



*Профессор Алек Митчелл — директор лаборатории современных материалов и процессов Университета Канадского штата Британская Колумбия (University of British Columbia) в г. Ванкувер, известный специалист в области специальной электрометаллургии. Получил образование в Оксфордском университете в области химии и металлургии, преподавал в университете Шеффилда, а с 1967 г. работает в Университете Британской Колумбии. В круг его научных интересов входят исследования не только процессов специальной электрометаллургии, но и композиционных материалов, материалов для электроники и биоматериалов. А. Митчелл автор более 200 печатных работ и многих патентов.*



УДК 669.117.56

## ОБ ИЗГОТОВЛЕНИИ КРУПНЫХ ПОКОВОК ИЗ СПЛАВОВ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К СЕГРЕГАЦИИ

А. Митчелл

Рассмотрены проблемы получения высококачественных кузнечных слитков из сталей и сплавов, чувствительных к сегрегации. Показаны области применения, возможности и ограничения ВДП, ЭШП и ЭШГП.

Problems of producing high-quality forging ingots from steels and alloys sensitive to segregation are considered. Fields of application, capabilities and limitations of VAR, ESR and ESHT are shown.

**Ключевые слова:** крупный кузнечный слиток; поковка; электрошлаковый переплав; электрошлаковая подпитка; вакуумно-дуговой переплав; сегрегация; усадка; ковка

**Введение.** При конструировании оборудования обычно используют поковки, требования к качеству и свойствам которых превышают достигнутый уровень развития технологии. Чаще всего это касается оборудования с вращающимися узлами, эксплуатируемого, в частности, в энергетике. С целью устранения указанных противоречий разработаны такие процессы, как электрошлаковый переплав (ЭШП), вакуумно-дуговой переплав (ВДП), электрошлаковая горячая подпитка (ЭШГП) и сварка крупных сечений, у каждого из которых имеются определенные ограничения. В данной работе обсуждаются практические и теоретические ограничения всех четырех процессов применительно к изготовлению крупных слитков из сплавов, чувствительных к сегрегации, рассматриваются как расчетные оценки, так и практические примеры использования этих процессов. Каждый из них имеет определенные преимущества, но всем присуще ограничение теплопереноса, определяющее максимальную толщину сечения при практическом применении.

Сочетание требований к поковкам и размерам слитков определяет области применения процессов, в особенности это касается сталей типа CrMoV и NiCrMoV, для которых, как показывает практика, отношение высоты к диаметру слитка, возможностиковки и скорость кристаллизации в комбинации не являются оптимальными.

Для поковок из никелевых сплавов ситуация другая, во-первых, из-за более жестких параметров сегрегации, а во-вторых, — термостойкости самих литых структур. В сплавах данного класса ограничение по размерам больше связано с термообработкой, чем с изготовлением слитков.

Требования к качеству поковок в значительной мере зависят от области применения последних и поэтому должны быть разделены на микроуровне по таким параметрам, как включения и размер карбидов; на макроуровне — по объемной деформации при термообработке вследствие сегрегации или по трещинообразованию из-за резких перепадов температуры.

Производство крупных стальных изделий традиционно тесно связано с обеспечением однородности химического состава и высокой степени укова для исправления дефектов слитков (сегрегации и пористости). Поскольку размеры поковок постоян-

