



ПОДАВЛЕНИЕ ЛИКВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В КРУПНЫХ СЛИТКАХ

В. А. Шаповалов, Г. М. Григоренко

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

Рассмотрена проблема зональной ликвации в крупных слитках. Показано, что технология выплавки крупных слитков постоянно совершенствуется. Используется целый арсенал способов и технологий для борьбы с ликвационными процессами: подогрев головной части слитка, ПЭШО, двухконтурная схема ЭШП, плазменно-дуговые и электронно-лучевые технологии. Тем не менее, кардинального решения проблемы пока нет. Показано, что ликвация возникает из-за различной концентрации компонентов сплава в твердой и жидкой фазах и описывается коэффициентом распределения. Проанализировано изменение коэффициента распределения в зависимости от скорости кристаллизации ванны или локального времени кристаллизации (ЛВК). Показано, что значение коэффициента распределения при определенных условиях может достигать единицы. Предложен новый подход к подавлению ликвационных процессов, заключающийся в регулировании ЛВК. На наплавляемой поверхности создаются одна или несколько локальных металлических ванн, которые перемещаются по поверхности с заданной скоростью. Регулирование скорости перемещения ванн позволяет эффективно изменять скорость кристаллизации и ЛВК. При такой технологии слиток формируется слой за слоем. Проверка способа в лабораторных условиях показала возможность реализации предлагаемого решения. Приведены результаты макро- и микроструктурных исследований образцов и результаты некоторых механических испытаний. Библиогр. 13, ил. 8.

Ключевые слова: ликвация; крупный слиток; локальное время кристаллизации; скорость кристаллизации; локальная металлическая ванна; процессы специальной электрометаллургии

В связи со все увеличивающимися габаритами изделий для традиционной и атомной энергетики, металлургического и нефтехимического машиностроения, а также военно-промышленного комплекса возрастают потребности в крупных и сверхкрупных высококачественных слитках и кузнечных заготовках.

В настоящее время масса кузнечной поковки, а также слитка, из которого она изготавливается, может составлять несколько сотен тонн. На мировом рынке отмечен спрос на крупнотоннажные поковки, произведенные из слитков массой 100...200 т, а также на уникальные поковки из слитков 300 и 400 т. Основные производители слитков Японии и Кореи уже осваивают производство сверхкрупных поковок из слитков массой до 650 т [1].

Существует много способов отливки слитков в изложницу (однократная и порционная отливка, различные виды подпитки), переплавных процессов: электронно-лучевой (ЭЛП), вакуумно-дуговой (ВДП), плазменно-дуговой (ПДП) и электрошлаковый (ЭШП), а также различные виды укрупнения слитка (ЭШС, ЭШН и др.). Каждому из этих способов присущи недостатки и ограничения.

Выбор того или иного способа зависит прежде всего от требований, предъявляемых к качеству слитка.

Качество слитка определяется наличием или отсутствием некоторого количества специфических дефектов. При этом оно находится в прямой зависимости от массы — с увеличением поперечного сечения и массы резко ухудшается. Растет осевая пористость и объем усадочной раковины. Существенно изменяется распределение эндогенных и экзогенных включений. Включения могут укрупняться и скапливаться в отдельных зонах слитка, что приводит к грубому изменению характеристик металла по сечению слитка. Неметаллические включения могут способствовать снижению предела текучести, в то время как сегрегация элементов может влиять на все физические свойства.

Для обеспечения соответствующих свойств и особенно равномерной структуры по всему поперечному сечению в последующих переделах приходится использовать только часть слитка, что снижает выход годного. Однако и эта пригодная часть с удовлетворительными свойствами в процентном отношении уменьшается с увеличением размера слитка. Поэтому все существующие и вновь разрабатываемые способы получения крупных (16 т и более) слитков



направлены на повышение химической и структурной однородности, увеличение выхода годного.

Основные сложности при получении крупных слитков вызваны процессами, протекающими при кристаллизации, и в первую очередь ликвационными, получающимися все большее развитие при увеличении диаметра слитка, а следовательно, и объема металлической ванны. Ликвация — это неоднородность химического состава, возникающая при его кристаллизации.

