



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРЯДОВ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ МЕТАЛЛА ПРИ ЭШП

И.В. Протокивиллов, А.Т. Назарчук, Д.А. Петров, В.Б. Порохонько

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены возможности использования разрядов емкостных накопителей электрической энергии для управления плавлением и кристаллизацией металла при электрошлаковом переплаве. Разработано экспериментальное оборудование для генерирования электрических разрядов на основе конденсаторных батарей и тиристорных ключей. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния импульсных электрических и магнитных полей, созданных разрядами конденсаторов, на технологические особенности электрошлакового процесса и формирование металла титановых слитков. Показано, что для управления процессами кристаллизации металла слитков при ЭШП разряды конденсаторов можно использовать как для создания мощных импульсных магнитных полей, воздействующих на жидкую металлическую ванну, так и для непосредственного воздействия на расплав металла посредством электрических разрядов на зону плавки. Экспериментально установлено, что наиболее эффективным является использование комбинированных методов воздействия на кристаллизацию за счет импульсных режимов электропитания электрошлакового процесса и внешних импульсных воздействий электрическими и магнитными полями. Библиогр. 6, табл. 1, ил. 3.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; электрический разряд; конденсатор; импульсное магнитное поле; кристаллизация; макроструктура

Химическая и структурная однородности являются важнейшими характеристиками металла, от которых зависят ресурс и эксплуатационные свойства изготовленных из него изделий. Уровень этих характеристик определяется в большой мере условиями первичной кристаллизации слитка (отливки, заготовки). Дальнейшие металлургические переделы (деформация, термообработка и др.) позволяют частично влиять на степень гомогенности металла, однако полностью устранить дефекты ликвационного характера и макросегрегации посредством их использования невозможно.

Поэтому разработка способов управления процессом первичной кристаллизации слитков была и остается приоритетной задачей современной металлургии. Данная проблема актуальна для всех технологий получения слитков и в частности для электрошлакового переплава (ЭШП).

Одним из направлений управления процессом кристаллизации металла является уменьшение объема жидкой металлической ванны посредством порционной отливки или послойного формирования слитка [1, 2]. Другой подход, рассматриваемый в данной работе, заключается в физическом воз-

действии на гидродинамику металлической ванны и кристаллизацию слитка посредством внешних электрических и электромагнитных воздействий.

В работах [3–5] показана эффективность использования внешних магнитных полей для управления кристаллизацией и структурой выплавляемых титановых слитков. Однако с увеличением диаметра слитка приходится существенно повышать мощность и массогабаритные параметры источников внешних магнитных полей, что снижает технологичность их применения при выплавке слитков крупных размеров.

В связи с этим для повышения эффективности электромагнитного воздействия перспективным представляется использование таких источников электрического заряда как емкостные накопители электрической энергии (конденсаторы). Батареи конденсаторов при относительно малых габаритах позволяют практически мгновенно, в тысячные доли секунды, выделять большую электрическую энергию и формировать мощные импульсы тока в разрядном контуре.

Использование конденсаторов для питания обмоток электромагнитного устройства (солено-

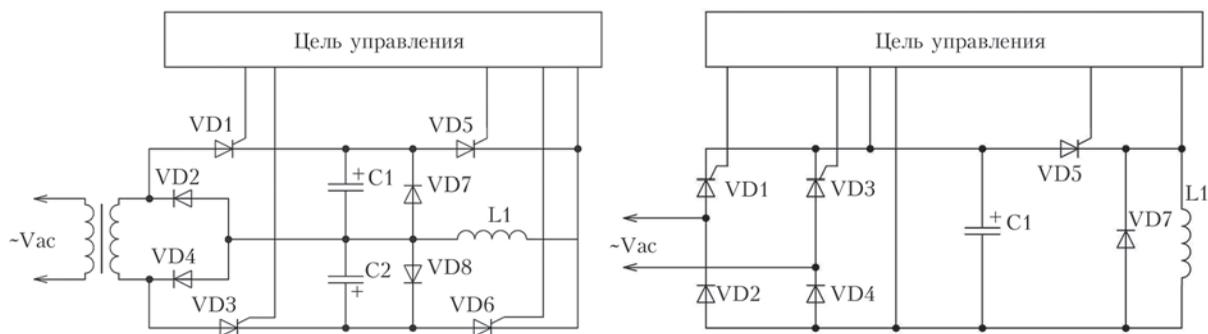


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы зарядно-разрядного контура на основе использования двух блоков конденсаторов (а) и одного (б): VD1, VD3 — зарядные тиристоры; VD5, VD6 — разрядные тиристоры; C1, C2 — конденсаторные блоки; L1 — нагрузка (соленоид)

