
НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ

УДК 669.18.621.764.5.047

**В. Н. Баранова, Р. Я. Якобше, В. Л. Найдек, З. Л. Козлова,
О. И. Майко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ ГАЗОИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА НА КАЧЕСТВО СЛИТКОВ И НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СЛЯБОВ

Приведены результаты исследований влияния газоимпульсного перемешивания жидкого металла на качество слитков и непрерывнолитых слябов. Показано, что применение этого метода интенсифицирует массо- и теплообменные процессы в изложнице и кристаллизаторе МНЛЗ, обеспечивает структурную однородность литого металла, сокращает время затвердевания заготовки, снижает количество дефектов, выявляемых методом ультразвукового контроля (УЗК).

Ключевые слова: *газоимпульсное перемешивание, слиток, непрерывнолитой сляб, макроструктура.*

Наведено результати дослідження впливу газоімпульсного перемішування рідкого металу на якість злиwkів і безперервнолитих слябів. Показано, що застосування цього методу інтенсифікує масо- і теплообмінні процеси в виливниці і кристалізаторі МБЛЗ, забезпечує структурну однорідність литого металу, скорочує час твердіння заготовки, зменшує кількість дефектів, які виявляють метод ультразвукового контролю (УЗК).

Ключові слова: *газоімпульсне перемішування, зливки, безперервнолитий сляб, макроструктура.*

Investigation results of influence of a gas-impulsive stirring of liquid metal on quality of ingots and continuously cast slabs are represented. An application of ingot given method intensifies heat mass transfer processes in an ingot mould and in a mould of continuous caster. Using the gas-impulsive stirring of liquid metal provides structural homogeneity of ingots and cast slabs. It reduces time of strand solidification and defects discovered on ultrasonic check.

Keywords: *gas-impulsive stirring, ingot, continuously cast slab, macrostructure.*

Характерная химическая и физическая неоднородность непрерывнолитых слябов МНЛЗ и слитков, отливаемых в изложницы, сопровождается образованием ликвации в виде усов, шнуров, усадочной и осевой рыхлости, пористости, точечной неоднородности, расслоя, трещин, неметаллических включений. С увеличением массы отливаемых слитков и толщины слябов указанные дефекты увеличиваются, что ограничивает их применение при изготовлении проката, поковок или получении готовых изделий, так как наличие неоднородностей металла в трансформирован-

ном виде обнаруживается в кованом и катаном металле и приводит к анизотропии физико-химических и механических свойств. В непрерывнолитых слябах эти дефекты связаны с большой протяженностью зоны двухфазного твердожидкого состояния, которая препятствует питанию сердцевины заготовки жидким металлом в конце затвердевания, что способствует получению пористой, рыхлой сердцевины, обогащенной легкоплавкими металлическими и неметаллическими компонентами. При разливке стали в изложницы и кристаллизации слитка происходит целый ряд процессов (развитие турбулентности, контактный и неконтактный теплообмены, зарождение и рост кристаллов, диффузия примесей, формирование новых фаз и другие), которые в обычных условиях развиваются в поле сил тяжести, протекают очень медленно, что и является причиной развития физической и химической неоднородности слитков и отливок [1]. Известно, что неоднородность металла как непрерывнолитых слябов, так и слитков чувствительна к различным внешним воздействиям. Поэтому создание новых технологий с целью улучшения качества слябов, слитков и отливок должно базироваться на поиске средств теплового воздействия на упомянутые выше процессы, протекающие при разливке и кристаллизации стали. Такие технологии должны быть созданы на основе теорий массообмена, теплообмена и гидравлических процессов разливки, основанных, прежде всего, на теории пограничного слоя [1]. Кроме того, они должны обладать средствами управления гидравлическими, тепловыми и диффузионными слоями, от которых будет зависеть и интенсивность тепло- и массообмена в процессе разливки стали и формирования слябов и слитков [1]. В связи с такими требованиями к новой технологии в настоящее время самым эффективным средством воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл является пульсационное газоимпульсное перемешивание. Такой способ обработки жидкого металла является наиболее экономичным (высокий коэффициент использования подводимой энергии), достаточно надежным и эффективным способом управления структурой, механическими и другими свойствами металла, так как непосредственно связан с активным вмешательством в кристаллизацию металла.

В последнее время газоимпульсное перемешивание жидкого металла проводится в ковше, изложнице и кристаллизаторе МНЛЗ.

