

## ПРИМЕНЕНИЕ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ЛИКВАЦИИ В КРУПНЫХ СЛИТКАХ

В. А. ШАПОВАЛОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Вопрос ликвации постоянно находится в поле внимания металлургов. Особенно важным представляется его решение при получении крупных слитков. Дендритная ликвация может настолько ухудшить качество слитка, что он может оказаться непригодным для изготовления крупных деталей ответственного назначения. Показано, что основная причина ликвации — малая скорость кристаллизации. Ее увеличение невозможно при выплавке крупных слитков с помощью традиционных технологий. Поэтому одним из путей подавления дендритной ликвации предлагается поэтапное наплавление (формирование) слитка с помощью сварочных технологий. В статье приведены экспериментальные данные, подтверждающие возможность управления структурой слитка независимо от его размеров. Сделан прогноз относительно областей применения предлагаемого подхода для изготовления изделий ответственного назначения. Библиогр. 10, рис. 5.

*Ключевые слова:* дендритная ликвация, коэффициент распределения, скорость кристаллизации, ЭШП, ВДП, ЭЛП, ПДП, макро- и микроструктура

Ликвация — это неоднородность химического состава, возникающая при его кристаллизации. Существует дендритная и зональная ликвация. Следствия дендритной ликвации для сплавов: уменьшение коррозионной стойкости; понижение пластичности; образование строчечной структуры при обработке давлением; понижение температуры солидуса, опасность оплавления границ зерна при термообработке; нестабильность структуры и свойств металла во времени.

Зональная ликвация бывает: прямая, обратная, карбидная, внеосевая (шнуровая) и гравитационная. Причина ликвации — различная растворимость легирующего компонента или примеси в твердой и жидкой фазах (рис. 1).

Отношение концентрации примесей в твердой фазе к концентрации примесей в жидкой фазе есть коэффициент распределения

$$K = \frac{C_s}{C_l},$$

где  $C_s$  — концентрация компонента в твердой фазе;  $C_l$  — концентрация компонента в жидкой фазе.

В металлургических процессах  $K < 1$  и зависит от температуры и скорости кристаллизации (для большинства легирующих элементов и примесей). При быстрой (мгновенной) закалке  $K = 1$ . При очень медленной кристаллизации  $K = K_0$ , где  $K_0$  — в равновесии. Чем меньше  $K$ , тем сильнее ликвация.

Обычно его величина приводится в справочниках для равновесного состояния.

В реальных условиях необходимо говорить об эффективном коэффициенте распределения (рис. 2), который определяется по формуле [1]

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

где  $f$  — скорость кристаллизации, см/с;  $\delta$  — толщина диффузионного слоя, прилегающего к фронту кристаллизации и обогащенного примесью, см;  $D$  — коэффициент диффузии примеси, см<sup>2</sup>/с.

Традиционные технические приемы для борьбы с ликвацией следующие: регулирование температуры заливаемого металла; регулирование теплового поля на поверхности ван-

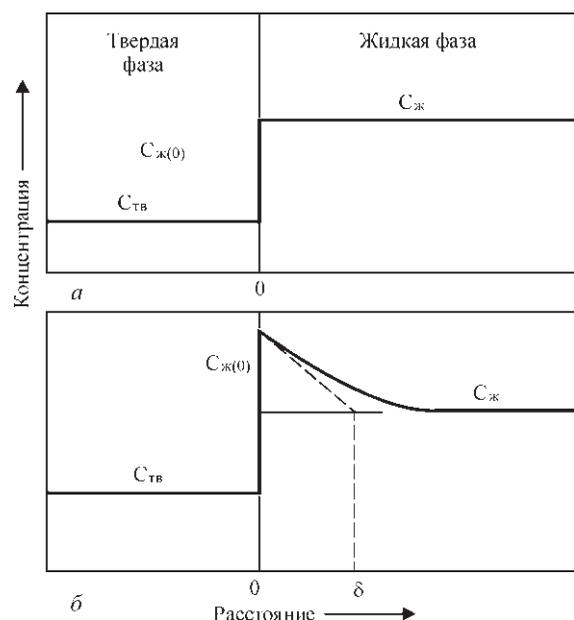


Рис. 1. Схема распределения примесей на границе твердой и жидкой фаз: а — в равновесных условиях; б — в неравновесных условиях (δ — толщина диффузионного слоя)

ны; введение холодильников; электромагнитное перемешивание; виброобработка; реверсивное вращение металла; обработка ультразвуком; электрогидроимпульсная обработка; обработка расплава погружаемым колеблющимся стержнем.