Существуют дендритная и зональная виды ликвации.

Последствия дендритной ликвации для сплавов заключаются в уменьшении коррозионной стойкости; понижении пластичности; образовании строчечной структуры при обработке давлением; понижении температуры солидуса, опасности оплавления границ зерна при термообработке; нестабильности структуры и свойств металла во времени.

Зональная ликвация бывает прямая, обратная, карбидная, внеосевая (шнуровая), пятнистая, гравитационная и т.д.

Неоднородность возникает вследствие различной растворимости компонентов сплава и примесей в твердой и жидкой (остаточном растворе) фазах. Растворимость того или иного элемента характеризуется коэффициентом распределения K , определяемого в равновесном состоянии. В реальных условиях необходимо применять эффективный коэффициент распределения (рис. 1) [2, 3], который можно вычислить по формуле

$$K = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0)e^{-f\delta/D}}$$

где f — скорость кристаллизации, см/с; δ — толщина диффузионного слоя, прилегающего к фронту кристаллизации и обогащенного (обедненного) примесью, см; D — коэффициент диффузии примеси, см²/с.

Как видно из формулы, одним из основных параметров, влияющих на значение эффективного коэффициента распределения, является скорость кристаллизации, которая с увеличением массы слитка снижается.

В результате теоретических и экспериментальных исследований, проведенных различными авторами, определены также основные зависимости: времени полного затвердевания от радиуса слитка $\tau = 1,8 \cdot 10^{-3} R^2$; толщины закристаллизовавшегося слоя от времени $s = kt^{1/2}$ (где $k = 0,25 \dots 0,4$ см/с^{1/2}); скорости затвердевания от времени — $f = 1/2kt^{-1/2}$ см/с [4]. Вначале толщина закристаллизовавшегося слоя растет достаточно быстро, а затем рост существенно замедляется (рис. 2). Причиной снижения скорости затвердевания является возрастание теплового сопротивления слоя затвердевшего металла, в то время как при приращении каждого нового слоя необходимо не только отводить теплоту, связанную с перегревом жидкого металла над точкой солидуса, но и скрытую теплоту кристаллизации. Теплота кристаллизации имеет очень большое абсолютное значение. Она эквивалентна количеству теплоты,

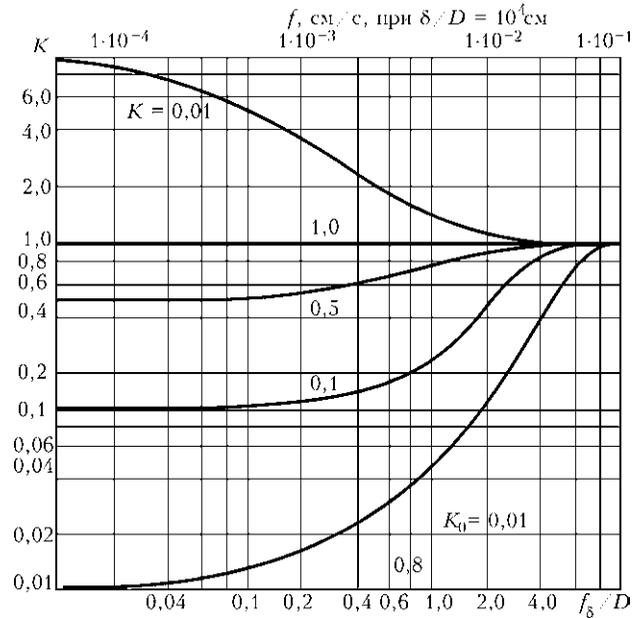


Рис. 1. Зависимость эффективного коэффициента распределения K от приведенной скорости v перемещения границы закристаллизовавшегося металла

необходимой для перегрева металла выше температуры плавления примерно на 180 °С.

С течением времени наступает момент, когда металл, находящийся в центральной области слитка, пребывает чрезвычайно долго в жидком состоянии. Между жидкой и твердой фазами устанавливается состояние, которое можно характеризовать как квазиравновесное, что приводит к усилению ликвации [4].