В ФТИМС НАН Украины проведен комплекс исследований по изучению эффективности применения газоимпульсного перемешивания жидкого металла в изложницах и кристаллизаторе МНЛЗ. Сущность газоимпульсного перемешивания – это возбуждение скоростных затопленных потоков расплавленного металла, что способствует подводу к фронту

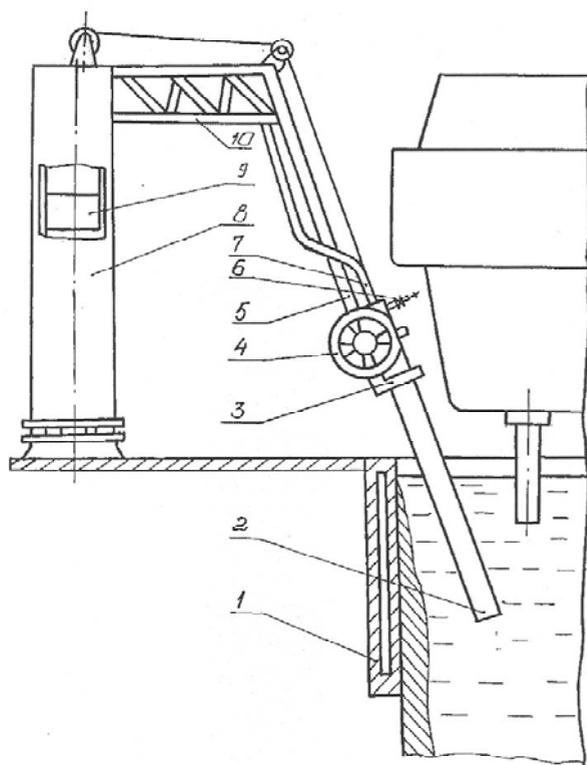


Рис. 1. Установка для газоимпульсного перемешивания стали в кристаллизаторе МНЛЗ: 1 – кристаллизатор; 2 – огнеупорная труба; 3 – тележка; 4 – фиксатор; 5 – направляющая; 6 – выпускной клапан; 7 – трубопровод для подвода аргона; 8 – колонна; 9 – контргруз; 10 – ферма

затвердевания и мениску более подогретого металла и ускорению процесса затвердевания. Это достигается дискретно-импульсным подводом энергии к расплаву за счет циклического выталкивания из погруженной в жидкую фазу огнеупорной трубы порций металла. Для этой цели были разработаны и изготовлены специальные установки, в которых использован основной принцип данного способа обработки металла. На рис. 1 представлена установка для перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ. Определены рациональные параметры оборудования и технологии газоимпульсного перемешивания затвердевающего металла стальных слитков и слябов. При этом выбраны оптимальные режимы обработки (удельная мощность воздействия). Опытно-промышленные испытания технологического процесса газоимпульсного перемешивания в изложницах и кристаллизаторе МНЛЗ проведены в условиях конвертерного цеха металлургического комбината «Азов-сталь» (г. Мариуполь).

Обработку жидкого металла при отливке слитков проводили в изложницах в течение 20, 30, 90 и 120 мин, а для непрерывнолитых слябов – в кристаллизаторе МНЛЗ в процессе всей разливки.

Для изучения влияния газоимпульсного перемешивания на качество металла слитков, отлитых в изложницы, отбирали продольные и поперечные темплеты от подкатов толщиной 250, 300 мм на трех горизонтах по высоте контрольных и опытных листовых и кузнечных слитков массой 15,7; 16,4; 20 т и непрерывнолитых слябов сечением 250x1650, 300x1850 мм низкоуглеродистой, низколегированной и нержавеющей стали марок СтЗсп, 20Л, 17ГСПУ, 09Г2ФБ, 08Х18Н10Т и др.

Для изучения влияния газоимпульсного перемешивания на качество металла непрерывнолитых слябов и слитков использовали металлографический метод исследования и действующие ГОСТы контроля металла. Изучали макро- и микроструктуру опытного и контрольного металла, его химическую неоднородность, природу, размер, форму и распределение неметаллических включений по высоте, поперечному сечению в структуре металла слитков и слябов. Для выявления внутренних дефектов листа применяли метод ультразвукового контроля (УЗК). Механические свойства катаного металла, вырезанного в продольном и поперечном направлениях относительно прокатки, определяли при комнатных и отрицательных температурах.

