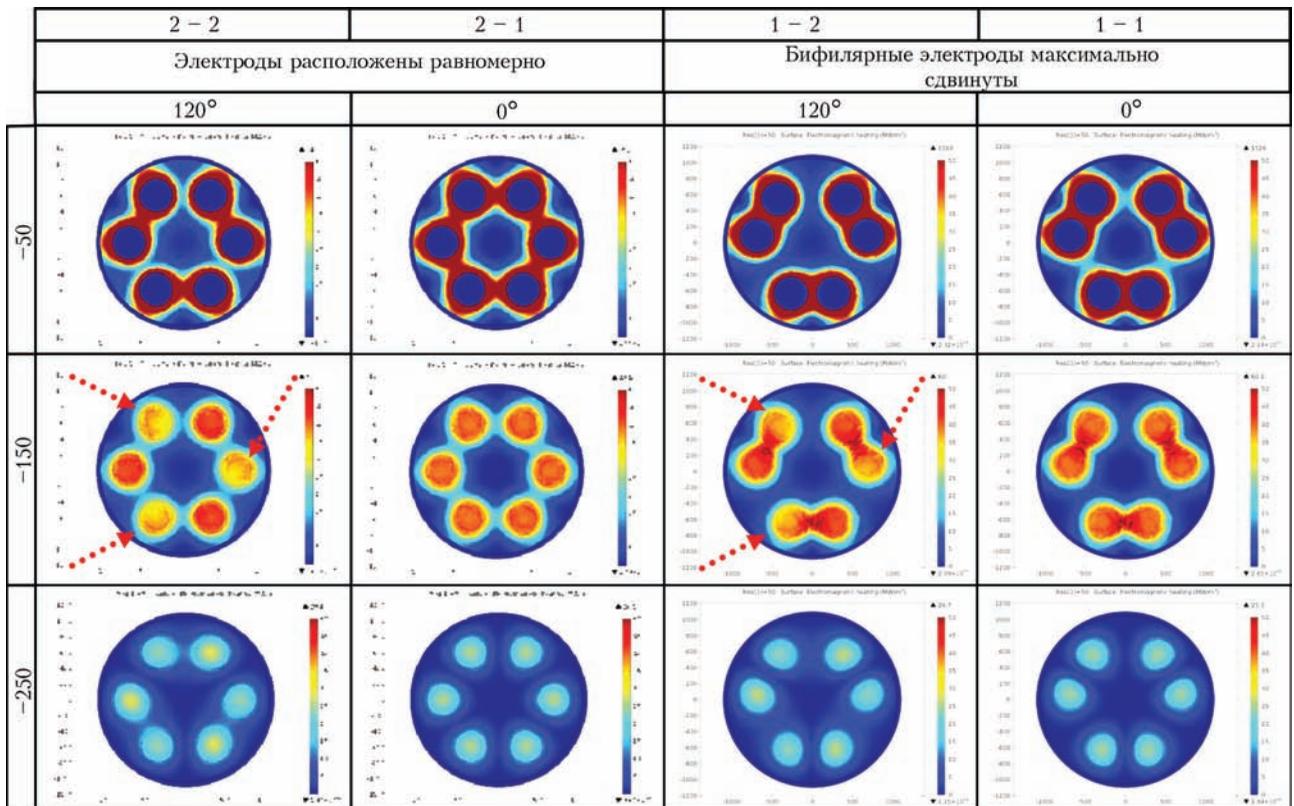


Рис. 5. Характер распределения джоулева тепла (обозначения согласно табл. 3)

сти слитка. Из-за повышенной производительности и, как следствие, образования глубокой металлической ванны, такие печи больше подходят для выплавки слитков из сплавов с узким температурным интервалом затвердевания (малой двухфазной зоной) и не склонных к сегрегации — например, низкоуглеродистых аустенитных сталей.

В то же время, многоэлектродные печи обладают рядом неоспоримых преимуществ. Так, в условиях периферийного размещения нескольких электродов и при практически отсутствии тока, проходящего через слиток, жидкометаллическая ванна будет иметь более плоскую форму, чем при центральном расположении одного электрода.

Таблица 4. Характер распределения джоулева тепла по высоте шлаковой ванны, МВт/м³



ЭШП крупных кузнечных слитков по монофилярной одноэлектродной схеме делает необходимым использование расходуемых электродов соответствующих размеров и массы. Например, при стандартном коэффициенте заполнения 0,5...0,7 для выплавки слитка диаметром 2100 мм нужен электрод диаметром 1450...1750 мм. Изготовление качественного электрода таких размеров является отдельной сложной технологической задачей.