ида, охватывающего кристаллизатор) дает возможность, при их относительно малых габаритах, формировать импульсы электрического тока в десятки кА, которые, в свою очередь, формируют в зоне плавки мощные импульсные магнитные поля индукцией до нескольких Тл. Длительность таких импульсов невелика (несколько миллисекунд), что позволяет использовать для их создания компактные соленоиды с малым сечением обмотки.

Кроме того, перспективы формирования при помощи конденсаторов мощных разрядных импульсов тока открывают возможности непосредственного воздействия такими разрядами на расплавы шлаковой и металлической ванн и фронт кристаллизации слитка.

Важными характеристиками конденсаторов, определяющими эффективность их использования для создания мощных электрических разрядов, являются емкость и рабочее напряжение. Величина пикового тока в разрядном контуре определяется, в первую очередь, напряжением заряда конденсатора и сопротивлением контура, а длительность импульса — сопротивлением контура и емкостью конденсаторной батареи. Соответственно для увеличения пикового тока необходимо повышать напряжение заряда конденсаторов, а для длительности и энергии импульса — их емкость и напряжение.

Сегодня промышленность производит широкую номенклатуру конденсаторов емкостью до нескольких десятков фарад и рабочим напряжением от нескольких вольт до десятков киловольт.

Использование высоковольтных конденсаторов в условиях металлургического производства связано с серьезными трудностями, обусловленными необходимостью обеспечения высокого уровня электрической изоляции элементов цепи и техникой безопасности. Практическое их использование в условиях ЭШП представляется проблематичным.

Современные суперконденсаторы характеризуются огромной емкостью, однако имеют неболь-

шое рабочее напряжение (несколько В). Последнее обстоятельство не позволяет использовать их для формирования мощных электрических разрядов и управления кристаллизацией при ЭШП.

Анализ электрических характеристик соленоидов, используемых при ЭШП, и сопротивления металлургической ванны показывает, что с целью создания управляющих электрических разрядов и магнитных полей наиболее эффективно использование конденсаторов с рабочим напряжением 100...350 В. Указанные напряжения достаточны для формирования мощных пиковых токов в разрядном контуре и не требуют применения сложных мер для электрической изоляции элементов контура.

Исходя из указанных значений рабочего напряжения в качестве емкостных накопителей для разрядного контура можно рекомендовать электролитические конденсаторы (B43415, B43416, B43456, B43458 (Epcos)) емкостью до 6600 мкФ и номинальным напряжением до 500 В или пленочные, неполярные конденсаторы (WIMA DC-LINK MKP 6 HP) емкостью до 4920 мкФ и номинальным напряжением до 600 В.

Для формирования и управления электрическими разрядами были разработаны и исследованы две принципиальные схемы: на основе двухполупериодного накопления электрических зарядов двумя блоками конденсаторов с одновременным разрядом на магнитный контур (рис. 1, а); с использованием одного блока конденсаторов для разряда на магнитный контур (рис. 1, б).

Преимущество схемы, показанной на рис. 1, а, заключается в возможности одновременного разряда двухконтурного накопителя, в результате чего увеличивается величина максимально допустимого суммарного тока в разрядном контуре. В обоих случаях возможность заряда конденсаторов может быть реализована как непосредственно от силовой цепи, так и от дополнительного источника питания с плавным регулированием напряжения заряда.

