



## УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

**В.А. Шаповалов, Г.М. Григоренко**

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

Показано, что управление структурой металла при кристаллизации крупных слитков ограничено во всех существующих технологиях их получения. Предложен принципиально новый послыйный способ формирования слитков, который позволяет прецизионно управлять структурой и исключить неоднородность в донной и головной частях. Структура получаемого слитка не подвержена влиянию масштабного фактора. Лабораторными экспериментами подтверждена реальность предлагаемого способа. Выплавленный слиток в осевом и радиальном направлении имеет практически однородную структуру. Показана перспектива применения данного способа для получения слитков-заготовок ответственного назначения. Библиогр. 9, ил. 4.

*Ключевые слова:* ликвация; кристаллизация; локальное время кристаллизации; скорость кристаллизации; локальная металлическая ванна; процессы специальной электрометаллургии

Проблема управления структурой металла в процессе кристаллизации слитка всегда была и остается актуальной. Основная технология получения слитка – расплавление, доводка жидкого металла и заливка в изложницу. За последние пятьдесят лет она претерпела ряд нововведений: обогрев прибыльной части с помощью термических смесей и электронагрева; воздействие на кристаллизующийся металл звуковыми и электромагнитными полями; использование вакуума; введение инокуляторов и т.д. Тем не менее принципиально изменить структуру, особенно крупного слитка, оказалось невозможно [1, 2].

Сегодня для управления структурой слитка применяются ВДП, ПДП, ЭЛП и ЭШП [3–7]. Процессы отличаются способом нагрева и средой, в которой проходит рафинирование жидкого металла, а также типом источника нагрева — зависимым или независимым. К зависимым источникам нагрева относятся классические ВДП и ЭШП, к независимым — ПДП и ЭЛП. Сделать процесс ЭШП полузависимым или в некоторых случаях даже независимым позволяет двухконтурная схема [6].

К особенностям переплавных процессов также относят подпитку ванны жидким металлом. В последние годы это особенно характерно для ЭШП с приготовлением жидкого металла в отдельном существующем агрегате, а для процессов ЭЛП и ПДП — применение промежуточной емкости.

Подпитка металлической ванны жидким металлом позволяет поддерживать температуру на поверхности ванны значительно ниже, особенно при ЭШП, чем в случае подпитки путем расплавления расходоуемого электрода. Периодическая (порционная) подпитка ванны позволяет уменьшать тепловой поток на поверхность ванны до такого уровня, что ванна начинает кристаллизоваться и с открытой поверхности. При этом перед подпиткой ванны жидким металлом закристаллизовавшаяся поверхность должна быть подплавлена во избежание несплавления жидкого металла с уже сформировавшимся слитком.

Тем не менее кристаллизационные процессы в упомянутых выше переплавных способах остались практически однотипными. Все управление процессом сводится к управлению скоростью перемещения и формой фронта кристаллизации, которые остаются все более взаимно зависимыми с увеличением диаметра выплаваемого слитка. Если рассматривать структуру слитков докритических диаметров, то она практически однотипна. В качестве примера можно привести структуру слитка, выплавленного с использованием расходоуемого плазмотрона. Типичная структура слитка и схема классического ПДП расходоуемого плазмотрона приведена на рис. 1.

На рис. 1, а представлена макроструктура металла слитка из стали X18H9T диаметром 100 мм. Как следует из рисунка на макрошлифе прослежи-