Таким образом, основной причиной ликвации является ухудшение условий отвода тепла с увеличением толщины закристаллизовавшегося слоя и развитие на границе твердое тело–жидкость диффузионных явлений переноса компонентов сплава и примесей.

С учетом неодинаковой скорости кристаллизации различных частей слитка в работе [5] предложено использовать специальный параметр, характеризующий процесс кристаллизации слитка — локальное время кристаллизации (ЛВК), которое, чем короче, тем меньше неоднородность того или иного участка слитка.

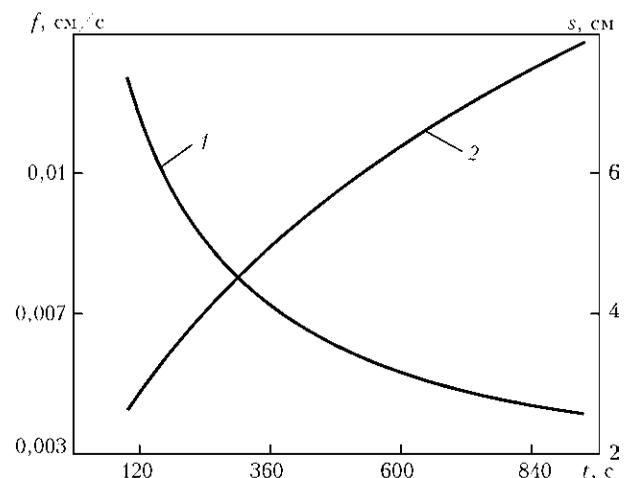


Рис. 2. Изменение скорости кристаллизации (1) и толщины закристаллизовавшегося слоя (2) во времени



Существуют различные технические решения частичного ослабления ликвации и устранения кристаллизационных дефектов в центральной и головной частях слитка. Принципиально они связаны с подогревом открытой поверхности ванны слитка и ее подпиткой. Для слитков, закристаллизовавшихся в изложнице, — это наведение покровного шлака, подогрев шлака термическими смесями или электроподогрев.

Большие надежды металлургов по уменьшению ликвации в крупных слитках были связаны с освоением вакуумно-дугового (ВДП), электрошлакового (ЭШП), плазменно-дугового (ПДП) и электронно-лучевого (ЭЛП) переплава. Эти способы демонстрировали хорошие результаты при выплавке слитков сравнительно небольшого диаметра. С увеличением развеса (диаметра) слитков эффективность переплавных процессов в классическом исполнении практически сводилась к нулю. С превышением радиуса слитка некоторого критического значения в слитке проявлялись ликвационные явления, характерные для крупных слитков обычной выплавки из-за ухудшения отвода тепла.

Одним из способов управления процессом кристаллизации металла можно считать разработанную в ИЭС им. Е. О. Патона порционную электрошлаковую отливку (ПЭШО) [6], основной отличительной особенностью которой является заливка металла в изложницу отдельными порциями. Каждая порция обрабатывается отдельно с помощью электрошлакового процесса. С учетом особенностей процесса кристаллизация происходит не одновременно во всем объеме изложницы, а частями — порциями. Однако с каждой новой порцией заливаемого металла снижается скорость его кристаллизации и увеличивается глубина ванны. Качество металла слитка, полученного способом ПЭШО, лучше, чем металла слитков, получаемых обычной разливкой, происходит снижение уровня зональной ликвации, но полностью при отливке крупных слитков она не устраняется.

Среди слитков, получаемых переплавными способами специальной электрометаллургии, отметим ЭЛП с изменяемой интенсивностью обогрева зеркала металлической ванны, также разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона [7]. Мощность источника нагрева (электронного луча), обеспечивающего обогрев ванны, циклически колеблется от минимального до номинального значения. Кроме того,