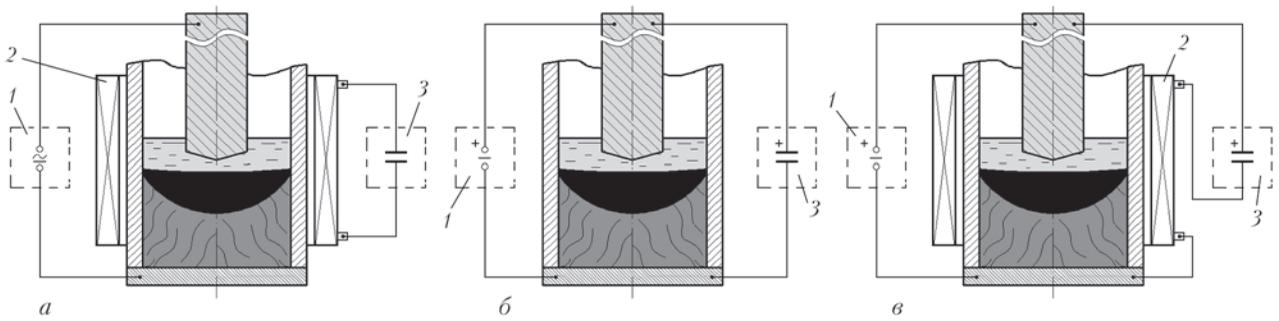


Рис. 2. Схемы воздействия на кристаллизацию металла при ЭШП с использованием разрядов конденсаторов на соленоид (а), на металлургическую ванну (б) и одновременных разрядов на соленоид и металлургическую ванну (в): 1 — печной трансформатор с выпрямительным блоком; 2 — соленоид; 3 — источник генерирования электрических разрядов

Заряды и разряды соответствующих контуров осуществляются при помощи тиристорных ключей. Учитывая высокие пиковые токи в разрядном контуре для управления разрядами конденсаторов выбраны силовые тиристоры Т253-1250-12, обеспечивающие ударный ток в открытом состоянии порядка 28 кА при критической скорости нарастания 200 А/мкс. С учетом возможности одновременного разряда двухконтурного накопителя (рис. 1, а) допустимая величина ударного тока может достигать 56 кА.

Для лабораторных исследований выбраны конденсаторы серии В43458 емкостью $C_R = 1500$ мкФ и номинальным напряжением $U_R = 350$ В. Общая емкость конденсаторных батарей составила 0,069 Ф. Цепь управления позволяет осуществлять разряды с частотой до 10 Гц, максимальное напряжение заряда — 310 В.

Для управления процессами кристаллизации металла опробовано несколько схем воздействия (рис. 2) с использованием разрядов конденсаторов: воздействие импульсным продольным магнитным полем, созданным разрядами конденсаторов на обмотки соленоида, охватывающего кристаллизатор (рис. 2, а); периодическими разрядами конденсаторов непосредственно на металлургическую ванну (участок цепи электрод–шлаковая и металлическая ванны–поддон) (рис. 2, б); комбинированным импульсным магнитным и электрическим полями посредством одновременного разряда конденсаторов на соленоид и металлургическую ванну (рис. 2, в).

Механизм влияния на кристаллизацию металла в указанных схемах основан, в первую очередь, на магнитогидродинамических (МГД) эффектах в расплавах шлаковой и металлической ванн при воздействии внешними магнитными и электрическими полями.

Взаимодействие импульсов магнитного поля индукцией \vec{B} , созданных разрядами конденсаторов на обмотки соленоида (рис. 2, а), с током

плавки плотностью \vec{j} , приводит к формированию объемных электромагнитных сил $\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B}$, действующих на расплавы шлака и металла и интенсифицирующих МГД процессы в ванне. При этом в момент импульса магнитного поля имеют место гидродинамические удары по фронту кристаллизации слитка, способствующие измельчению растущих дендритов и гомогенизации структуры слитка.

Наложение импульсов электрического тока непосредственно на рабочий ток плавки (рис. 2, б) приводит к механическим колебаниям ванны и силовому воздействию на фронт кристаллизации металла.

Использование комбинированного метода (рис. 2, в) позволяет повысить эффективность МГД воздействия на ванну. Периодические электрические разряды в зону плавки, действующие синхронно с импульсами тока в соленоиде, приводят к периодическому увеличению плотности тока \vec{j} в металлургическом расплаве и к соответствующему увеличению электромагнитной силы $\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B}$, действующей на металлургический расплав. При этом увеличивается силовое воздействие на фронт кристаллизации слитка и эффективность гомогенизации его структуры.