К сожалению, эффективность традиционных технических приемов снижается с увеличением веса слитка. Поэтому разработка новых методов получения крупных слитков является актуальной. Основная причина ликвации — малая скорость затвердевания. Она нелинейно уменьшается с увеличением массы слитка.

Путь борьбы с ликвацией — повышение скорости затвердевания (кристаллизации) до такой величины, которая обеспечит эффективный коэффициент распределения примесей и легирующих элементов примерно равный единице.

Традиционные способы получения крупных слитков, включая и способы специальной металлургии, не могут решить эту проблему. В случае превышения критического диаметра слитка направленная кристаллизация, характерная для слитков ВДП, ЭШП, ЭЛП и ПДП малого диаметра, нарушается и процессы теряют свое преимущество [2–4]. Отвод тепла со средине слитка вниз и через боковую поверхность ограничен, а сверху перегретая металлическая ванна покрывает все поперечное сечение слитка (рис. 3, а).

Для решения проблемы — повышения скорости затвердевания, необходимо организовать отток тепла. Эта возможность появляется, если металлическая ванна будет иметь небольшие размеры, а остальная верхняя торцевая поверхность слитка будет твердой, с отдачей тепла в атмосферу печи (рис. 3, б) (поток  $q_1$ ). Тогда, перемещая металлическую ванну по наплавленной поверхности с высокой скоростью, можно будет управлять скоростью кристаллизации и процессами ликвации.

Решением проблемы ликвации может быть применение сварочных технологий. Небольшая по размерам сварочная ванна и высокая скорость сварки или наплавки, достигающая нескольких метров в минуту, позволяет с уверенностью прогнозировать получение желаемого результата. Наиболее часто сварочные процессы применяются в 3D-технологиях для получения изделий заданной достаточно сложной формы. Описываются процессы получения роторов мощных турбин [5], приводятся примеры проспектов по изготовлению корпусов ядерных реакторов [6]. Опубликованные работы, в основном, посвящены формообразованию, но совсем незначительное число работ, в которых уделяется внимание управлению структурой (ликвацией).

Наши научные интересы лежат в плоскости управления структурой, в первую очередь, и фор-

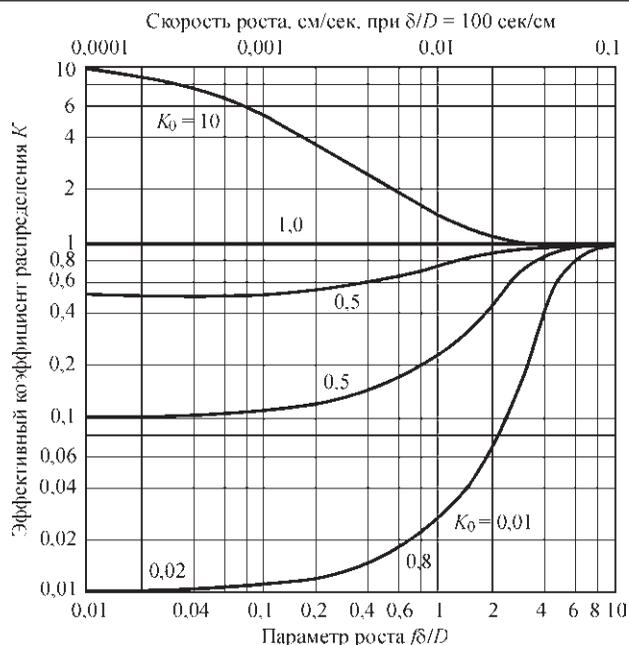


Рис. 2. Зависимость эффективного коэффициента распределения от величины приведенной скорости перемещения границы закристаллизовавшегося металла ( $f\delta/D$ ) [1]

мообразованием, во вторую. Так, снижая скорость перемещения локальной металлической ванны в область малых значений (единицы мм/мин) и используя монокристаллическую затравку мы получаем монокристаллы, теоретически не имеющие предельных размеров [7, 8]. Кристаллы наследуют структуру и кристаллографическую ориентацию затравки. Повышая скорость перемещения сварочного источника в 5...10 раз по сравнению