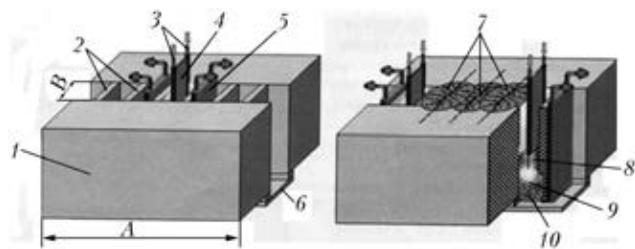


Рис. 3. Схема многопроходной электрошлаковой сварки: 1 — свариваемая деталь; 2 — формирующие вставки; 3 — электродные проволоки; 4 — плавящийся мунштук; 5 — водоохлаждаемое устройство; 6 — входной карман; 7 — сварные швы; 8 — шлаковая ванна; 9 — металлическая ванна; 10 — наплавленный металл; А — толщина свариваемого металла; В — сварочный зазор

распределение мощности, передаваемой металлу пучком электронов, неравномерно по площади поперечного сечения металлической ванны. У стенки кристаллизатора она выше. При снижении мощности обогрева в центре ванны металл в этой части слитка полностью затвердевает, а у стенок кристаллизатора остается в жидком состоянии. Площадь зеркала такой металлической ванны меньше площади поперечного сечения слитка. Процессы кристаллизации протекают в ней интенсивнее.

На следующем этапе мощность источника нагрева повышают и подогревают тонкий поверхностный слой затвердевшего в центральной части металла. После этого заливают очередную порцию жидкого металла из промежуточной емкости с образованием общей металлической ванны. Затем процесс модуляции мощности и заливки очередной порции повторяется. По сути, мы имеем дело с усовершенствованным способом порционной отливки, протекающим в водоохлаждаемом кристаллизаторе, — дифференциальным обогревом зеркала металлической ванны.

Для подавления ликвационных процессов в выплавляемом слитке необходимо, чтобы металл кристаллизовался с высокой скоростью из сравнительно небольших объемов жидкости. Требовалось поддерживать в металлической ванне высокий температурный градиент, который был тем выше, чем мельче ванна. Существуют технологические схемы, в которых площадь сечения сварного шва крупных изделий с большим поперечным сечением (рис. 3) и крупного слитка (рис. 4) разбивают на части [8–11], кристаллизующиеся последовательно одна за другой. И если многопроходная электрошлаковая сварка при соединении металла большой толщины используется как средство получения одинаковых значений прочности сварного соединения и прочности основного металла без проведения последующей высокотемпературной обработки, то многослойную кольцевую электрошлаковую наплавку можно применять для повышения однородности структуры крупного слитка. Существенными недостатками такой схемы получения крупных слитков способом

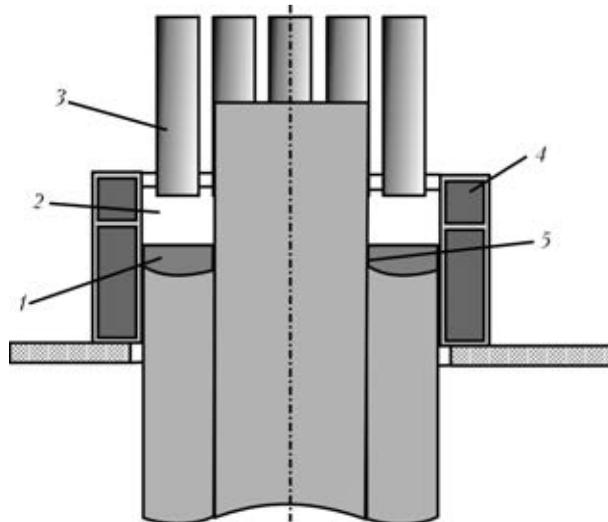


Рис. 4. Схема укрупнения слитков способом ЭШН в подвижном коротком кристаллизаторе: 1 — металлическая ванна; 2 — шлаковая ванна; 3 — расходные электроды; 4 — кристаллизатор; 5 — слиток