Результаты исследований опытного металла, подвергающегося газоимпульсному перемешиванию как в изложнице, так и в кристаллизаторе МНЛЗ, выявили

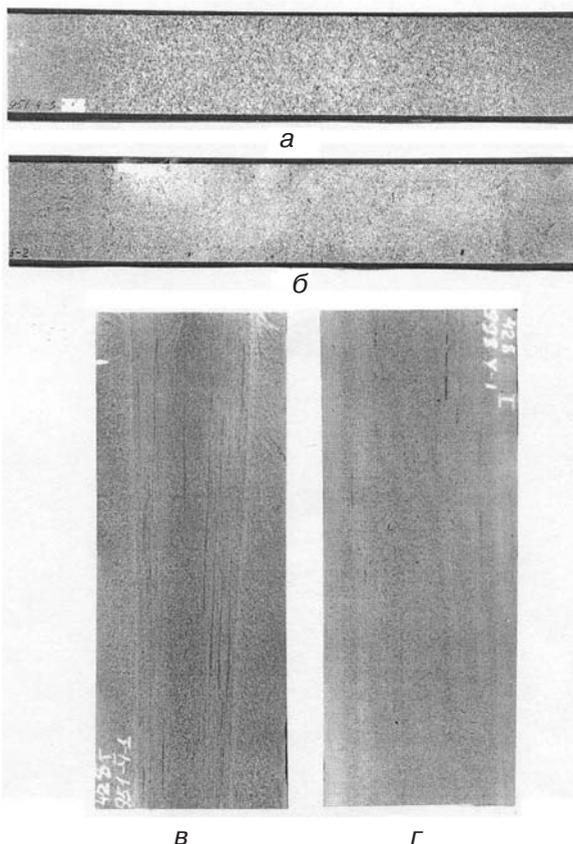


Рис. 2. Макроструктура поперечных и продольных темплетов 20-тонного слитка стали марки СтЗ после импульсного перемешивания: а, б – поперечные темплеты, в, г, – продольные темплеты; а, в – 30, г – 90, б – 120 мин

существенное преимущество по сравнению с металлом, разливаемым без перемешивания. Металл опытных слитков более однороден по высоте и сечению слитка, в нем слабо развита химическая ликвация, шнуры внецентренной ликвации рассредоточены, а на отдельных участках вовсе отсутствуют (рис. 2). Макроструктура опытных слитков имеет мелкодендритное строение, отсутствуют грубые дефекты структуры металла, нет нарушения его сплошности, а в головных горизонтах отсутствует явно выраженная подсадочная рыхлость в виде пор и трещин. Изучение структуры темплетов после глубокого травления подтвердило улучшение макроструктуры опытных слитков (рис. 3). При газоимпульсном перемешивании обнаруживается принципиально новый вид кристаллизации: четко выраженные структурные зоны как в обычных слитках (без перемешивания)

не обнаруживаются, основная часть опытного металла состоит из мелких, плотно расположенных, разориентированных кристаллов. Результаты исследований микроструктуры стали опытных слитков показали, что газоимпульсное перемешивание жидкого металла с режимом обработки 1,5-2,0 ч позволяет измельчить кристаллическую структуру стали в 3-5 раз по сравнению с контрольным металлом [2]. При этом было получено значительное уплотнение металла и полное исчезновение шнуров внецентренной ликвации, смещение зоны подсадочной ликвации и снижение глубины усадочной раковины. Из результатов определения химической неоднородности металла опытных слитков установили, что изменения содержания серы и углерода на всех уровнях по высоте слитков незначительные. Металл среднего и донного горизонтов опытных слитков по химическому составу наиболее однороден, ликвационные полосы встречаются в единичных случаях или совсем отсутствуют (рис. 4). Ультразвуковой контроль качества проката опытных слитков показал полное отсутствие

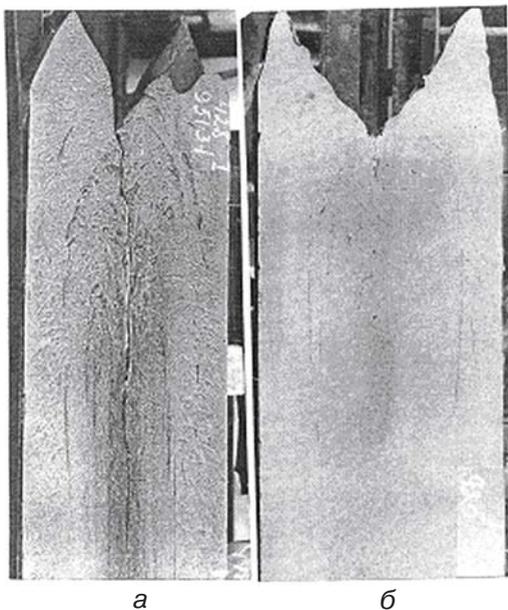


Рис. 3. Макроструктура подката слитков массой 20 т, сталь марки Ст3: а – сравнительный; б – после газоимпульсного перемешивания