Экспериментальные исследования проводили при выплавке слитков поперечным сечением 80×80 мм² в электрошлаковой печи камерного типа. Переплавливали электроды из технического титана ВТ1 диаметром 45...50 мм. Для питания установки использовали модернизированный силовой трансформатор ТШП-10-1, оснащенный блоком управляющих тиристоров, включенных в цепь первичной обмотки, и выпрямительным блоком, включенным во вторичную цепь. В экспериментах, проводимых по схеме рис. 2, а, использовали как переменный, так и постоянный ток плавки обратной полярности, в остальных случаях — только постоянный ток обратной по-

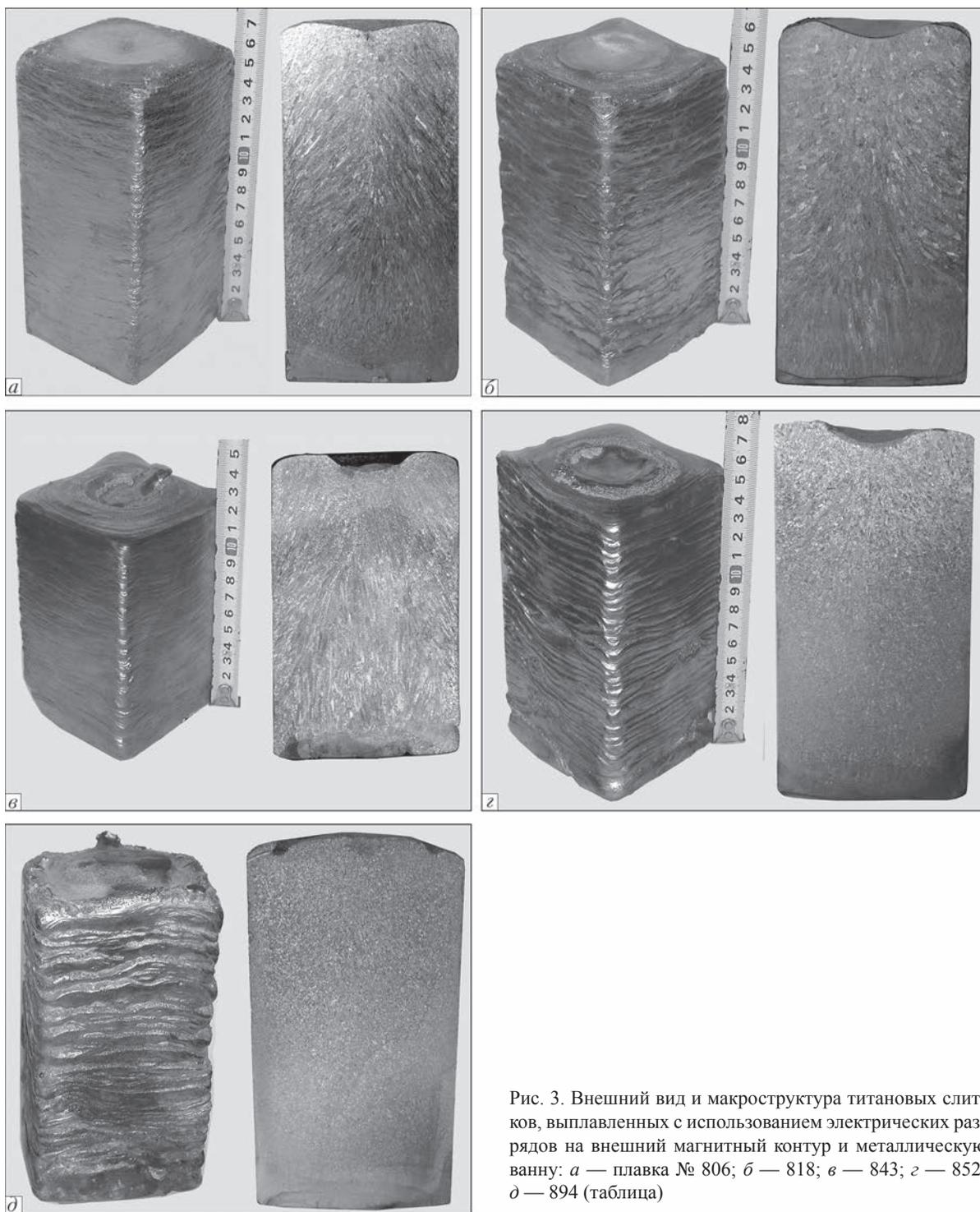


Рис. 3. Внешний вид и макроструктура титановых слитков, выплавленных с использованием электрических разрядов на внешний магнитный контур и металлическую ванну: *а* — плавка № 806; *б* — 818; *в* — 843; *г* — 852; *д* — 894 (таблица)

лярности. Разряды конденсаторов осуществляли как непрерывно, так и отдельными сериями по 3...7 импульсов, которые чередовались с паузами длительностью 5...7 с. Для дополнительного воздействия на кристаллизацию металла в ряде случаев использовали импульсное электропитание электрошлакового процесса [6]. Режимы плавки приведены в таблице, внешний вид и макроструктура выплавленных слитков — на рис. 3.