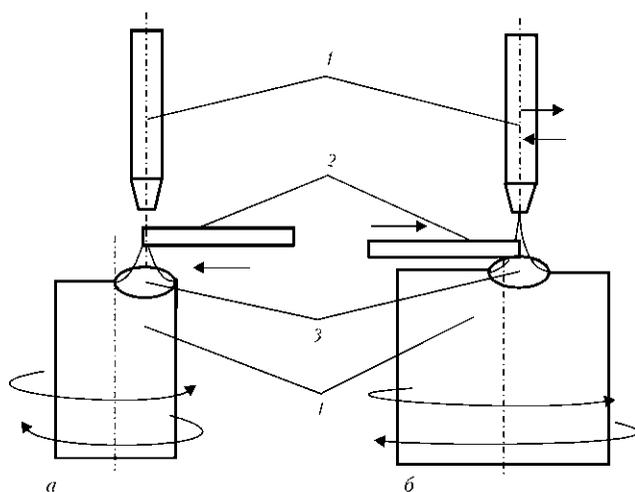


Рис. 5. Схема получения крупного монокристалла способом послойной кристаллизации: *а* – вращающийся монокристалл и неподвижный плазматрон; *б* – вращающийся монокристалл и сканирующий плазматрон; 1 – плазматрон; 2 – поликристаллический пруток; 3 – ванна; 4 – монокристалл

ЭШН являются малый диапазон изменения ЛВК и необходимость применения нескольких типоразмеров кристаллизаторов в соответствии с требуемым количеством слоев, многократной их сменой в процессе выплавки одного слитка. В промышленных условиях целесообразно иметь один агрегат, в котором сразу получают готовый крупный слиток.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан и успешно применяется способ получения крупных монокристаллов тугоплавких металлов, в котором металлическая ванна занимает лишь небольшую часть поперечного сечения слитка [12, 13]. При перемещении ванны с небольшой скоростью по наращиваемой поверхности слой за слоем формируются слиток – монокристалл необходимой формы (рис. 5). Такой подход следует использовать и для получения крупных слитков из стали и специальных сплавов. Мелкая локальная ванна, перемещаемая с большой скоростью по заданной программе в плоскости, позволит существенно подавить ликвационные процессы в крупном слитке.

Экспериментальная проверка предлагаемого способа формирования крупного слитка осуществлена в лабораторных условиях. На полученных образцах из низкоуглеродистой стали оценивали однородность структуры слитка и качество соединения слоев. На рис. 6 приведены макроструктура металла слитка и схема расположения слоев. При визуальном изучении шлифа можно сделать вывод о хорошем соединении слоев и практически однородной структуре.

Результаты микроструктурных исследований с различным увеличением показаны на рис. 7. Структура слитка однородная и мелкозернистая. Размер зерна оценивается на уровне баллов 9–10.

Металл слитка подвергали механическим испытаниям. Для этого вырезали образцы таким образом, чтобы наращиваемые слои располагались перпендикулярно оси образца. Характер разрушения свидетельствует об однородности металла по всей длине образцов (рис. 8).

Уровень пластической деформации соответствует стандартным требованиям для данного материала.

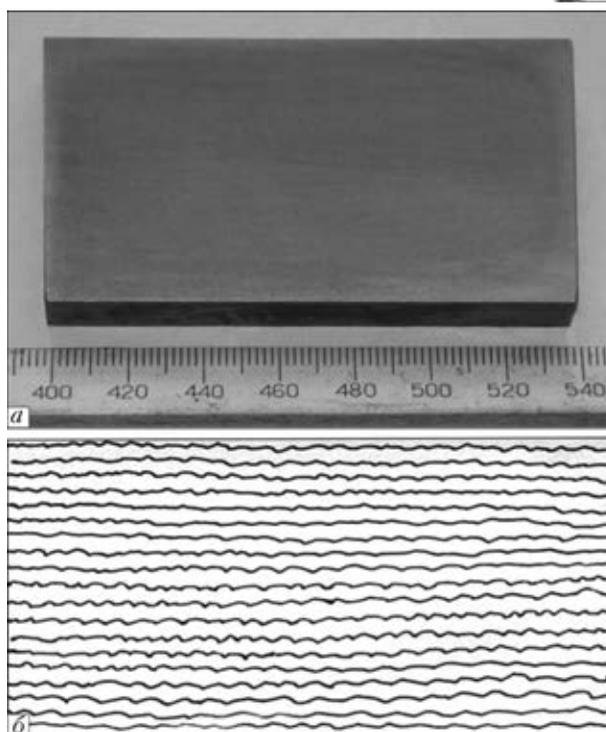


Рис. 6. Макроструктура слитка (*а*) и схема расположения слоев (*б*); скорость перемещения локальной металлической ванны составила 3 мм/с при толщине наплавляемых слоев 3 мм