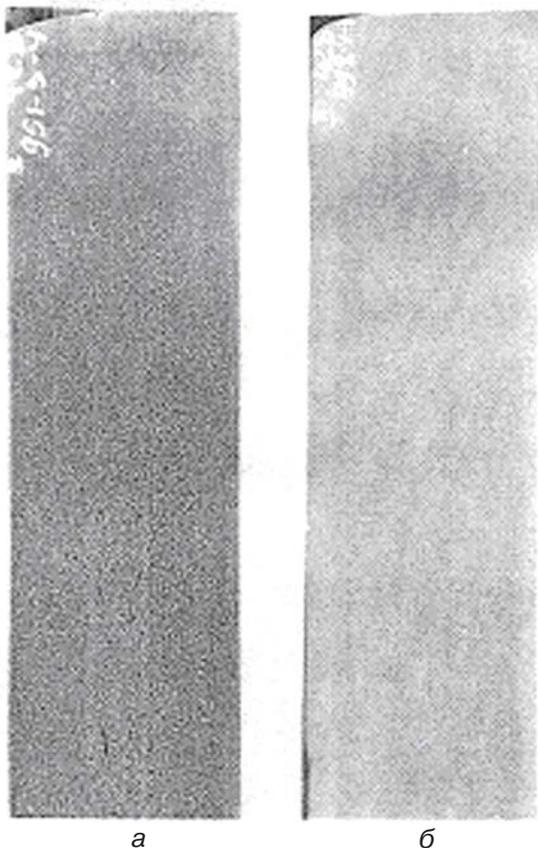


Рис. 4. Макроструктура подката листового слитка (средний горизонт) массой 20 т, сталь марки Ст3 после газоимпульсной обработки: а – сравнительный; б – опытный

расслоя. Анализ результатов механических свойств опытного и контрольного металла показал высокие прочностные свойства опытного металла, что и является одним из главных преимуществ газоимпульсного перемешивания [2-5].

В процессе непрерывной разливки слябов на двухручьевой криволинейной МНЛЗ газоимпульсное перемешивание стали осуществляли в кристаллизаторе при помощи специальной установки, приведенной на рис. 1. Поперечные темплеты слябов опытного и сравнительного металла отбирали в начале, середине и конце разливки плавки. Прокатку проводили поручьевую и пробы отбирали для изучения качества катаного металла.

Газоимпульсное воздействие на жидкий и кристаллизирующийся металл непрерывнолитых слябов дает дополнительную возможность интенсивнее вести охлаждение затвердевающего металла. По возрастанию перегрева воды, охлаждающей кристаллизатор, установлено, что газоимпульсное перемешивание способствует интенсификации теплоотвода от кристаллизующегося металла, что обеспечивает снижение глубины поперечных складок на поверхности заготовок. Полное время затвердевания опытного сляба сокращается на 8-10 %, плотность металла повыша-