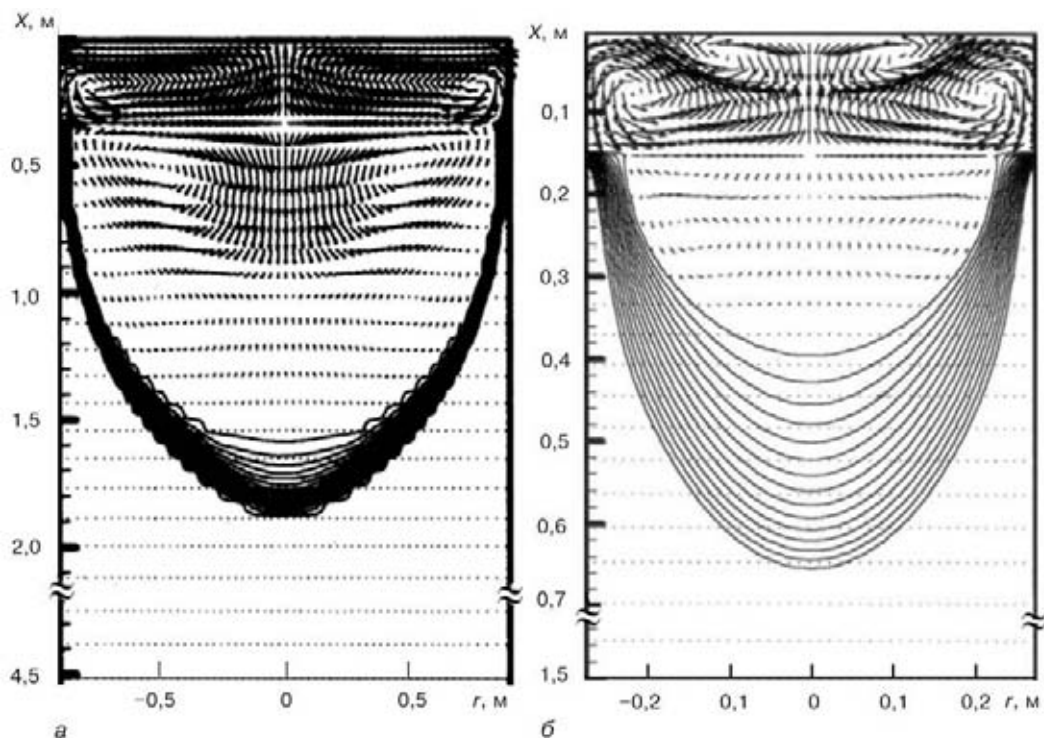


Рис. 1. Вычисленные изотермы и векторы течения в слитках ЭШП: *a* — стальном диаметром 1800 мм; *b* — диаметром 500 мм из сплава IN718

но возрастают, то возникает необходимость в очень крупных ковочных прессах, большом укуе, что приводит к слишком малому выходу годного. Большие инвестиции и высокая себестоимость технологических переделов в данной ситуации способствовали разработке процессов литья слитков, улучшающих их начальную структуру до такой степени, при которой снижение коэффициента укува и увеличение выхода годного станут значительными. Процессы, используемые до настоящего времени — ВДП, ЭШП, ЭШГП и др., — позволяют увеличивать размеры путем сварки или отливки полых сечений. Из них только ЭШП и ЭШГП нашли широкое промышленное использование для данных целей.

**Вакуумно-дуговой переплав.** Самая большая вакуумно-дуговая печь построена на фирме «Мидвейл-Хеппенсталь Корпорейшн» (США) для производства слитков диаметром 1,5 м. Она обеспечивала удовлетворительное качество слитков из обычных сталей, хотя имелись случаи образования дефектов сегрегации в высоколегированных материалах из-за трудности контроля дугового промежутка при использовании электродов большого сечения. Работу подобной печи, предназначенной для выплавки слитков из низколегированных сталей, исследовали в бывшем СССР в 1974 г., в результате чего определены оптимальные скорости плавки, позволяющие получать удовлетворительные механические свойства сталей [21, 22]. Согласно данным обширных исследований ВДП сплавов, чувствительных к сегрегации [1], для стабильной кристаллизации слитка на фоне нестабильности, вызванной газовой выделением и пористостью электрода, требуется кон-

троль дугового промежутка с погрешностью  $\pm 1$  мм. Современные печи позволяют обеспечить такую точность при выплавке слитка диаметром до 1 м, но для слитка диаметром 1,5 м такой контроль пока невозможен. Это же относится и к трехэлектродной трехфазной вакуумно-дуговой печи, предназначенной для получения более крупных слитков и не требующей высоких значений постоянного тока или больших электродов [23].

Существуют еще и металлургические аспекты. Первый касается включений. В случае ВДП оксидные включения удаляются путем разложения и флотации и при небольших диаметрах слитков можно производить очень чистые стали. Однако при диаметре 1,5 м даже при оптимальных режимах процесса общее содержание оксидов будет таким, что сделает невозможным разложение включений и приведет к образованию оксидных дефектов. Второй аспект заключается в необходимости контроля температуры слитка для предупреждения трещин при структурных превращениях. В других процессах указанная проблема преодолена посредством нагрева донной части слитка с помощью дополнительных нагревателей или изоляции поверхности слитков. Однако это очень сложно выполнить при ВДП. Кроме того, существует также проблема высокой стоимости данной установки, заставляющая воздержаться от инвестиций в непроверенный процесс. Даже при удовлетворительном выполнении механических операций на такой печи все еще не решен вопрос теплопередачи в слитке.

