



УДК 669.187.56.001.3

СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ МЕТАЛЛА СЛИТКОВ ПРИ ЭШП

И. В. Протокилов, В. Б. Порохонько

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев, ул. Боженко 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены способы воздействия на кристаллизацию металла слитков при электрошлаковом переплаве, основанные на введении в расплав модифицирующих добавок и инокуляторов, импульсном электропитании, создании колебаний расплава, вращении расходуемого электрода, дугошлаковом переплаве, продувке ванны газами, применении токоподводящего кристаллизатора, электромагнитном воздействии. Описаны механизмы, обеспечивающие гомогенизацию и измельчение структуры металла, проанализированы преимущества и недостатки различных способов воздействия на электрошлаковый процесс. Показано, что несмотря на большое количество исследований, свидетельствующих о положительном влиянии рассмотренных способов воздействия на структуру и свойства слитков ЭШП, их результаты не нашли широкого промышленного применения из-за присущих им недостатков. Отмечено, что эффективным инструментом управления кристаллизацией металла при ЭШП являются внешние магнитные поля, позволяющие осуществлять бесконтактное силовое воздействие на расплавы шлаковой и металлической ванн. Для повышения эффективности воздействия на структуру металла предлагается использование импульсных магнитных полей, в том числе созданных разрядами емкостных накопителей на магнитный контур, и комплексных способов управления кристаллизацией слитков ЭШП, основанных на тепловых и гидродинамических механизмах. Библиогр. 44, ил. 10.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; внешнее физическое воздействие; слиток; металлическая ванна; кристаллизация; структура

Электрошлаковый переплав (ЭШП) имеет ряд технологических и металлургических преимуществ, обуславливающих эффективность его использования для получения слитков и слябов широкого класса металлов и сплавов [1–4]. Однако слитки ЭШП имеют крупнокристаллическую структуру со столбчатыми кристаллитами, вытянутыми в направлении теплоотода. Такое строение слитка способствует образованию в металле различных неоднородностей и ликвационных дефектов, наличие которых увеличивается с повышением степени легирования металла и сечения выплавляемого слитка. Кроме того, крупнозернистый металл плохо поддается деформационной обработке. Для достижения высоких показателей механических свойств и облегчения процесса деформации литого металла следует получать слитки с равноосной мелкозернистой структурой. Поэтому разработка способов управления процессом первичной кристаллизации слитков является важной и актуальной задачей дальнейшего совершенствования электрошлаковых технологий.

Существуют различные способы и технологические приемы управления кристаллизацией металла

при ЭШП, основанные на использовании металлургических механизмов и внешних физических воздействий (рис. 1). Это введение в ванну частиц-модификаторов [1, 2, 5–8], микро- и макрохолодильников (инокуляторов), армирующих добавок [1, 2, 9, 10], создание в ванне упругих колебаний и различных механических вибраций [1, 2, 11–15], вращение расходуемого электрода [16, 17], продувка металлургической ванны газами (барботирование) [18–21], импульсное электропитание [22–25], электромагнитное воздействие [26–33] и др. Широкие возможности управления кристаллизацией открывает использование различных схем переплава с применением токоподводящего кристаллизатора [34–40], а также дугошлаковый переплав [41–44].

Одним из наиболее простых способов измельчения кристаллической структуры литого металла является введение в него нерастворимых частиц-модификаторов, стимулирующих образование центров кристаллизации. Наиболее применимы для этих целей редкоземельные металлы, бор, кальций, магний, барий, титан, соединения типа нитридов, оксидов, боридов, карбидов и пр.

© И. В. ПРОТОКОВИЛОВ, В. Б. ПОРОХОНЬКО, 2014

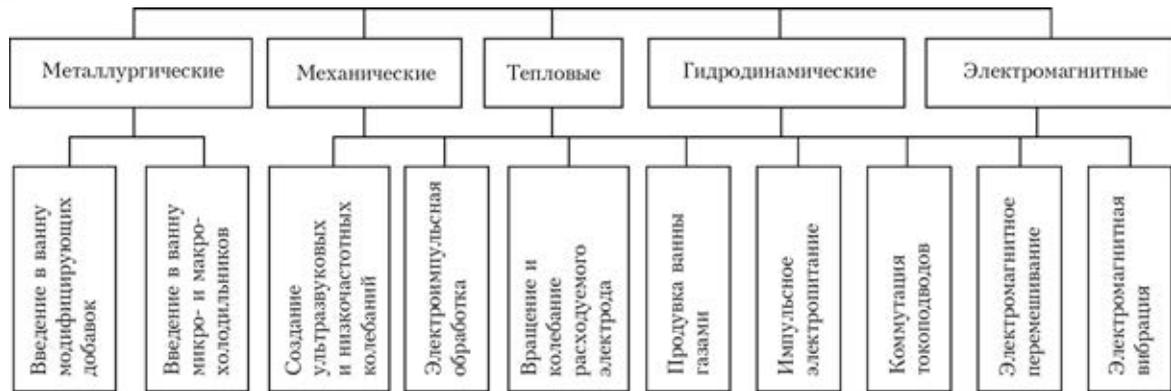


Рис. 1. Способы воздействия на кристаллизацию металла слитков при ЭШП

Способы модифицирования металла при ЭШП подробно описаны в работах [1, 2, 5–7]. Их особенностью является то, что модифицирующие вещества вводятся в жидкий металл преимущественно через расплавленный шлак (рис. 2, а), плотность которого совпадает с плотностью большинства модификаторов, что в свою очередь затрудняет их введение в металлическую ванну. Кроме того, продолжительное взаимодействие мелкодисперсных модификаторов со шлаковым расплавом может приводить к их дезактивации. Указанные недостатки не всегда позволяют обеспечить воспроизводимость положительных конечных результатов, т. е. улучшение служебных характеристик металла.

Для преодоления данных затруднений модификаторы вводят в порошкообразном состоянии через полый электрод (рис. 2, б) или в виде порошковой проволоки, подаваемой в плавильную зону. Также модификаторы можно вводить в расплав путем их восстановления из материалов, являющихся компонентами флюса [8]. Недостатком последнего способа является возможность истощения флюса по мере наплавления металла.

В целом эффективное использование модифицирования металла при ЭШП осложняется тем, что мелкодисперсные частицы трудно ввести в металл так, чтобы они равномерно распределились по всему сечению слитка.