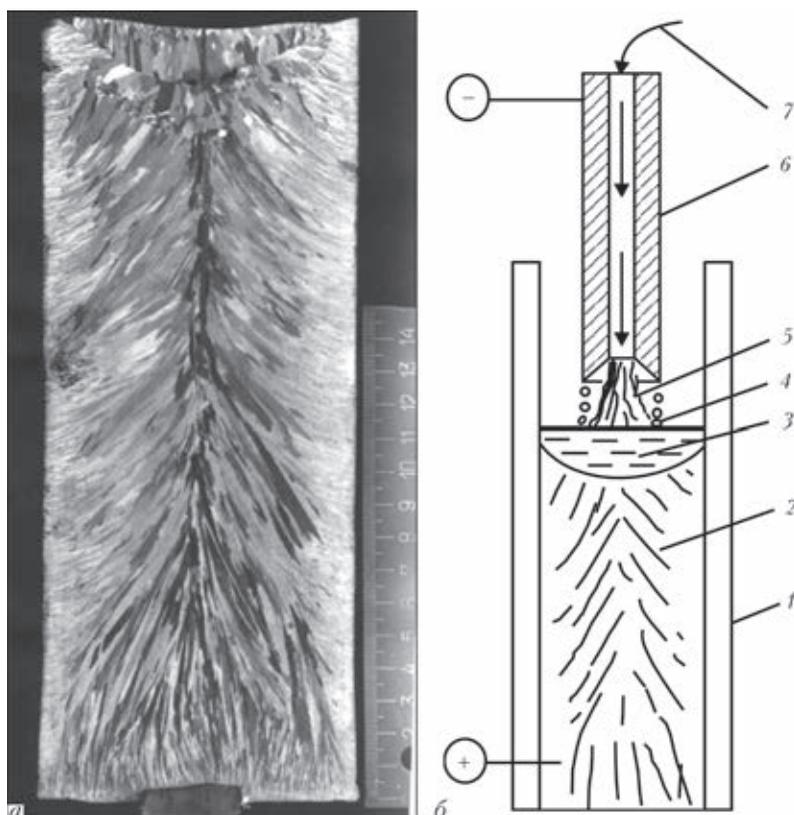


Рис. 1. Макроструктура слитка (а) и схема установки выплавки слитка в плазменно-дуговой печи с расходуемым плазмотроном (б): 1 — кристаллизатор; 2 — слиток; 3 — ванна; 4 — капля; 5 — плазменная дуга; 6 — расходуемый плазмотрон; 7 — плазмообразующий газ

ваются две зоны — зона мелких зерен толщиной 12...15 мм и зона крупных кристаллов. Формирование двух зон определяется различной скоростью кристаллизации. В зоне прилегания слитка к стенке кристаллизатора скорость кристаллизации достаточно высокая, что способствует образованию мелкозернистой структуры. Локальное время кристаллизации (ЛВК) [8] в этой зоне оказывается малым. Впоследствии по мере охлаждения закристаллизовавшегося металла происходит его усадка и между слитком и кристаллизатором

образуется зазор, что приводит к ухудшению теплоотдачи, ЛВК увеличивается и начинают формироваться крупные зерна. Если диаметр слитка достаточно большой, то в центральной части ЛВК становится более значительным, а ванна глубже. В результате образуется зона равноосных кристаллов, характерных для слитков, кристаллизующихся в условиях обычной разливки металла в изложницу. Ликвационные явления проявляются в полной мере и в слитке наблюдаются все дефекты, связанные с зональной ликвацией. Чтобы исключить зональную ликвацию и получить структуру практически однородную в любой части слитка необходимо управлять ЛВК, поддерживая его величину в заданных пределах [9].

В ходе лабораторных исследований, описанных в упомянутой работе, получили новые результаты. В качестве иллюстрационного материала на рис. 2 показан многогранный слиток с расстоянием между гранями 130 мм, полученный послойным формированием.

На рис. 3 представлен продольный макрошлиф этого слитка. Как следует из рис. 3, а макроструктура слитка однородная, мелкозернистая, однотипная в любой зоне слитка, что обеспечивается стабильностью скорости кристаллизации и, соответственно, малым ЛВК. Слиток не имеет уса-