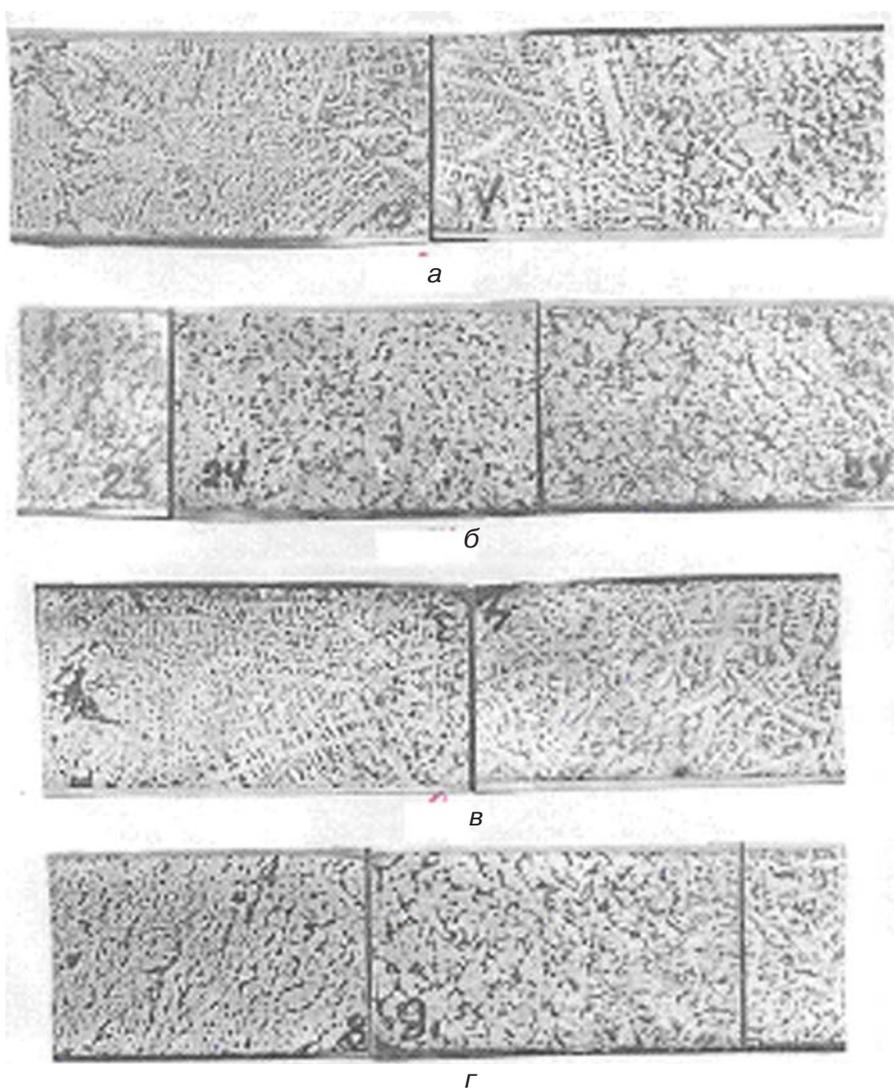


Рис. 5. Дендритная структура стали непрерывнолитых слябов сечением 0,3x1,85 м, осевая зона: а, в – сравнительные; б, г – после газоимпульсного перемешивания; а, б – сталь 15К; в, г – сталь 3сп

ется на 5-8 %, осевая ликвация менее развита, а осевая рыхлость снижается на 1,0-1,5 балла, протяженность двухфазной зоны в центре сляба сократилась с 5 до 3 м, протяженность зоны столбчатых дендритов уменьшается на 25-30 %, первичное зерно измельчается в 2-3 раза (рис. 5).

Исследование серных отпечатков опытных темплетов показало достаточно равномерное распределение серы в металле, тогда как в контрольных темплетях, особенно в районе осевой трещины, выявлена высокая концентрация серы. Кроме того, повышенная концентрация серы обнаружена в местах гнездообразных и внутренних трещин контрольного сляба. В опытном металле такие дефекты не выявлены, осевая зона отличается повышенной плотностью и отсутствием ярко выраженной центральной трещины (рис. 6)

Грубая точечная неоднородность, присутствующая в сравнительных слябах на расстоянии 40-45 мм от грани малого радиуса, связана, как правило, с накоплением неметаллических включений и газов, при формировании непрерывнолитых заготовок в опытных слябах она

слабо развита и располагается на расстоянии 30 мм от поверхности в виде мелких рассредоточенных точек. Количество дефектов макроструктуры в опытных слябах (по оценке ОСТА 14-4-37) значительно ниже, чем в сравнительных (таблица). Однако, характеризуя влияние импульсной обработки стали на качество затвердевающих слитков, следует подчеркнуть важность выбора рациональных параметров перемешивания, вызывающих умеренную турбулизацию расплава и обеспечивающих ламинарное перемешивание потоков стали вдоль границы затвердевания. Слишком большая интенсивность перемешивания разрушает жидкотвердую зону кристаллизации стали, смывая с ее поверхности ликваты, переносит их не в прибыль, а в ядро затвердевающего слитка. При этом в процессе длительного перемешивания в жидком ядре происходит постоянное их накопление и значительное диспергирование, что вызывает потемнение макроотпечатков темплетов заготовок при контроле макроструктуры по Бауману. Результаты изучения влияния интенсивности перемешивания показали, что такие отпечатки были получены при интенсивном перемешивании в течение 90-120 мин мощностью до 9 Вт/т на 20-тонных листовых слитках и непрерывнолитых слябовых заготовках размером 350x1650 мм. Макроструктура