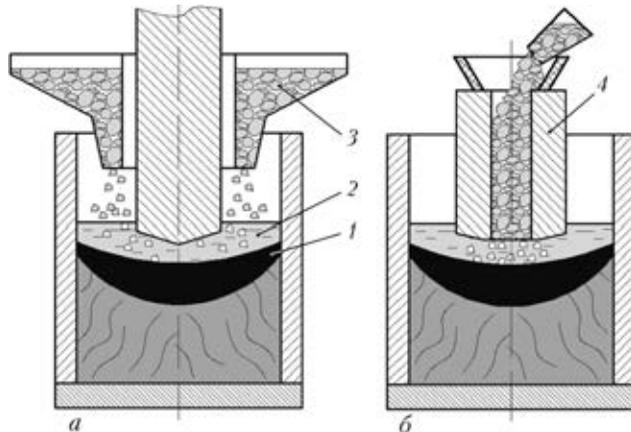


Рис. 2. Схемы введения в жидкометаллическую ванну модификаторов и инкуляторов-холодильников при ЭШП с подачи частиц на поверхность шлаковой ванны (а) и через полый электрод (б): 1 – металлическая ванна; 2 – шлаковая ванна; 3 – модифицирующие добавки (инкуляторы); 4 – полый электрод

При увеличении размера частиц их введение в жидкометаллическую ванну при ЭШП существенно облегчается. Поэтому предпочтительным является применение дисперсных инкуляторов-холодильников, размер которых варьируется в широком диапазоне – от 1 до 60 мм [1]. При этом их количество может достигать 40 % и более массы расплавляемого электродного металла.

Достоинство инкуляторов-холодильников заключается в том, что они могут быть введены непосредственно в область фронта кристаллизации, что коренным образом изменяет структуру и качество металла. Попадая в металлическую ванну, инкуляторы-холодильники играют роль подложек, на которых происходит кристаллизация окружающего расплава. В зависимости от размеров и массы инкуляторов они по-разному взаимодействуют с металлическим расплавом, растворяясь в нем полностью или частично. В последнем случае можно получить структуру, армированную инкулирующими добавками.

Возможны разные варианты введения холодильников в металлургическую ванну (рис. 2). Одни реализуются при использовании холодильников малого размера, другие – сверхкрупных холодильников [1, 2, 9, 10].

Анализируя данные исследования, можно сделать вывод, что использование инкуляторов при ЭШП способствует измельчению макроструктуры металла и подавлению макросегрегационных дефектов, повышению ударной вязкости и изотропности механических свойств металла. В то же время следует тщательно следить за равномерностью распределения частиц инкуляторов в объеме металла, их окисленностью, влажностью и пр. В противном случае может повышаться содержание неметаллических включений в металле и снижаться показатели его механических свойств.

Использование модификаторов и инкуляторов может приводить к изменению химического состава выплавляемого металла, что недопустимо для широкого класса специальных сталей и сплавов, в том числе сложнолегированных титановых, химический состав которых строго регламентирован.

Поэтому при электрошлаковых технологиях применяются способы внешнего физического воз-

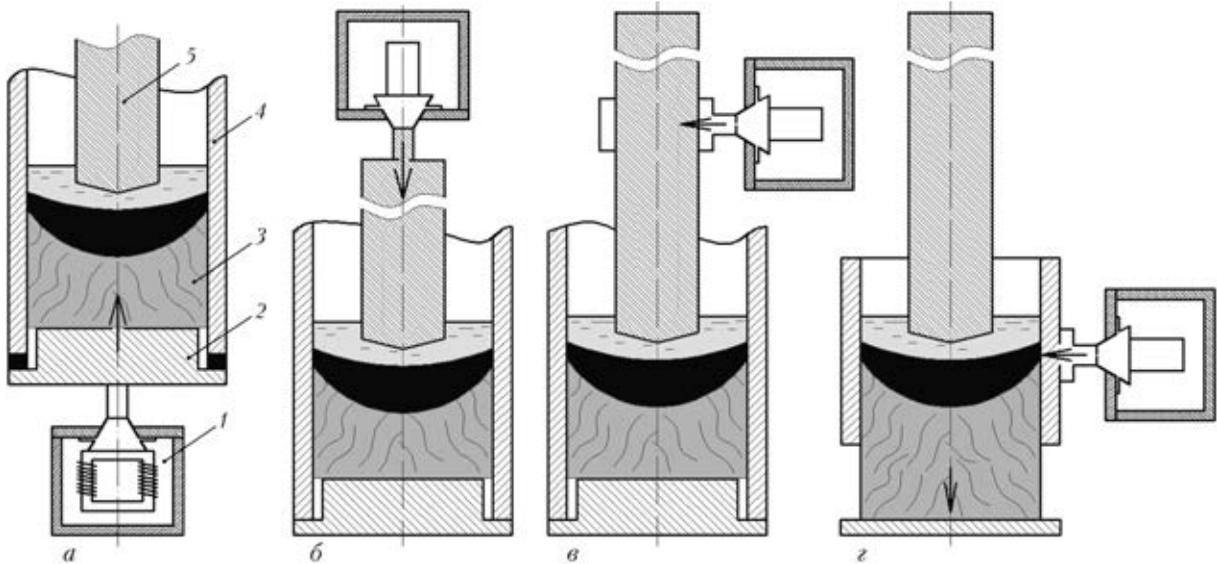


Рис. 3. Схемы введения механических колебаний при ЭШП через поддон (а), расходимый электрод (б, в), кристаллизатор (г): 1 – генератор упругих колебаний; 2 – поддон; 3 – слиток; 4 – кристаллизатор; 5 – расходимый электрод

действия на кристаллизацию металла, которые не изменяют его химический состав и не вносят посторонние примеси.

Одним из таких способов является механическая вибрация кристаллизующегося металла. Вибрация и вызванные ею упругие колебания разрушают образующиеся в переохлажденной жидкости кристаллы, увеличивая тем самым количество центров кристаллизации. Положительная роль вибраций и виброимпульсных воздействий на качество металла отмечена в работах [1, 2, 11–15]. Показано, что металл, закристаллизовавшийся под воздействием упругих колебаний, отличается более равноосным зерном, равномерным распределением упрочняющих фаз и существенным уменьшением размера микрочерна.

При ЭШП используются как низкочастотные (0,5...100,0 Гц), так и ультразвуковые колебания – 20 кГц и выше [1]. Степень диспергирования литой структуры повышается с увеличением частоты колебаний, при этом разрушение транскристаллитности происходит при 40...50 Гц и выше [1].