В крупном слитке температурные градиенты обуславливают сильную макросегрегацию даже при очень низкой скорости плавления. Зависимость



между скоростью плавления и макроструктурой позволяет иметь минимальные междендритные расстояния при определенной скорости плавления [2]. В очень крупном слитке этот минимум может быть слишком высоким для свободной от сегрегации структуры и, таким образом, не произойдет изменения скорости плавления и мощности до таких значений, при которых было бы возможно обеспечение приемлемой металлургической структуры изделия. Попытки, предпринятые для достижения указанной цели путем применения электромагнитного перемешивания и ультразвуковых колебаний слитка, не были успешными [24]. Поэтому ВДП и не стал процессом для производства слитков диаметром более 1 м, несмотря на его очень успешное использование для сплавов, чувствительных к сегрегации, в диапазоне меньших диаметров.

**Электрошлаковый переплав.** Процесс ЭШП успешно применяется в промышленности почти 70 лет,\* его технология полностью отработана. Первоначально задуманный как процесс снижения сегрегации в быстрорежущих сталях, он вскоре начал использоваться для производства крупных стальных слитков, на некоторых установках — для выплавки слитков диаметром более 1 м. В настоящее время на трех установках ЭШП выплавляют слитки диаметром более 2 м.

В последние годы в результате применения компьютерных моделей стало возможным изучение механизмов, связанных с ВДП, ЭШП и другими процессами. Сделано интересное заключение о том, что для любого из процессов переплава существует четко определенный максимальный размер слитков, которые могут быть получены при любом указанном уровне сегрегации [2].

Кроме того, максимальный диаметр слитков ЭШП меньше, чем ВДП в основном из-за различия в коэффициентах теплопереноса.\*\* Моделирование позволило оптимизировать процесс ЭШП по скорости плавления, объему шлака, диаметру электрода и т. д. (рис. 1, а).

Подобные вычисления, выполненные для высоколегированных сплавов, показывают, что прогнозируемое равновесие между положением изотерм и скоростью роста слитка, определяющее длительность местной кристаллизации, способствует образованию структур с недопустимым распределением первичных карбидов при всех режимах плавки, если диаметр слитка превышает 700 мм при обычном процессе ЭШП. Изотермы, представленные на рис. 1, б для сплава IN718, указывают на слишком

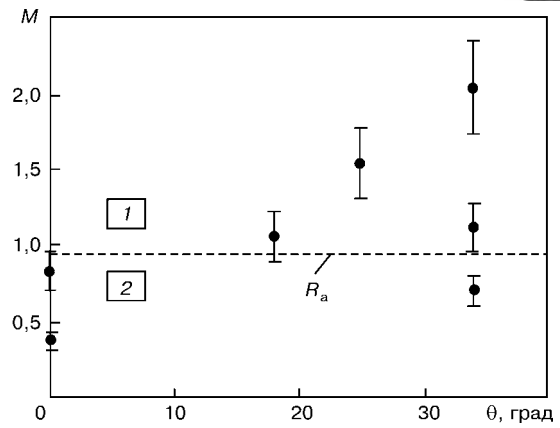


Рис. 2. Критерий Рэлея для определения образования ликвационных пятен в сплаве Вaspалой: 1 — ликвационные пятна; 2 — без ликвационных пятен;  $M$  — модифицированное число Рэлея;  $\theta$  — угол фронта затвердевания

большую продолжительность местной кристаллизации в центре слитка для образования приемлемых карбидных структур. На рис. 1, б время местной кристаллизации по осевой линии составляет 1800 с, что способствует образованию недопустимой карбидной структуры сплава IN718 [2].

Вычисленные изотермы в области затвердевания позволяют установить соотношение между ожидаемой структурой слитка и результатами, полученными в ходе лабораторных испытаний по направленной кристаллизации, в процессе которых выполнены измерения сегрегации, размеров выделенных фаз и т. д. при одинаковых скоростях охлаждения. Параметры кристаллизации междендритных расстояний и температурного градиента могут быть использованы для вычисления местного числа Рэлея [3] и определения вероятности образования ликвационных пятен («фрэклс») для сплава, чувствительного к сегрегации (рис. 2).

Сочетание указанных подходов позволяет предсказать ожидаемую структуру слитка при данном режиме ЭШП с большой степенью надежности при условии наличия информации о характере кристаллизации сплава.