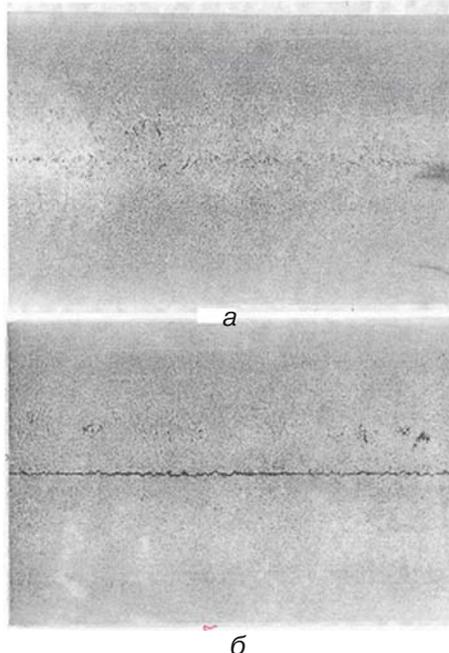


Рис. 6. Макроструктура непрерывнолитого сляба толщиной 300 мм: а – после газоимпульсного перемешивания; б – сравнительный

Оценка макроструктуры слябов

Вид сляба	Дефекты макроструктуры, балл						
	осевая химическая неоднородность	точечная неоднородность	осевая рыхлость	осевая трещина	трещины по широким граням	трещины по узким граням	гнездообразные трещины
Сравнительный	3,0-2,5	1,0-0,5	2,5-2,0	2	2,5-1,5	1,0-0,5	5
Опытный	2,5-1,5	0,5	1,5	0	0,5	0,5	0

таких слитков и слябов мелкодисперсная, плотная, неметаллические включения в этих слитках и слябах мелкие и в основном благоприятной округлой формы.

Из опыта электромагнитного перемешивания жидкого металла при производстве (затвердевании) сортовых слябовых непрерывнолитых заготовок известно, что обнаруженные аналогичные потемнения макроотпечатков темплетов опытного металла не являются для японских и наших отечественных заводов дефектом макроструктуры литья, ухудшающих качество проката.

Интенсивное перемешивание жидкого и кристаллизующегося металла интенсифицирует процессы диффузии, способствует коагуляции и всплыванию неметаллических включений, оказывает существенное влияние на условия теплопередачи. При этих условиях выравнивается температура жидкой сердцевины слитка и сляба, повышаются температура на фронте затвердевания и температурный градиент по толщине сформировавшейся корки, что интенсифицирует теплоотвод, выравнивает температуру и химический состав стали, изменяет условия кристаллизации металла.

Контроль качества металла непрерывнолитых опытных заготовок данного исследования такие результаты подтвердили: при прокатке на лист ультразвуковой контроль не обнаружил дефектов типа расслоя, трещин и скоплений неметаллических включений. Поэтому газоимпульсное перемешивание является эффективным и перспективным технологическим процессом в металлургии, так как непосредственно связан с активным вмешательством в кристаллизацию отливок, слитков, непрерывнолитых заготовок, имеющих целью исключить образование вышеперечисленных дефектов, улучшить структуру металла и повысить его служебные характеристики, что позволит получать качественные отливки, непрерывнолитые заготовки крупных сечений, толстого листа (более 50 мм) для изготовления проката и поковок ответственного назначения.



Список литературы

1. *Ефимов В. А.* Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
2. Внешние воздействия на кристаллизацию и механические свойства литого и деформированного металла / В. Н. Баранова, Р. Я. Якобше, Ю. Я. Скок и др. // *Процессы литья*. – 2005. – № 4. – С. 48-53.
3. *Скок Ю. Я., Якобше Р. Я., Баранова В. Н.* Влияние физических и физико-химических воздействий на процессы структурообразования слитков и непрерывнолитой стали // 50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС. – Киев: Процессы литья, 2008. – С. 413-422.
4. Влияние газоимпульсного и электромагнитного перемешивания в процессе затвердевания на прочностные свойства литого металла / В. Н. Баранова, Р. Я. Якобше, Г. И. Касьян и др. // Там же. – 2008. – № 3. – С. 60-63.
5. Эффективность газоимпульсного перемешивания стали в процессе формирования слитка / Р. Я. Якобше, О. В. Носоченко, В. Н. Баранова и др. // Там же. – 1993. – № 3. – С. 42-47.

Поступила 25.05.2010