Некоторые способы введения в ванну механических колебаний приведены на рис. 3. Для их создания применяют электрогидроимпульсные, электрогидравлические, электромагнитные, пневматические, магнитострикционные, механические и другие преобразователи [15]. Наиболее распространенным является способ введения колебаний через поддон (рис. 3, а). Его особенность заключается в том, что осесимметричные упругие колебания передаются через поддон и слиток непосредственно на фронт кристаллизации металла, увеличивая эффективность его обработки. Однако следует учитывать, что с увеличением в процессе переплава высоты слитка изменяется резонансная частота колебательной системы, а сами колебания затухают [13].

При введении колебаний в ванну через расходимый электрод (рис. 3, б, в), помимо воздействия на кристаллизацию, появляется возможность

влиять на процессы каплеобразования электродного металла. Так, в работе [12] показано, что возбуждение ультразвуковых колебаний в электроде способствует увеличению среднего времени образования капли и ее размера. При этом развитие кавитационных процессов способствует улучшению условий взаимодействия капли с расплавленным шлаком и обеспечивает повышение степени рафинирования металла. Установлен факт повышения скорости плавления электрода при наложении изгибных на 20...30 % (рис. 3, в) и продольных на 5...10 % (рис. 3, б) ультразвуковых колебаний. Отмечено, что при одинаковом качественном воздействии эффективность изгибных колебаний выше, чем продольных.

Следует подчеркнуть, что применение ультразвуковых колебаний при ЭШП может иметь и негативные последствия, заключающиеся в ухудшении формирования поверхности слитков, снижении эффективности очищения металла от неметаллических включений и образовании полосчатости структуры по высоте слитка [1, 11].

При ЭШП значительная часть тепла, поступающего в металлическую ванну, передается с каплями электродного металла. Поэтому место расположения источника каплеобразования существенно влияет на форму металлической ванны и качество металла слитка.

Смещение зоны тепловыделения от центра к периферии ванны может быть достигнуто в процессе вращения расходимого электрода (рис. 4) [16, 17]. Суть способа заключается в придании электроду однонаправленного или реверсивного вращения вокруг своей оси (рис. 4, а, б) или оси ванны при асимметричном расположении электрода (рис. 4, в). Скорость вращения электрода зависит от его диаметра. Для электродов диаметром 40...250 мм она обычно составляет 30...90 об/мин [16–17].

Вращение электрода приводит к появлению центробежной силы, в результате воздействия которой

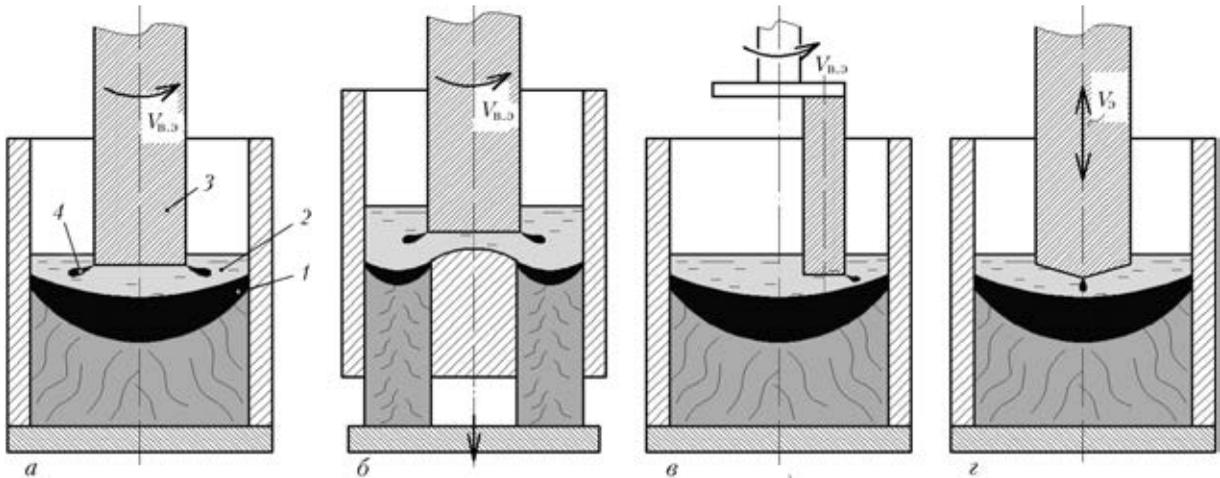


Рис. 4. Схемы ЭШП с вращением (а-б) и возвратно-поступательным перемещением (z) расходуемого электрода: 1 – металлическая ванна; 2 – шлаковая ванна; 3 – расходуемый электрод; 4 – капля электродного металла

достигают периферийного отрыва каплей металла от оплаваемого торца электрода и рассредоточения места их падения в металлическую ванну. Указанные эффекты позитивно влияют на форму и глубину металлической ванны и, как следствие, на направление роста кристаллов. Фронт кристаллизации становится более плоским, что обеспечивает рост кристаллов в осевом направлении. При этом уменьшается расстояние между осями кристаллов I и II порядка [17].

При ЭШП с вращением электрода рафинирующая способность процесса увеличивается, поскольку пленка на торце электрода более равномерна, толщина ее меньше, а капли проходят более длинный путь в шлаке.

В работе [16] показано, что при правильно выбранной скорости вращения расходуемого электрода можно достичь повышения производительности процесса ЭШП на 40 % и снизить расход электроэнергии на 30 %.

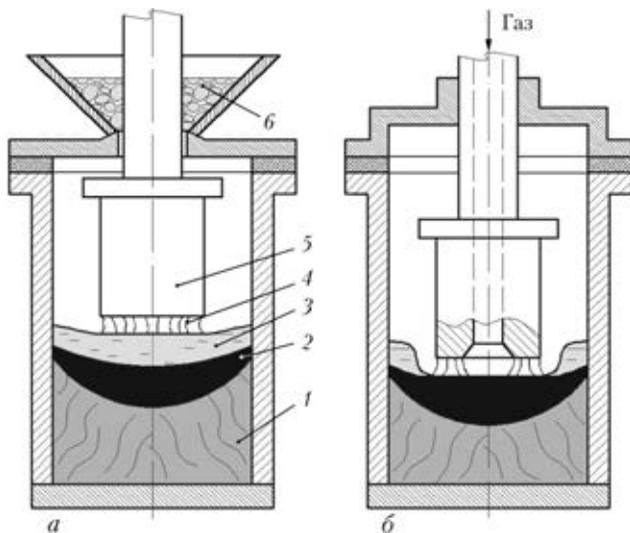


Рис. 5. Схемы ДШП с применением флюсового затвора (а) и в камерной печи с подачей газа в полость электрода (б) [42]: 1 – слиток; 2 – металлическая ванна; 3 – шлаковая ванна; 4 – электрическая дуга; 5 – расходуемый электрод; 6 – флюсовый затвор

При переплаве стали различных марок необходим выбор индивидуальной скорости вращения, а в случае скорости вращения выше оптимальной может резко возрастать содержание неметаллических включений мелкого размера [16].