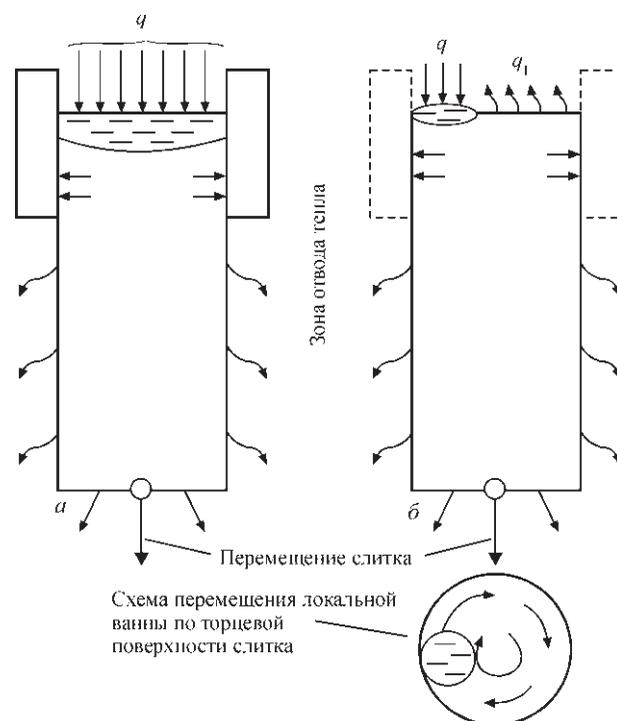


Рис. 3. Схема подвода и отвода тепла от слитка: а — диаметры ванны и слитка равны, б — локальная металлическая ванна

### 3D аддитивные технологии

со скоростью выплавки слитков в известных переплавных процессах, мы добиваемся случайного и быстрого массового зарождения кристаллов в металлической ванне и, в результате, получения мелкокристаллической структуры [9, 10]. Убедительные результаты широких возможностей управления структурой в сравнении с традиционным ПДП приведены на рис. 4. (размеры слитков сопоставимы).

При ПДП структура слитка имеет две зоны: зону закаленных кристаллов и зону крупных направленных кристаллов — дендритов. Кроме того, в осевой зоне наблюдается транскристаллизация. В слитке, полученном в результате его наращивания при перемещении небольшой металлической ванны, отмечается мелкозернистая структура. Результаты металлографических исследований показывают, что величина зерна находится в пределах 8-9 баллов (рис. 5). Но самое главное — это то, что величина зерна, практически, не зависит от места отбора образцов с слитка: середина, верх, низ. При реализации такого технологического подхода исключается влияние масштабного фактора на структурообразование слитка, что в свою очередь открывает большие возможности повышения эксплуатационных свойств изделий, получаемых из таких слитков, и приводит к

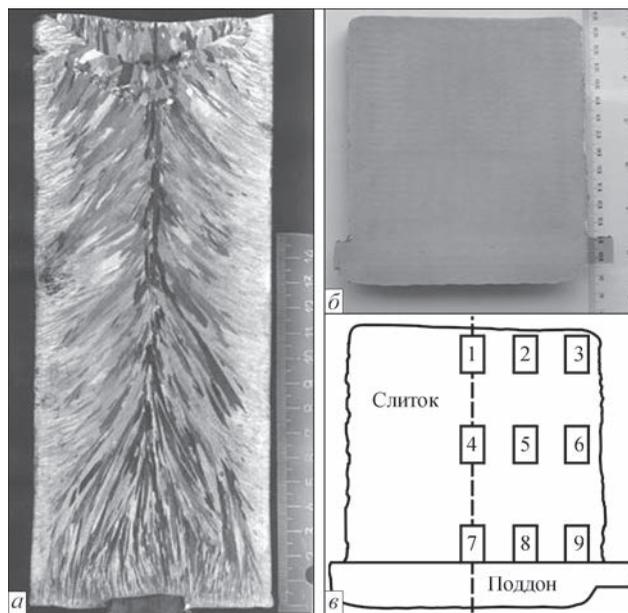


Рис. 4. Макроструктура слитка ПДП (а) и слитка, полученного путем послойной наплавки локальным сварочным источником (б), карта мест отбора образцов (в)