Рис. 2. Внешний вид восьмигранного слитка, полученного послойным формированием

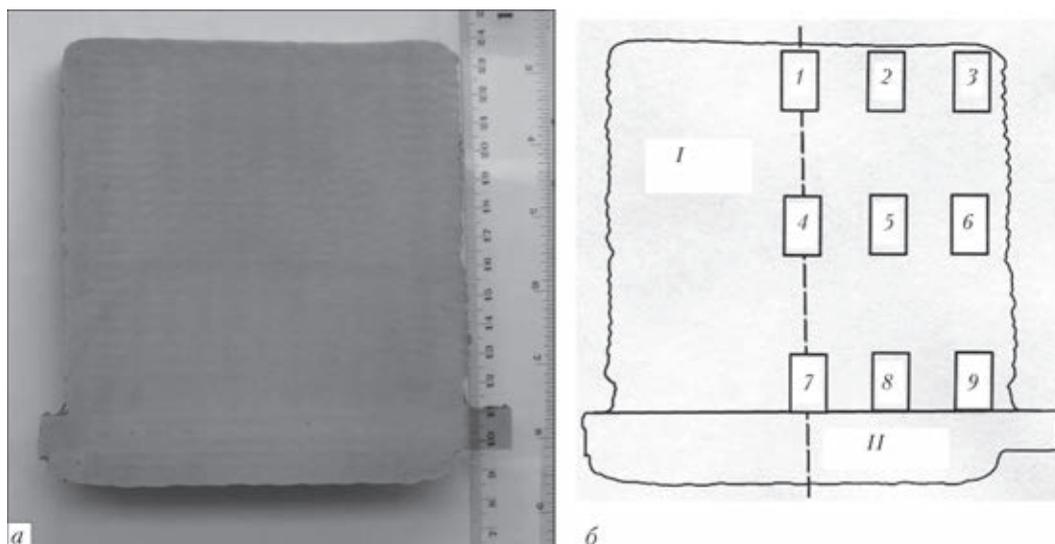


Рис. 3. Макроструктура (а) и схема расположения слитка I на поддоне II (затравке) (б): 1–9 — места отбора образцов для исследования микроструктуры

дочной раковины, а также каких-либо отклонений в формировании структуры в его донной части. Иными словами структура слитка не претерпевает изменений при его формировании от донной части к головной, а также не изменяется по радиусу.

Результаты микроструктурных исследований показали, что величина зерна во всех местах от-

бора образцов (рис. 3, б) оценивается на уровне 9 баллов (рис. 4). Наблюдается небольшое изменение величины зерна при перемещении по высоте слитка от слоя к слою. На границах между слоями она несколько больше и соответствует баллу 8.

Результаты показывают, что создание стабильных условий формирования слитка позволяет