Уменьшение глубины металлической ванны и улучшение условий кристаллизации слитка обеспечивает разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона способ дугошлакового переплава (ДШП) [41–44]. При ДШП расходуемый электрод оплавляется электрической дугой, горящей между его торцом и поверхностью шлаковой ванны. Для реализации ДШП необходимо обеспечить в зоне горения дуги контролируемую газовую атмосферу, что достигается с помощью применения флюсового затвора (рис. 5, а) или переплава в камерной печи (рис. 5, б).

Слой шлака, покрывающий жидкий металл, вызывает рассредоточение тепла от дуги по сечению металлической ванны, тем самым снижая ее глубину и делая фронт кристаллизации более плоским, чем при классическом ЭШП. Этому также способствует рассредоточенный перенос каплей в ванну, отрыв которых происходит по всему торцу электрода. Более равномерному распределению тепла по сечению ванны благоприятствует использование полого электрода, через полость которого осуществляется продувка газом (рис. 5, б).

По сравнению с ЭШП способ ДШП позволяет в 1,5 раза сократить расход электроэнергии и почти в 2 раза уменьшить расход флюса [42].

Принудительное механическое перемешивание расплава и воздействие на кристаллизацию металла может быть достигнуто в результате барботирования шлаковой и металлических ванн путем их продувки струями газов [4, 15, 18–21]. Для выполнения этой операции используют различные технологические схемы переплава с подачей газа через трубчатые элементы, размещенные вдоль боковой поверхности электрода (рис. 6, а), в полость электрода (рис. 6, б), в зазор между стенкой кристаллизатора и слитком (рис. 6, в), в отверстия в стенке кристаллизатора (рис. 6, г), в полость дорна при выплавке полых слитков (рис. 6, д) и др. Приме-

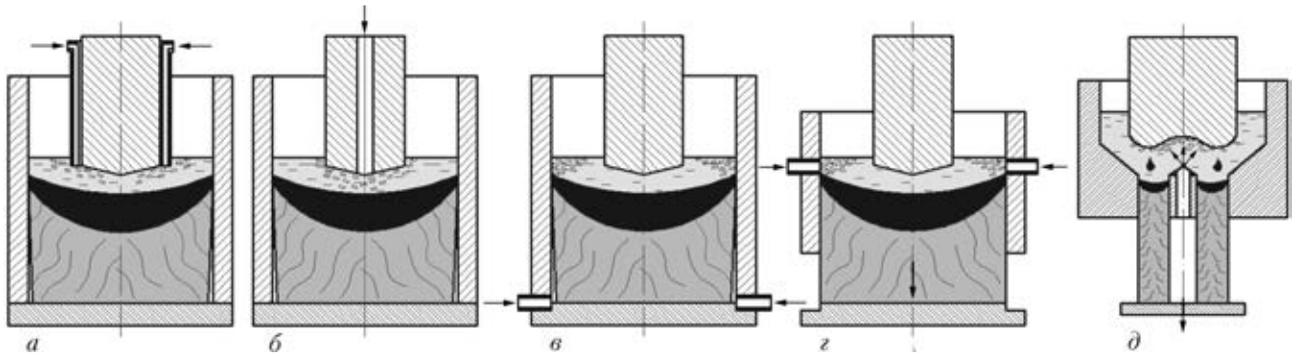


Рис. 6. Различные схемы (а–д) введения газовых смесей в шлаковую и металлическую ванны при ЭШП [4, 19]

няют преимущественно инертные газы, азот (есть сведения об использовании смеси азота и кислорода [21]). При выплавке высокорекреакционных металлов, таких как титан и его сплавы, допустимо использование только инертных газов (аргон, гелий).

Продувка газом способствует интенсивному перемешиванию расплава ванны, ускорению диффузионных процессов, удалению неметаллических и газовых включений, что приводит к благоприятному изменению структуры слитка и его физических свойств [15, 20].

При выплавке полых слитков подача газа через дорн навстречу расходуемому электроду обеспечивает его принудительное оплавление в центральной части и смещение очагов каплеобразования к периферии электрода, что улучшает технологичность процесса и качество слитка (рис. 6, д) [19].

Другим способом управления процессом первичной кристаллизации при ЭШП является принудительное периодическое изменение теплового и механического состояния металлической ванны с помощью импульсного питания электрошлакового процесса электрической энергией (модуляции мощности) (рис. 7) [22–25]. Благодаря тому, что шлаковая и металлическая ванны характеризуются значительной тепловой инерционностью, можно в широких пределах изменять режимы импульсного электропитания при сохранении устойчивости электрошлакового процесса и высокого качества формирования слитка.

Импульсное электропитание оказывает комплексное воздействие на электрошлаковый процесс, периодически изменяя теплое и гидродинамическое состояние ванны. Изменение за счет пауз электропитания температурного градиента в двухфазной зоне способствует более интенсивному зарождению кристаллов на фронте кристаллизации. При этом снижение тепловой мощности, выделяемой в шлаковой ванне, приводит к эквивалентному уменьшению объема металлической ванны. Кроме изменения температурного режима, периодическое изменение тока плавки вызывает механические колебания ванны. Все это приводит к измельчению литой структуры выплавляемого металла, подавлению ликвационных процессов и повышению изотропности его механических свойств.

В работе [24] показано, что импульсная модуляция мощности позволяет управлять каплеобразова-

нием электродного металла и тем самым повышать производительность электрошлакового процесса и его тепловой КПД.

Проведенные исследования свидетельствуют об эффективности технологии импульсного питания при ЭШП для получения шарикоподшипниковых, быстрорежущих, инструментальных и других сталей [22, 23], а также титана [25].