Что касается крупных кузнечных слитков, то вопрос о сегрегации тесно связан не только с выбранным процессом, но и рассматриваемым сплавом. Термин «крупный» является относительным. В сплаве с высоким уровнем сегрегации (IN718 или 706) пределы практически достигаемых диаметров слитков, пригодных по качеству для вращающихся узлов, составляют 700 мм (для ЭШП) при предельной массе слитков, предназначенных дляковки приблизительно 10 т, если, конечно, не применяют специальных способовковки. Отметим, что на ос-

\* Это утверждение автора представляется нам отголоском давних дискуссий. Общеизвестным является факт, что широкое промышленное применение ЭШП получил с 1958 г., когда в бывшем СССР (и что особенно приятно, в Украине) на заводах «Днепросталь» и НКМЗ запущены первые в мире промышленные печи ЭШП. Вероятно, читателям будет интересно и то, что еще в 1969 г. американские металлургические журналы украсились звонким лозунгом «ESR from USSR», т. е. «ЭШП из СССР!» (прим. редкол.).

\*\* Основания для такого утверждения имеются. Например, наибольший диаметр бездефектного слитка ЭШП сплава IN718 вдвое меньше диаметра бездефектного слитка ВДП этого же сплава. Однако, надеемся, читатели согласятся с тем, что в контексте этой части работы данное положение выглядит не очень уместным (прим. редкол.).

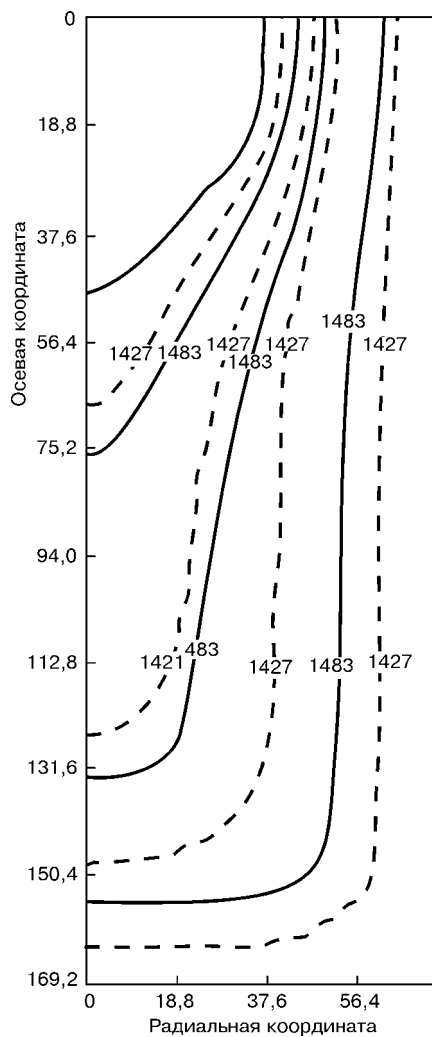


Рис. 3. Изменение температурного поля в процессе ЭШГП крупного слитка легированной стали

новании вычисленных параметров или практического опыта при использовании несколько других характеристик теплопереноса при ВДП можно изготавливать слитки диаметром 1 м из того же сплава путем тройной плавки, что существенно увеличивает максимальную массу). Ограничения, связанные с режимом охлаждения при ЭШП, в основном такие же, как и при ВДП, поскольку продолжительность местной кристаллизации определяет не только структуру ликвационных пятен, но и размеры фазовых выделений первичных карбидов сплава IN718. Для поковок из обычных марок сталей, таких как СгМоV, максимально достижимый диаметр при ЭШП намного больше, вопрос о качестве сводится, скорее, к макро-, чем к микросегрегации, а это гораздо более сложная ситуация, чем в указанных случаях.

Параметры качества при макросегрегации в очень крупных слитках касаются не только легко моделируемых элементов, таких как междендритные промежутки, но и столбчато-равноосного типа кристаллизации, течения жидкой фазы. Для любой заданной системы легирования существует максимально допустимый размер слитка ЭШП, но параметры, управляющие данным ограничением, раз-

личны для разных сплавов. Таким образом, для высоколегированных материалов переplав является единственным приемлемым процессом получения требуемого качества, хотя для многих легированных сталей вряд ли требуется переplав с целью удовлетворения требований по качеству. Этим вопросом занимаются исследователи и включают его в программы разработки альтернативных решений, представленных ниже.