Таким образом, исследование образцов, полученных путем послойного формирования из локальной металлической ванны со скоростью кристаллизации, в 5...10 раз превышающей скорость, харак-

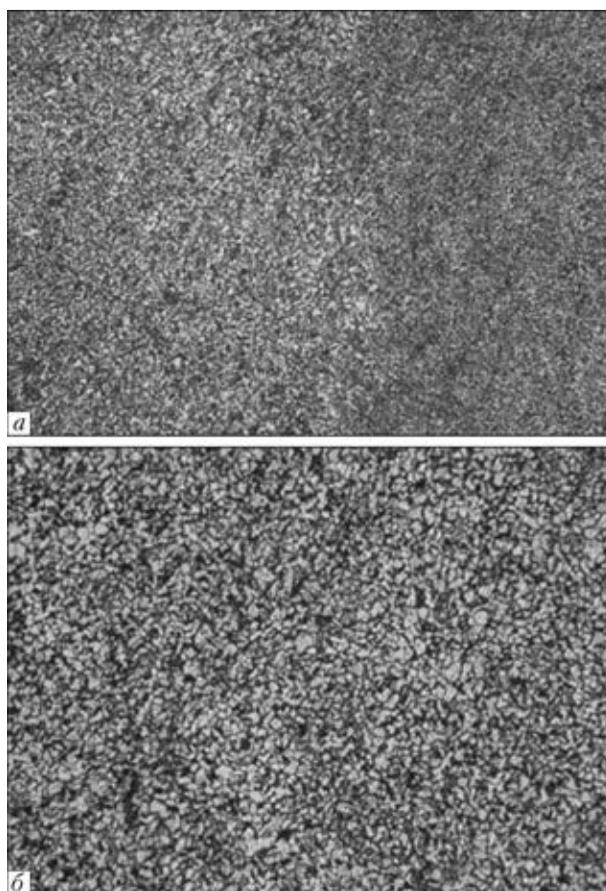


Рис. 7. Микроструктура образцов: *а* – $\times 100$; *б* – $\times 400$

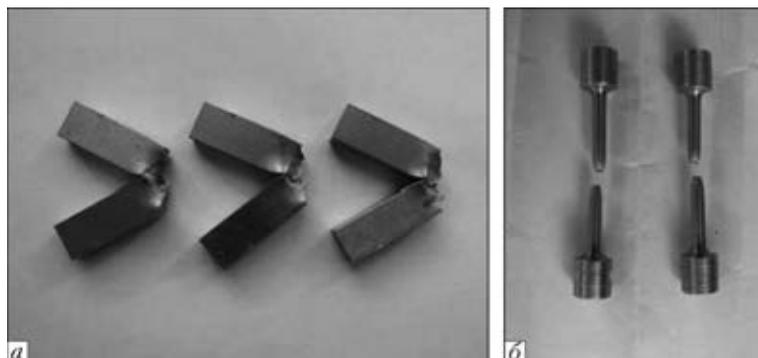


Рис. 8. Образцы после испытания на ударную вязкость (а) и на разрыв (б)

терную для переплавных процессов, подтвердили состоятельность выдвигаемой авторами идеи о формировании крупных слитков из локальной металлической ванны. Авторы продолжают работу в данном направлении и надеются, что предлагаемый подход при его реализации в промышленном масштабе позволит полностью подавить ликвационные процессы и исключить дефекты в головной части крупного слитка, получить слиток с однородной структурой, не зависящей от масштабного фактора в любом сечении.

Выводы

1. Проблема ликвации в крупных слитках частично решена с помощью ЭШТ, ЭЛТ и ПДТ.