Следует отметить, что сегодня с появлением мощных силовых полупроводниковых приборов и современных микропроцессорных систем возможности импульсного регулирования мощности при ЭШП существенно расширились, что способствует повышению перспективности использования данного способа воздействия в электрошлаковых технологиях.

Большие возможности управления глубиной и формой металлической ванны, а следовательно, и структурой выплавляемого слитка, открывает использование различных схем ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе (рис. 8) [34–40]. В данном случае кристаллизатор является не только устройством, формирующим выплавляемый слиток, но и неплавящимся электродом, поддерживающим электрошлаковый процесс. Плавку можно осуществлять, используя расходуемый электрод с питанием по двухконтурной схеме (ЭШП ДС) (рис. 7, а), а также жидкий или некомпактный присадочные материалы (ЭШП ЖМ) (рис. 7, б, в).

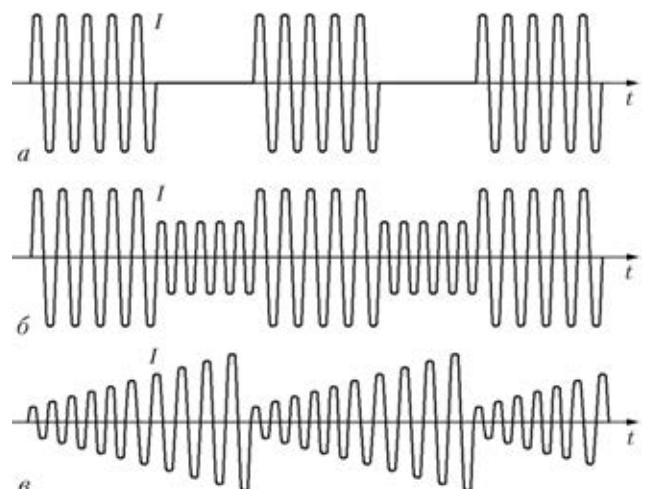


Рис. 7. Осциллограммы тока плавки I при различных вариантах (а–в) импульсного электропитания [22, 24]

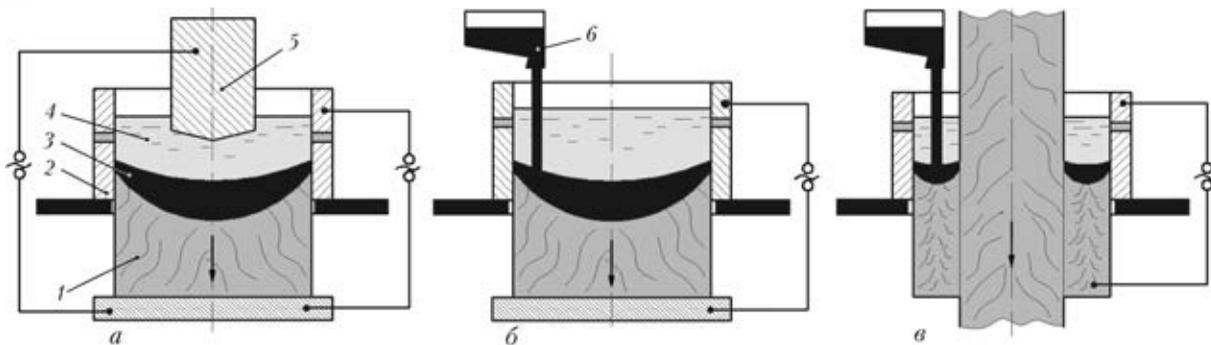


Рис. 8. Схемы электрошлаковых процессов в токоподводящем кристаллизаторе [35]: *a* – ЭШП ДС; *б* – ЭШП ЖМ; *в* – электрошлаковое укрупнение слитков; 1 – слиток; 2 – токоподводящий кристаллизатор; 3 – металлическая ванна; 4 – шлаковая ванна; 5 – расходимый электрод; 6 – миксер-дозатор

Периферийный характер тепловыделения при плавке в токоподводящем кристаллизаторе и отсутствие жесткой зависимости между температурным режимом и производительностью процесса позволяют получать практически любую линейную скорость плавки и форму металлической ванны. Если при канонической схеме ЭШП глубина металлической ванны обычно равна радиусу слитка, то при ЭШП в токоподводящем кристаллизаторе металлическая ванна может быть существенно меньше и иметь практически плоскую форму [34]. Это дает возможность бороться с сегрегационными явлениями, уменьшая скорость переплава без ухудшения качества поверхности слитка.

Следует отметить, что использование токоподводящего кристаллизатора позволяет организовать принудительное вращение расплава шлаковой ванны, благодаря чему обеспечивается выравнивание температуры по периметру токоподводящей секции и равномерное температурное поле ванны жидкого металла [37, 40].

Схемы ЭШП с использованием токоподводящего кристаллизатора представляются наиболее перспективными для получения слитков из сложнолегированных сталей и сплавов, композиционных слитков и крупных кузнечных слитков [35–39].

Эффективным инструментом управления тепло-массопереносом и кристаллизацией металла при ЭШП являются внешние магнитные поля [26]. Преимущество их использования заключается в возможности бесконтактного силового воздействия на расплавы шлаковой и металлической ванн. Следует

отметить, что электрошлаковый процесс является благоприятным с точки зрения электромагнитного управления. Этому способствует наличие широкого диапазона устойчивых режимов его протекания, а также высоких рабочих токов, проходящих через расплавы шлака и металла, что позволяет их использовать для электромагнитного управления.

Физический механизм электромагнитного воздействия на процесс ЭШП основан на взаимодействии внешнего магнитного поля с электрическим током плавки, вследствие которого в ванне формируются объемные электромагнитные силы, создающие силовое воздействие на расплавы металла и шлака, изменяя тем самым гидродинамическую обстановку в ванне и условия кристаллизации металла.

Основными задачами электромагнитного воздействия при ЭШП являются повышение химической однородности выплавляемого металла и улучшение кристаллической структуры слитка. Кроме того, магнитные поля позволяют воздействовать на особенности плавления расходимого электрода, характер образования и отрыва капель электродного металла, траектории их движения в шлаковой ванне и тем самым добиваться нужных технологических и металлургических эффектов [26, 31].