Проведенные эксперименты позволили установить ряд технологических и металлургических осо-

бенностей использования разрядов конденсаторов для воздействия на электрошлаковый процесс.

В экспериментах, выполненных по схеме рис. 2, *а* при использовании переменного тока плавки разряды конденсаторов на соленоид не привели к заметному возмущению шлаковой ванны. Энергия отдельного разряда в данном случае составила 1800...2500 Дж при пиковом токе в обмотках соленоида до 5,7 кА. Аналогичные режимы электромагнитного воздействия при постоянном токе плавки привели к выбросам шлака в



Режимы экспериментальных плавков										
№ плавки	Схема воздействия	Режим электропитания	Плавка				Разряды			
			Род тока	$V_{эл}, м/ч$	$U, В$	$I, А$	Режим воздействия (разряд/пауза)	$f, Гц$	$U, В$	$I, А$
805	рис. 2, а	стационарный	переменный	5,0	27	4500	5/5	1,1	220	2500
806	->-	->-	->-	4,9	27	4300	5/7	3,3	220	2500
811	->-	->-	->-	4,8	28	4800	5/7	0,9	300	3400
818	->-	->-	постоянный	4,7	32	3000	3/7	1,25	300	5500
830	->-	->-	переменный	5,0	33	4800	6/7	1,25	310	5700
837	->-	импульсный ($t_n = 8 с, t_{п} = 1,4 с$)*	->-	3,8	28/4	4500/500	3/6	1,0	310	3500
841	рис. 2, б	стационарный	постоянный	4,0	27	2600	4/7	0,9	200	12000
843	->-	->-	->-	3,8	27	2800	непрерывный	0,9	200	12000
844	->-	импульсный ($t_n = 8,2 с, t_{п} = 1,4 с$)	->-	3,8	26/0	3000/0	->-	1,0	200	11500
852	->-	импульсный ($t_n = 8,2 с, t_{п} = 5,2 с$)	->-	3,8	26/0	3200/0	->-	1,0	200	11500
894	рис. 2, в	импульсный ($t_n = 8,2 с, t_{п} = 5,0 с$)	->-	3,7	26/0	3000/0	->-	3,0	230	2050

* t_n — продолжительность импульса электропитания; $t_{п}$ — продолжительность паузы.

момент импульса разрядного тока и к ухудшению стабильности электрошлакового процесса. Вследствие этого снизилось качество формирования боковой поверхности слитка (рис. 3, б). Очевидно все это связано с тем, что во время импульса разрядного тока, который длится 0,04 с, переменный ток плавки частотой 50 Гц успевает изменить свою фазу (направление), в результате чего электромагнитная сила также меняет свое направление. Это снижает эффект «закрутки» шлаковой ванны при плавке на переменном токе. При постоянном токе электромагнитная сила действует в одном направлении, ванна закручивается сильнее, что, в свою очередь, приводит к выбросам шлака.

Макроструктура выплавленных слитков в обоих случаях плотная, без видимых включений и пор (рис. 3, а, б). Однако, наличие крупных столбчатых дендритов свидетельствует о недостаточном МГД воздействии на кристаллизацию, что связано с рядом факторов, в том числе с недостаточной величиной энергии отдельного разряда.

Важным результатом проведенных исследований является экспериментально установленная возможность воздействия на кристаллизацию слитков ЭШП путем разрядов конденсаторов непосредственно на металлургическую ванну. Максимальный пиковый ток разряда в экспериментах составил 12 кА, частота — 0,9...3,0 Гц. Такие разряды не привели к недопустимым нарушениям стабильности электрошлакового процесса и формирования слитка.

Несомненным преимуществом данного способа воздействия на кристаллизацию металла явля-

ется отсутствие необходимости использования дополнительных устройств для создания магнитных полей (соленоидов).

Макроструктура металла слитка, выплавленного с электрическими разрядами на ванну, плотная, без пор, включений, трещин и прочих дефектов (рис. 3, в). Наблюдается некоторое утончение макроструктуры по сравнению с металлом, полученным без электромагнитного воздействия. Однако столбчатая структура слитка сохраняется, что свидетельствует о недостаточном воздействии на ванну и фронт кристаллизации металла.