2. Предложен новый подход к подавлению ликвационных процессов, который заключается в регулировании ЛВК путем организации на наплавляемой поверхности локальной металлической ванны и регулировании скорости ее перемещения. При этом слиток формируется слой за слоем.

3. Выполнена в лабораторных условиях экспериментальная проверка предлагаемого подхода. В результате механических испытаний образцов и макроструктурных исследований показано, что структура полученного металла является однородной, а размер зерна оценивается на уровне 9–10 балла.

1. *Отчет* о мировом форуме производителей крупных поковок (Сантандер, Испания, 3–7 нояб. 2008). — Сантандер, 2008. — С. 11–19.

2. *Технология* полупроводниковых материалов / Под ред. Г. Бриджерса, Дж. Скафа, Дж. Шайва, Ф. Бионди. — М.: Оборонгиз, 1961. — 314 с.
3. *Флемингс М.* Процессы затвердевания. — М.: Мир, 1977. — 424 с.
4. *Нехензи Ю. А.* Стальное литье. — М.: ГИИТЛ по черной и цветной металлургии, 1948. — 766 с.
5. *Митчел А., Бэлэнштайн А. С.* Факторы, влияющие на температуру и кристаллизацию слитков при ЭШП // *Электрошлаковый переплав.* — 1985. — Вып. 6. — С. 192–198.
6. *Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Медовар Л. Б.* Электрошлаковые процессы без расходуемых электродов // *Пробл. спец. электрометаллургии.* — 1997. — № 2. — С. 12–16.
7. *Электронно-лучевая* плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
8. *Соединение* металла большой толщины многопроходной электрошлаковой сваркой / К. А. Ющенко, С. М. Козулин, И. И. Лычко, М. Г. Козулин // *Автомат. сварка.* — 2014. — № 9. — С. 32–35.
9. *Цыкуленко А. К., Лацман И. А., Медовар Л. Б.* Двухконтурная схема электрошлакового переплава // *Пробл. спец. электрометаллургии.* — 2000. — № 3. — С. 16–20.
10. *Новый* технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // *Современ. электрометаллургия.* — 2007. — № 1. — С. 3–7.
11. *Электрошлаковая* технология получения крупных кузнечных слитков / Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, А. П. Стовпченко и др. // *Там же.* — 2010. — № 3. — С. 5–10.
12. *Крупные* плоские монокристаллы вольфрама и молибдена и способы их получения / В. А. Шаповалов, Ю. В. Латаш, В. В. Жолудь, С. Т. Боримская // *Сб. докл. 7-го междунар. симпозиума «Чистые металлы».* — Харьков, 2001. — С. 39–42.
13. *Ориентированные* монокристаллы вольфрама: получение, исследование и применение / В. А. Шаповалов, Ю. В. Латаш, С. Т. Боримская, В. В. Жолудь // *Металлы.* — 2001. — № 1. — С. 60–64.

The problem of zonal liquation in large ingots was considered. It is shown that the technology of melting of large ingots is continuously updated. A whole arsenal of methods and technologies is used for prevention of liquation processes: preheating of ingot head part; PEST, double-circuit scheme of ESR, plasma-arc and electron beam technologies. Nevertheless, there are no a cardinal solution of this problem. It was shown that liquation is occurred due to different concentration of alloy components in solid and liquid phases and described by a distribution coefficient. The change of the distribution coefficients was analyzed depending on the rate of pool solidification or a local time of solidification (LTS). It was shown that the value of distribution coefficient can reach a unity under certain conditions. A new approach has been suggested to suppress the liquation processes, consisting in LTS control. One or several local metal pools are created on the surface being melted, which are moved over the surface at a preset speed. The control of speed of pools movement can change effectively the rate of solidification and LTS. At such technology the ingot is layer-by-layer formed. The method testing under laboratory conditions showed the feasibility of realizing of the offered solution. The results of macro- and microstructural examinations of specimens and results of some mechanical tests are given. 13 Ref., 8 Figures.

Key words: liquation; large ingot; local time of solidification; solidification rate; local metal pool; processes of special electrometallurgy

Поступила 25.12.2014