Для воздействия на электрошлаковый процесс используют продольное (рис. 9, *a*), поперечное (рис. 9, *б*) и радиальное (рис. 9, *в*) магнитные поля. В зависимости от их частотных характеристик в металлургической ванне можно создать электровихревые течения или вибрацию расплава.

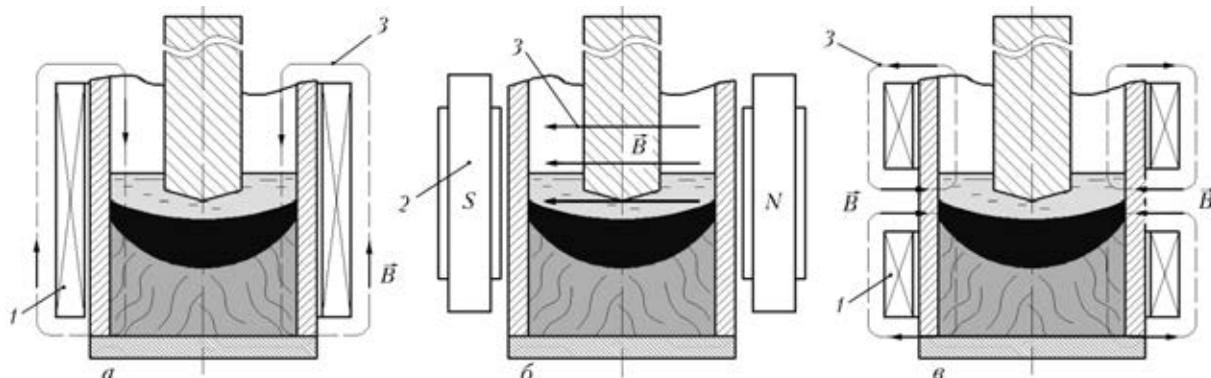


Рис. 9. Схемы ЭШП в продольном (*a*), поперечном (*б*) и радиальном (*в*) магнитных полях: 1 – соленоид; 2 – электромагнит; 3 – силовые линии магнитного поля



Уже в первых работах по ЭШП с наложением магнитных полей на зону плавки отмечались разориентация и измельчение кристаллической структуры слитка, снижение расхода электроэнергии и времени плавки [27, 28]. В последующих работах показано, что стационарное вращение расплава вокруг оси ванны, вызванное наложением переменного продольного и радиального магнитных полей, может приводить и к негативным эффектам — способствовать увеличению глубины металлической ванны и нежелательному изменению ее формы [29, 31]. С целью преодоления этого недостатка предложено использование реверсивных переменных магнитных полей, обеспечивающих периодическое изменение направления вращения расплава шлаковой ванны. Наиболее мелкая структура слитка получена при ЭШП с наложением радиального магнитного поля, реверсируемого с частотой 0,25 Гц [29].

Следует отметить, что введение в зону плавки переменного магнитного поля затруднительно ввиду экранирующего действия медного кристаллизатора. Для устранения эффекта короткозамкнутого витка кристаллизатор необходимо выполнять разрезным по вертикали с электрической изоляцией между секциями.

В работе [31] показана эффективность применения при ЭШП титана постоянных магнитных полей. В результате их взаимодействия с переменным током плавки создается возвратно-поступательное движение (вибрация) расплава с частотой 50 Гц. Использование поперечного магнитного поля (рис. 9, б) приводит также к вибрации расходоугольного электрода. Указанные эффекты способствуют увеличению частоты отрыва капель электродного металла с большим количеством очагов каплеобразования на торце электрода, выравниванию температурного поля в ванне, разрушению растущих в двухфазной области дендритов и, в конечном итоге, гомогенизации и измельчению структуры литого металла.

Нарушение осевой симметрии процесса при плавке в поперечном магнитном поле и громоздкость устройств для его создания усложняет практическое применение поперечных полей при ЭШП. Более технологичным является использование продольного поля, образованного соленоидом, охватывающим кристаллизатор (рис. 9, а).

В работах [31, 32] показано, что для эффективного воздействия на макроструктуру металла слитков диаметром 60...160 мм уровень индукции магнитного поля в рабочей зоне должен составлять примерно 0,14...0,3 Тл и выше. Причем с увеличением диаметра выплавляемого слитка значение индукции в зоне плавки необходимо увеличивать. Это в свою очередь требует больших мощностей и массогабаритных параметров источников внешних магнитных полей, что снижает технологичность и эффективность их применения при выплавке слитков промышленных размеров.

Перспективным является использование импульсных магнитных полей, позволяющих интенсифици-

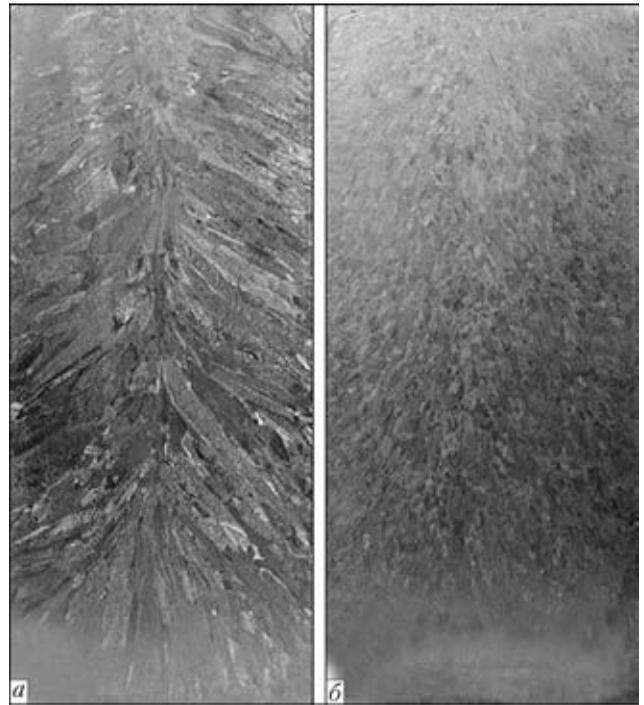


Рис. 10. Макроструктуры титановых слитков, выплавленных без электромагнитного воздействия (а) и с ним (б)

ровать магнитногидродинамическое воздействие на расплав ванны при снижении массогабаритных характеристик электромагнитного устройства [33]. Это достигается благодаря возможности формирования мощных импульсов магнитного поля, созданных, например, разрядами конденсаторных батарей, а также в результате гидродинамических «ударов» на фронт кристаллизации в момент их действия. При этом обеспечивается интенсивное перемешивание жидкого металла и измельчение кристаллической структуры слитка (рис. 10). Формирование однородной мелкозернистой литой структуры слитка обуславливает высокую технологичность металла на стадии деформации и последующих переделов, большие значения его механических характеристик и работоспособность.