Лучшие результаты по гомогенизации и измельчению структуры металла слитка получены при использовании комплексных методов воздействия на кристаллизацию слитков ЭШП.

На рис. 3, г приведен внешний вид и макроструктура слитка, выплавленного с воздействием разрядами конденсаторов на металлический расплав и импульсным электропитанием процесса ЭШП. В данном случае удалось получить слитки с мелкозернистой равноосной структурой без кристаллизационных дефектов. Наблюдаемое при этом ухудшение качества формирования боковой поверхности слитка связано, в первую очередь, с режимами электропитания процесса при которых длительность пауз составила 5,2 с. Очевидно, что для улучшения качества боковой поверхности продолжительность пауз электропитания необходимо уменьшать или напряжение во время паузы снижать не меньше некоторого оптимального значения.

Следует также отметить, что использование только одного из указанных выше методов воздей-



ствия (импульсное электропитание или разряды на зону плавки) не позволило получить желаемых результатов по измельчению и гомогенизации структуры слитка.

Эффективным способом воздействия на кристаллизацию металла при ЭШП является комплексное воздействие посредством импульсного электропитания и синхронных разрядов конденсаторов на соленоид и металлургическую ванну. Структура металла в данном случае состоит полностью из равноосных зерен средним размером 0,2...1,0 мм, что приближает ее к структуре деформированного металла (рис. 3, д).

Основой повышения эффективности воздействия на процесс плавки в данном случае является взаимодействие электрических и магнитных полей разрядов с импульсными полями процесса плавки. Применение данного метода требует дальнейших исследований с целью улучшения качества формирования боковой поверхности, доработки соответствующего оборудования и режимов электромагнитного воздействия.

Выводы

1. Показана перспективность использования разрядов емкостных накопителей электрической энергии (конденсаторов) для управления процессами кристаллизации металла слитков при ЭШП.
2. Показано, что разряды конденсаторов можно использовать как для создания мощных импульсных магнитных полей, воздействующих на жидкую металлическую ванну, так и для непо-

средственного воздействия на расплавы шлака и металла.

3. Установлено, что наиболее эффективным является использование комбинированных методов воздействия на кристаллизацию за счет импульсных режимов электропитания процесса плавки и внешних импульсных воздействий электрическими и магнитными полями, созданными разрядами конденсаторов на магнитный контур и зону плавки.

1. Шаповалов В.А., Григоренко Г.М. Подавление ликвационных процессов в крупных слитках // Современ. электрометаллургия. — 2015. — № 1. — С. 26–30.
2. Шаповалов В.А., Григоренко Г.М. Управление структурой металла в процессе кристаллизации // Там же. — 2015. — № 2. — С. 51–54.
3. Компан Я.Ю., Протокопилов И.В. Некоторые технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) титановых сплавов // Мат. межд. науч.-техн. конф. «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра» (Киев, 8–9 окт. 2002 г.) — Киев, 2002. — С. 256–262.
4. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Протокопилов И.В. К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 3–7.
5. Протокопилов И.В. Магнітокервана електрошлакова плавка багатоконпонентних титанових сплавів: Автореф. дис. ... к. т. н. за спец. 05.16.07 / Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. — Київ, 2006. — 20 с.
6. Электрошлаковая выплавка титановых слитков с импульсным электропитанием / И.В. Протокопилов, А.Т. Назарчук, В.Б. Порохонько и др. // Современ. электрометаллургия. — 2014. — № 2. — С. 10–14.

The possibilities of applying of capacitor storage discharges for control of melting and crystallization of metal in electroslag remelting are considered. Experimental equipment was designed for generation of electric discharges on the base of capacitor banks and thyristor keys. The results of experimental investigations of effect of pulsed electric and magnetic fields, generated by capacitor discharges, on technological features of the electroslag process and formation of metal of titanium ingots are given. It is shown that to control the processes of crystallization of metal of ESR ingots it is possible to apply the discharges of capacitors both for the creation of powerful pulsed magnetic fields, having effect on the molten metal pool, and also for the direct effect on metal melt by means of electric discharges into the melting zone. It was found experimentally that the most effective is the application of combined methods of effect on crystallization at the expense of pulsed conditions of power supply of electroslag process and external pulsed effects by electric and magnetic fields. Ref. 6, Table 1, Figures 3.

Key words: *electroslag remelting; electric discharge; capacitor; pulsed magnetic field; crystallization; macrostructure*

Поступила 28.10.2015