Успешный опыт эксплуатации бифилярных печей при выплавке листовых и полых слитков подтверждает энергетическую эффективность этой схемы по сравнению с монофилярной за счет уменьшения площади электрического контура и снижения потерь в короткой сети. Применение трехфазной схемы также исключает необходимость использования дорогостоящих компенсирующих устройств, необходимых для снижения негативного влияния однофазной нагрузки на питающую сеть.

### Выводы

Моделированием электромагнитных явлений и выделения тепла при трехфазной бифилярной схеме питания печи ЭШП показано неравномерное тепловыделение в бифилярных парах при сдвиге фаз на 120°.

Такое явление наблюдается при идентичных размерах и свойствах электродов, но это расходится с известным мнением о том, что именно различие между электродами является первопричиной неравномерности плавления при такой схеме подключения.

Трехфазная шестиэлектродная бифилярная схема ЭШП сочетает в себе простоту и энергетическую эффективность питания, однако требует применения специальных мер для обеспечения равномерного плавления электродов в бифилярных парах.

1. *Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков* / Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, А. П. Сто-

впченко [и др.] // Современная электрометаллургия. — 2010. — № 3. — С. 5–10.

2. *Largest steam turbine rotor ever manufactured from a nickel base alloy* / A. Diwo, B. Donth, N. Blaes [et al.] // Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting (IFM). — Pittsburg (USA), 12–15 September (2011). — P. 224–228.
3. *Zhongli L. The application of ESR technology for nuclear power equipments in China* / L. Xihai, Y. Chuanhao // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Medovar Memorial Symposium (MMS100). — Kyiv (Ukraine), 7–10 June (2016). — P. 28–31.
4. *Internal quality of 2150 mm-diameter ingot manufactured using new 150-ton ESR furnace* / M. Tezuka, S. Yamamoto, F. Takahashi [et al.] // Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting (IFM). — Tokyo (Japan), 29.09–03.10 (2014). — P. 90–94.
5. *Installation of 150-ton new ESR facility and production of 120-ton ESR ingot for 12Cr HIP rotor forgings* / I. Son, W. Lee, Kw. Sim [et al.] // Ibid. — Tokyo (Japan), 29.09–03.10 (2014). — P. 333–337.
6. *Operational experience of large sized ESR plants and attainable quality of ESR ingots with diameter of up to 2600 mm* / M. Kubin, A. Scheriau, M. Knabl [et al.] // Proceedings of the International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting (LMPC). — Austin (Texas, USA), 22–25 September (2013). — P. 57–64.
7. *Электрошлаковые печи* / Медовар Б. И., Ступак Л. М., Бойко Г. А. [и др.]; под ред. Б. Е. Патона. — К.: Наукова думка, 1976. — 414 с.
8. *Выбор схемы питания семиэлектродной электрошлаковой печи* / Ю. М. Миронов, В. А. Тарасов, О. П. Бондаренко [и др.] // Специальная электрометаллургия. — 1975. — Вып. 28. — С. 25–31.
9. *Bettoni P. Large ESR forging ingots and their quality in production* / P. Bettoni, U. Biebricher, H. Franz [et al.] // La Metallurgia Italiana. — 2014. — № 10. — P. 13–21.
10. *Changzhou W. Structure modification and constant remelting speed control of a 120-t three-phase electroslag furnace* / W. Changzhou, S. Jinchun // China Foundry. — 2012. — V. 9, № 4. — P. 370–375.
11. *Патон Б. Е. Схема питания многоэлектродной печи ЭШП* / Б. Е. Патон, В. К. Лебедев, Б. И. Медовар [и др.] // Специальная электрометаллургия. — 1970. — Вып. 7. — С. 3–7.
12. *Simulation of electrical and thermal phenomena at electroslag remelting on a three-phase circuit* / L. Medovar, Ye. Volchenkov, V. Petrenko [et al.] // Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Modelling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking (SteelSim). — Bardolino (Lake Garda, Italy), 23–25 September (2015). — P. 9.

Computer modeling of electroslag remelting (ESR) of large forge ingots in six-electrode bifilar furnace was made. The peculiarities of electromagnetic phenomena and heat generation in use of three-phase supply circuit were investigated. Different configurations of arrangement of electrodes were considered and the effect of presence and absence of phase shift was studied. It was shown that at three-phase bifilar diagram with phase shift by 120° the non-uniform heat generation in the slag pool is occurred. This phenomenon is observed at identical electrodes, that contradicts the opinion that the difference between the electrode is the prime cause of non-uniform melting at the bifilar connection. Advantages and drawbacks of application of these bifilar furnaces of ESR for melting of large forge ingots of mass up to 300 t are discussed. Ref. 13, Tables 4, Figures 6.

**Keywords:** *electroslag remelting (ESR); forge ingot; bifilar diagram; three-phase power supply; non-uniform melting*

Поступила 24.10.2016