экономии металла в связи с принятием масштабного фактора равным единице, значение которого обычно значительно уменьшается с увеличением габаритных размеров изделий. Кроме того, вес слитка может быть максимально приближен к

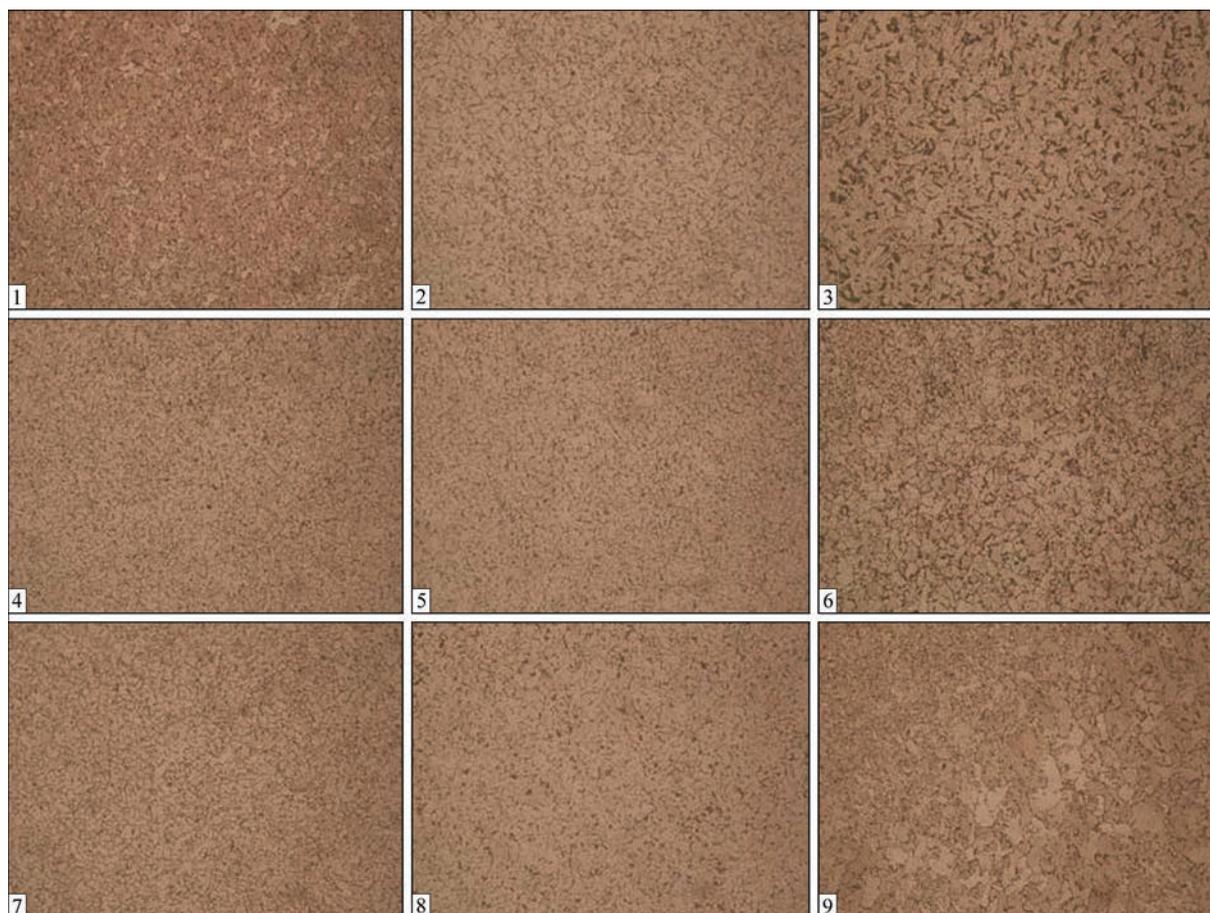


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 200$ ) образцов металла слитка, полученного наращиванием при перемещении небольшой металлической ванны

весу готового изделия — нет необходимости отрезать донную и головную части (это треть веса крупного слитка).