Заключение

Существуют различные технологические приемы и способы воздействия на кристаллизацию металла слитков при ЭШП. В ряде случаев они являются эффективными и обеспечивают повышение однородности и измельчение структуры металла слитков. Однако несмотря на большое количество исследований, указывающих на положительное влияние рассмотренных способов воздействия на структуру и свойства слитков ЭШП, они носят преимущественно опытный характер и не нашли широкого промышленного применения.

При введении в расплав различных модифицирующих добавок и иннокуляторов изменяется химический состав выплавляемого сплава, что в большинстве случаев является недопустимым. При этом сохраняется химическая неоднородность слитка, присущая любой схеме переплава с дополнитель-



ным легированием твердыми частицами. Недостатком внешних физических воздействий является отсутствие четких зависимостей между параметрами воздействия и свойствами выплавляемого металла для каждого конкретного случая (типоразмера слитка и состава сплава). Отсутствуют надежные технологические и конструктивные решения по введению в расплав воздействий требуемой мощности при выплавке слитков промышленных размеров.

Управление процессом первичной кристаллизации слитков ЭШП, особенно сложнолегированных сплавов и слитков больших диаметров, остается одной из ключевых задач дальнейшего развития электрошлаковых технологий.

Эффективным инструментом управления кристаллизацией слитков ЭШП, по нашему мнению, является бесконтактное силовое воздействие на расплав ванны при помощи внешних магнитных полей. Однако воздействие на макроструктуру слитков требует больших мощностей и массогабаритных параметров источников внешних магнитных полей, что является серьезным препятствием на пути их практического использования. Повышение эффективности электромагнитного воздействия может быть достигнуто путем использования импульсных магнитных полей, в том числе созданных разрядами конденсаторов на магнитный контур. Перспективным является использование комплексных способов управления кристаллизацией слитков ЭШП, основанных на тепловых и гидродинамических механизмах воздействия и схемах переплава в токоподводящем кристаллизаторе.

1. *Металлургия электрошлакового процесса* / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов и др. / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Наук. думка, 1986. — 248 с.
2. *Качество электрошлакового металла* / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, Д. М. Дяченко / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1990. — 312 с.
3. *Электрошлаковая технология за рубежом* / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, А. Г. Богаченко, В. М. Литвинчук. — Киев: Наук. думка, 1982. — 320 с.
4. *Электрошлаковые печи* / Под ред. Б. Е. Патона и Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1976. — 414 с.
5. *Еремин Е. Н.* Закономерности комплексного модифицирования литого электрошлакового металла // Анализ и синтез механических систем. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. — С. 131–134.
6. *Еремин Е. Н.* Применение модифицирования для повышения свойств кольцевых заготовок из азотсодержащих нержавеющей сталей, полученных способом центробежного электрошлакового литья // Современ. электрометаллургия. — 2006. — № 3. — С. 3–7.
7. *Билько В. Г., Емельяненко Ю. Г.* Влияние модифицирующих добавок на трещиностойкость электрошлаковых слитков // Проблемы электрошлаковой технологии. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 134–138.
8. *Применение окислов редкоземельных металлов в качестве компонентов флюса при электрошлаковом переплаве среднелегированной Cr–Ni–Mo стали* / Б. И. Медовар, В. А. Тихонов, В. Я. Саенко, А. В. Бешенцев // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 14. — С. 63–67.
9. *Улучшение структуры и свойств литых инструментальных сталей при электрошлаковой выплавке с индукторами* / В. С. Попов, И. М. Билоник, С. П. Бережный и др. // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 2. — С. 8–9.
10. *Управление кристаллизацией слитка путем ввода макрохолодильников при электрошлаковом переплаве* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, Ю. Г. Емельяненко // Литье с применением индукторов. — Киев: ИПЛ, 1981. — С. 13–19.
11. *Воздействие ультразвуковыми колебаниями на кристаллизацию при электрошлаковом переплаве* / В. П. Куделькин, М. М. Клюев, С. И. Филиппов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1969. — № 11. — С. 64–70.
12. *Воздействие ультразвуковых колебаний на капельный перенос металла при электрошлаковом переплаве* / В. П. Куделькин, М. М. Клюев, С. И. Филиппов и др. // Там же. — 1969. — № 3. — С. 54–59.
13. *Абрамов О. В.* Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. — М.: Металлургия, 1972. — 256 с.
14. *Ефимов В. А., Эльдарханов А. С.* Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. — М.: Металлургия, 1995. — 272 с.
15. *Сворцов А. А., Акименко А. Д., Ульянов В. А.* Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и отливок. — М.: Металлургия, 1991. — 218 с.
16. *Чуманов И. В.* Повышение тепловой эффективности электрошлакового переплава и качества металла путем воздействия на процессы плавления, транспортировки и кристаллизации вращением расходуемого электрода: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Челябинск, 2002. — 40 с.
17. *Пятыгин Д. А.* Особенности плавления и кристаллизации металла при ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Челябинск, 2006. — 21 с.
18. *Pat. 3,776,294 US. Int. Cl. V 22 D 27/02, C 22 D 7/00.* Method of electroslag remelting / В. Е. Paton, В. I. Medovar, I. V. Latash et al. — Publ. 04.12.1973.
19. *Патон Б. Е., Медовар Б. И., Кумыш И. И.* Принудительное оплавление расходуемых электродов при электрошлаковом переплаве // Спец. электрометаллургия. — 1974. — № 25. — С. 3–7.
20. *Pat. 4,185,683 US. Int. Cl. V 22 D 21/02, V 22 D 27/02.* Electroslag remelting mould / В. I. Medovar, N. Z. Artamonov, A. G. Bogachenko et al. — Publ. 29.01.1980.
21. *Пат. 2483125 РФ, МПК С 22 В 9/18; F 27 D 27/100; В 22 D 23/10.* Способ перемешивания шлаковой ванны при электрошлаковом переплаве расходуемого электрода / Л. Я. Левков, Ю. Н. Кригер, С. В. Орлов и др. — Оpubл. 27.05.2013; Бюл. № 15.
22. *Управление процессами кристаллизации слитка ЭШП* // Б. Е. Патон, В. К. Лебедев, Б. И. Медовар и др. // Проблемы стального слитка: Труды пятой конф. по слитку. (Киев, сент. 1974 г.) — М.: Металлургия, 1974. — С. 707–714.
23. *Абрамов А. В., Лоскутов В. И., Ковалев В. Г.* Новая технология электрошлаковой выплавки инструментальных заготовок // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1993. — № 4. — С. 10–12.
24. *Пат. № 2337979 РФ, МПК С 22 В 9/18.* Способ управления режимом работы установок электрошлакового переплава и устройство для его осуществления / А. В. Абрамов, А. Н. Ильгачев, Д. Г. Михадаров. — Оpubл. 10.11.2008; Бюл. № 1.
25. *Электрошлаковая выплавка титановых слитков с импульсным электропитанием* / И. В. Протококилов, А. Т. Назарчук, В. Б. Порохонько и др. // Современ. электрометаллургия. — 2014. — № 2. — С. 10–14.
26. *Компан Я. Ю., Шербинин Э. В.* Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
27. *Дудко Д. А., Рублевский И. Н.* Электромагнитное перемешивание шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе // Автомат. сварка. 1960. — № 9. — С. 12–16.
28. *Троцин И. П., Черныш В. П.* Магнитное управление кристаллизацией при ЭШП // Свароч. пр-во. — 1965. — № 11. — С. 3–5.
29. *Разработка и исследование методов управления структурой кристаллизующегося слитка ЭШП путем наложения магнитного поля* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. И. Ус., С. В. Томиленко // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1989. — № 4. — С. 3–7.
30. *Максимович Б. И.* Влияние электромагнитного вращения шлаковой ванны на кристаллизацию металла при электрошлаковом переплаве высоколегированных сталей и сплавов // Электротермия. — 1992. — Вып. 5. — С. 10–15.
31. *Протококилов И. В.* Магнитокерована электрошлаковая плавка богатоконцентных титановых сплавов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.07 / НАН України; Інститут електросварювання ім. Є. О.Патона. — Київ, 2006. — 20 с.