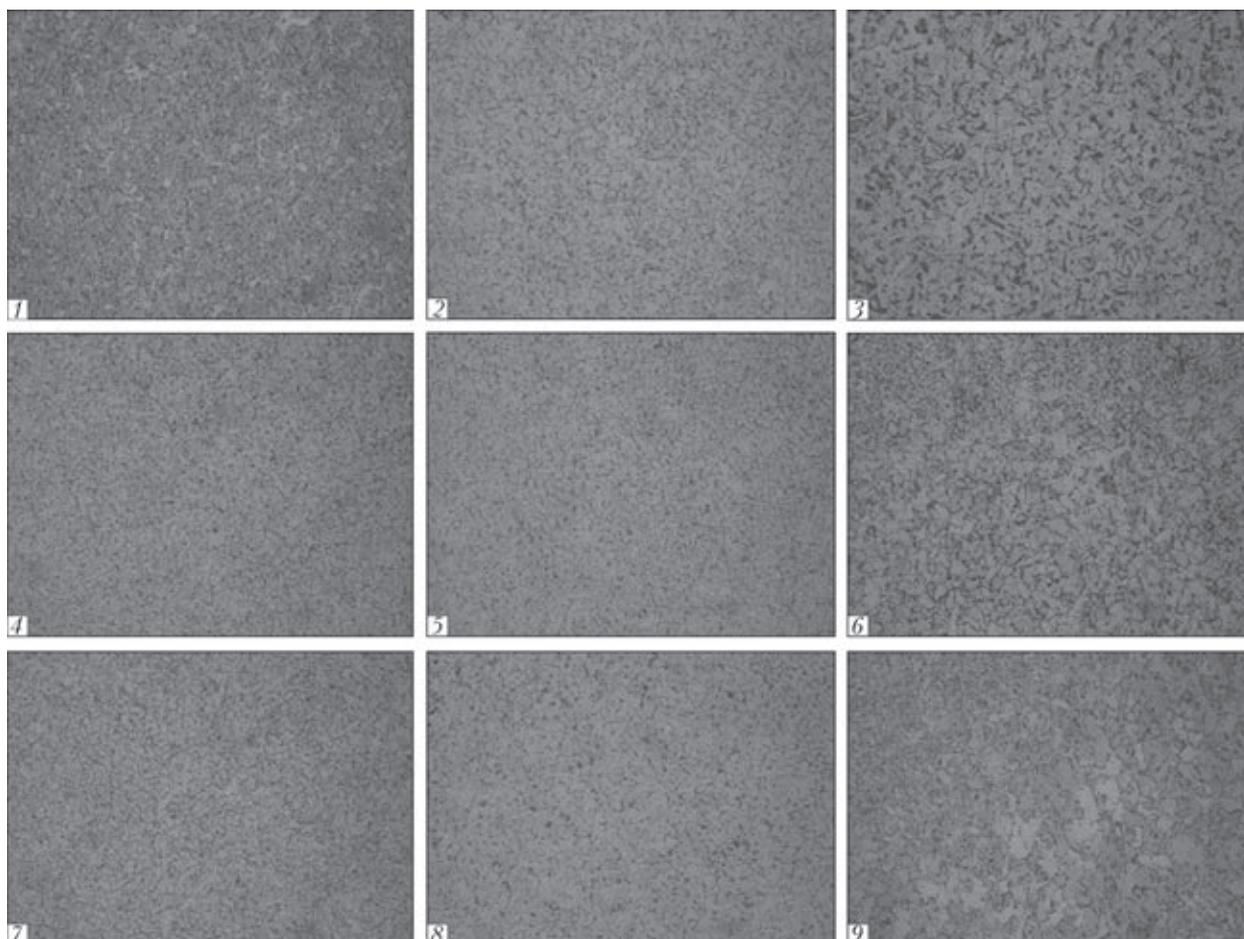


Рис. 4. Макроструктура образцов: 1–9 —  $\times 200$ . Порядок расположения фотографий соответствует схеме на рис. 3, б

исключить масштабный фактор и это распространяется практически на любые размеры слитков. Можно предположить, что при изготовлении особо крупных изделий реально уменьшение веса исходных слитков-заготовок как минимум на треть. Получаемый слиток может быть полностью использован без удаления головной и донной частей. Кроме того, вес особо крупных изделий может быть уменьшен при тех же нагрузочных характеристиках в связи с равенством единице коэффициента, учитывающего масштабный фактор, и повышением прочностных свойств в результате отсутствия зональной и снижении уровня дендритной ликваций.

Устранение зональной и снижение уровня дендритной ликваций будет приближать материал сплавов (например суперсплавов) к идеальному их составу на микроуровне, что особенно важно для изделий, работающих в экстремальных условиях. Для сложнотермически обработанных сплавов предлагаемый подход — это путь к получению крупных слитков со структурой, которую невозможно получить по традиционной технологии. Особенно это касается изделий для энергетики, авиации и других отраслей, где некоторые изделия работают в сверхкритических условиях. Например, применение указанного способа при изготовлении дисков газотурбинных двигателей позволит отказаться от многослойной гранульной технологии, получить изделия с новыми более высокими характеристиками.

Перспективы развития нового подхода к управлению ликвационными процессами могут быть еще более впечатляющими после эксперименталь-

ного подтверждения предположений авторов при получении и испытании конкретных изделий.

## Выводы

1. Показана несостоятельность традиционных технологий по управлению ликвационными процессами при кристаллизации слитков.

2. Подтверждена возможность получения однородной структуры по всему сечению слитка, в том числе в донной и головной частях.

3. Предложена перспектива применения разрабатываемого способа для выплавки слитков и заготовок деталей ответственного назначения.

1. Флемингс М. Процессы затвердевания. — М.: Изд-во «Мир», 1977. — 424 с.
2. Нехензи Ю.А. Стальное литье. — М.: ГИИТЛ по черной и цветной металлургии, 1948. — 766 с.
3. Электронно-лучевая плавка титана / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин, Г.В. Жук. — Киев: Наук. думка, 2006. — 248 с.
4. Лакомский В.И. Плазменно-дуговой переплав. — Киев: Техніка, 1974. — 336 с.
5. Медовар Б.И., Цыкуленко А.К., Медовар Л.Б. Электрошлаковые процессы без расходующих электродов // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1997. — № 2. — С. 12–16.
6. Цыкуленко А.К., Лацман И.А., Медовар Л.Б. Двухконтурная схема электрошлакового переплава // Там же. — 2000. — № 3. — С. 16–20.
7. 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.
8. Митчел А., Бэлэнштайн А.С. Факторы, влияющие на температуру и кристаллизацию слитков при ЭШП // Электрошлаковый переплав. — 1985. — Вып. 6. — С. 192–198.
9. Шаповалов В.А., Григоренко Г.М. Подавление ликвационных процессов в крупных слитках // Современ. электрометаллургия. — 2015. — С. 26–30.

It is shown that metal structure control at solidification of large ingots is limited in all the currently available technologies of ingot production. A fundamentally new layer-by-layer method of forming the ingots is proposed, which enables precision control of the structure and eliminating inhomogeneity in the bottom and head parts. The produced ingot structure is not prone to the scale factor influence. Laboratory experiments confirmed the practicability of the proposed method. The produced ingot has practically homogeneous structure in the axial and radial direction. The prospects for this method application to produce ingots-billets for critical applications are shown. 9 References, 4 Figures.

**Key words:** *liquation; solidification; local solidification time; local metal pool; special electrometallurgy processes*

Поступила 25.05.2015