Управление структурой и ликвационными процессами крайне важно при производстве изделий ответственного назначения, например, дисков авиационных двигателей. Практически — это может быть замена сложной и дорогостоящей порошковой технологии.

### Выводы

1. Показана несостоятельность традиционных технологий по управлению ликвационными процессами при кристаллизации крупных слитков.
2. Обосновано применение сварочных технологий для управления ликвационными процессами.
3. Подтверждена возможность получения однородной структуры по всему сечению слитка, в том числе, в донной и головной частях.
4. Показана перспектива применения разрабатываемого способа для выплавки слитков и заготовок деталей ответственного назначения.

1. Технология полупроводниковых материалов / Под ред. Г. Бриджерса, Дж. Скаффа, Дж. Шайва и Ф. Бионди; пер.

с англ. под ред. М. И. Иглицына. — М.: Оборонгиз, 1961. — 314 с.

2. Флемингс М. Процессы затвердевания / М. Флемингс; пер. с англ. под ред. А. А. Жукова, Б. В. Рабиновича. — М.: Мир, 1977. — 424 с.
3. Нехензи Ю. А. Стальное литье / Ю. А. Нехензи. — М.: ГИИТЛ по черной и цветной металлургии, 1948. — 766 с.
4. Митчел А. Факторы, влияющие на температуру и кристаллизацию слитков при ЭШП / А. Митчел, А. С. Бэ-лэнштайн // Электрошлаковый переплав. — 1985. — Вып. 6. — С. 192–198.
5. Datta R. Shape welding with MnMoNi alloys for heavy components / R. Datta, K. Million, H. Zimmermann // Welding and Cutting. — 2003. — 55, № 4. — P. 216–224.
6. Future prospects of shape welding / U. Dilhey, I. Stein, C. Berger, K. Million, R. Datta, H. Zimmermann // Welding and Cutting. — 2006. — 5, № 3. — P. 164–172.
7. Шаповалов В. А. Крупные плоские монокристаллы вольфрама и молибдена и способы их получения / В. А. Шаповалов, Ю. В. Латаш, В. В. Жолудь, С. Т. Боримская // Чистые металлы: Сб. докладов 7-го международного симпозиума. — Харьков, 2001. — С. 39–42.
8. Шаповалов В. А. 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.
9. Шаповалов В. А. Подавление ликвационных процессов в крупных слитках / В. А. Шаповалов, Г. М. Григоренко // Современная электрометаллургия. — 2015. — № 1. — С. 26–30.
10. Шаповалов В. А. Формирование крупного слитка методом перемещения локальной металлической ванны / В. А. Шаповалов, К. А. Цыкуленко, Е. В. Шаповалов, Т. Г. Скуба // Электрометаллургия. — 2015. — № 2. — С. 36–43.

Поступила в редакцию 28.04.2016

### НОВАЯ КНИГА

НАПЛАВКА. МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.  
И. А. Рябцев, И. К. Сенченков, Э. В. Турык. — Gliwice, Wydawnictwo Politechnik Slaskiej, 2015. — 590 p.

#### Книга содержит следующие разделы:

- Виды износа и повреждения деталей машин и механизмов.
- Классификация и характеристика основных методов наплавки.
- Методы расчета напряженно-деформированного и структурного состояния деталей в процессе наплавки и последующей эксплуатации в условиях изнашивания и циклических механических или термомеханических нагрузок.
  - Долговечность наплавленных деталей, эксплуатирующихся при изнашивании и циклических механических нагрузках.
  - Долговечность наплавленных деталей, эксплуатирующихся в условиях изнашивания и циклических термических и механических нагрузок.
  - Нелегированные и низколегированные стали, применяемые для изготовления деталей машин, и их свариваемость.
  - Структура и свойства наплавленного металла различных систем легирования.
    - Методы регулирования структуры наплавленного металла.
  - Электродуговая наплавка.
  - Плазменная наплавка.
  - Электрошлаковая наплавка
  - Газовая наплавка.
  - Индукционная наплавка.
  - Лазерная наплавка.
- Дефекты в наплавленном металле, их происхождение и меры борьбы с ними.
- Контроль качества и механическая обработка наплавленных деталей.
- Аттестация процедур наплавки.



С книгой можно ознакомиться в библиотеке ИЭС им. Е.О. Патона