32. *Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протоковилів І. В.* К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 3–7.
33. *Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки* // А. Т. Назарчук, И. В. Протоковилів, Ю. П. Ивочкин и др. // Там же. — 2013. — № 4. — С. 21–26.
34. *Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны* // Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко, А. В. Чернец и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 4. — С. 3–7.
35. *Чернец О. В.* Нові електрошлакові технології з роз'єднанням плавлення та твердіння металу: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Київ, 2001. — 35 с.
36. *Цыкуленко А. К., Медовар Л. Б., Чернец А. В.* Некоторые новые области применения электрошлаковой технологии // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 2. — С. 9–11.
37. *Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков* // Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, А. П. Стовпченко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2010. — № 3. — С. 5–10.
38. *ЭШП и современные подходы к управлению затвердеванием крупного кузнечного слитка* // Л. Б. Медовар, А. П. Стовпченко, А. Н. Головачев, Б. Б. Федоровский // Там же. — 2013. — № 3. — С. 12–18.
39. *Кусков Ю. М.* Электрошлаковый процесс без расходоуемого электрода с использованием некомпактного присадочного материала // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1992. — № 2. — С. 28–32.
40. *Томиленко С. В., Кусков Ю. М., Ус В. И.* Устройство электромагнитного перемешивания для токоподводящих кристаллизаторов, обеспечивающее регулируемое вращение шлаковой ванны // Там же. — 1993. — № 3. — С. 16–18.
41. *А. с. 520784 СССР, МПК 21 С 5/56.* Способ переплава расходоуемого электрода // Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. И. Лакомский и др. — Опубл. 30.05.82. Бюл. №20.
42. *Дугошлаковый переплав* — современное состояние и перспективы развития // Б. Е. Патон, В. Я. Саенко, Ю. М. Помарин и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 1. — С. 3–10.
43. *Дугошлаковый переплав титана и титановых сплавов* // Б. И. Медовар, В. В. Шепелев, В. Я. Саенко, Ю. М. Помарин // Там же. — 1992. — № 2. — С. 13–21.
44. *Помарин Ю. М.* Дугошлаковый переплав крупнотоннажных слитков стали X18AG18 на промышленной печи ЭШП // Там же. — 1998. — № 1. — С. 11–15.

The paper deals with methods of impact on ingot metal solidification in electroslag remelting based on addition of modifiers and inoculants to the melt, pulse power supply, inducing melt oscillations, consumable electrode rotation, arc-slag remelting, pool blowing with gases, application of current-conducting mould and electromagnetic impact. Mechanisms are described, which ensure homogenizing and refinement of metal structure, advantages and disadvantages of various methods of impact on electroslag process are analyzed. It is shown that despite the large number of investigations demonstrating positive influence of the considered methods of impact on ESR ingot structure and properties, their results did not become widely accepted by industry, because of their inherent disadvantages. It is noted that external magnetic fields are an effective tool of controlling metal solidification at ESR, which allow applying contactless force impact on slag and metal pool melts. To increase the effectiveness of impact on metal structure, it is proposed to apply pulsed magnetic fields, in particular those generated by discharges of capacitive storages to magnetic circuit, and comprehensive methods to control solidification of ESR ingots, based on thermal and hydrodynamic mechanisms. 44 Ref., 10 Figures.

Keywords: *electroslag remelting; external physical impact; ingot; metal pool; solidification; structure*

Поступила 05.03.2014

КУРС НА НАРАЩИВАНИЕ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ



Со второго полугодия металлургические предприятия Украины намереваются нарастить выплавку стали и выпуск проката.

Металлургические предприятия Украины планируют в июле 2014 года увеличить выплавку стали на 2,9 % по сравнению с объемами производства, запланированными на июнь — до 2,52 млн т, выпуск общего проката — на 2,3 % (до 2,25 млн т).

Согласно материалам объединения «Металлургпром» (г. Днепропетровск) к балансовому совещанию представителей предприятий горно-металлургического комплекса в г. Днепропетровске план на июль предусматривает выплавку 2,470 млн т чугуна, что на 5,1 % больше объема ожидаемого производства чугуна в июне.

Среднесуточное производство чугуна в июле запланировано на уровне 79,7 тыс. т (в июне 78,3 тыс. т), стали — 81,3 тыс. т (81,7 тыс. т), проката — 72,6 тыс. т (73,3 тыс. т).

<http://www.interfax.com.ua>