**Электрошлаковая подпитка.** Получение слитков большого сечения из легированных сталей связано с проблемой кристаллизации в верхней центральной части слитка. Например, выход годного для таких слитков составляет не более 60...70 %. Вместо применения экзотермической или изолирующей подпитки можно увеличить поступление тепла в верхнюю часть слитка путем прохождения тока через расходимый либо нерасходимый электроды. В этом и состоит процесс электрошлаковой подпитки. Данная идея была впервые запатентована в 1947 г. [4-6]. Процесс опробован на промышленном уровне [7-9], но в настоящее время используется только в трех местах. Предшествующие разработки были неудачными из-за неправильного понимания режима теплопереноса [10-14].

Характер распределения температур, установленный при изолирующей или экзотермической ЭШГП либо для нерасходимого электрода, очень стабильный относительно конвекции в жидком металле ванны слитка. Поскольку такая конвекция имеет важное значение для существенного теплопереноса в тело слитка (в отличие от простой проводимости), то влияние указанных способов на затвердевание слитка будет минимальным, ограниченным до некоторого снижения усадочной раковины. С другой стороны, если металл добавляют в верхнюю часть слитка с соответствующей скоростью, например способом ЭШГП, то влияние теплопереноса будет значительным, в том числе и на затвердевание слитка. Поэтому при ЭШГП необходимо обеспечивать соответствующую скорость плавления электрода.

Одной из важных особенностей ЭШГП является уменьшение требуемого коэффициента улова по сечению и необходимость приложения больших усилий для ковки с целью улучшения центральной части слитка. Опыт показал [15], что ЭШГП улучшает качество обычного слитка, уровень которого вполне достаточен, чтобы в ряде случаев заменить ЭШП крупных слитков. Компьютерный вычислительный эксперимент позволяет установить последовательность охлаждения слитка ЭШГП (рис. 3). На рисунке показано, как постепенно охлаждающаяся ванна изменяется по направлению к вершине слитка в зависимости от скорости подачи металла при ЭШГП и подводимой мощности.

Если соблюдать строгую технологию процесса подпитки, то выход годного слитков массой до 120 т может быть увеличен до 90 % при потерях, определяемых скорее технологической обрезью поковок,

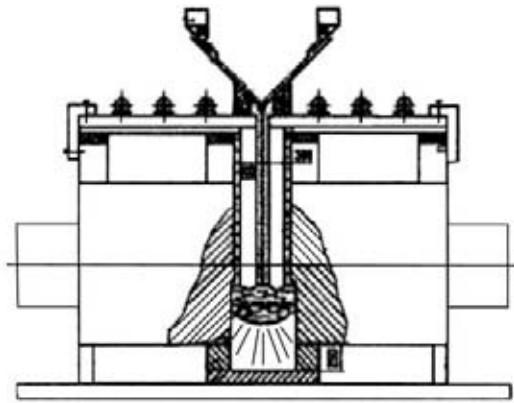


Рис. 4. Электрошлаковая сварка блоками

чем качеством слитков. Такая подпитка требует 26 ч технологического времени с максимальной подводимой мощностью (приблизительно 900 кВт) при общей добавке к слитку 12 т металла.

Основным недостатком ЭШГП является то, что только небольшая часть слитка (около 10 %) рафинируется шлаком. Остальное имеет обычный уровень качества. Однако сейчас прогрессивные технологии выплавки стали позволяют получать жидкий металл почти такого же качества, как и при ЭШП. Поскольку и капитальные затраты, и текущие расходы на обслуживание установки для ЭШГП меньше, чем для ЭШП, то непонятно, почему этот процесс не получил широкого применения для производства крупных стальных слитков.

Что касается высоколегированного материала, то его требуемые размеры намного меньше используемых при производстве сталей. Однако исходя из вычисленных скоростей охлаждения при ЭШГП ожидаемые структуры оказываются неприемлемыми для использования обычных суперсплавов и подобны традиционным слиткам «статической» заливки как по микро-, так и по макросегрегации.

**Другие способы.** Альтернативные способы производства стальных изделий крупного сечения, разработанные в основном в России и Украине [16], не нашли промышленного применения за их пределами. Простейший из этих способов — заваривание трепанированного слитка, при котором в традиционном крупном слитке оттрепанную полость заполняют обычной электрошлаковой плавкой электрода, расплавленный металл которого приваривается к основному слитку. Процесс опробован в Германии и в США [17], но не нашел значительного применения из-за проблем, возникших при контроле трещинообразования в центре под воздействием сжимающих сил. Такие трещины не завариваются на последующих этапах ковки. Подобная проблема прослеживается и при разработке сходного способа [18] (рис. 4), при котором два больших стальных блока соединяются электрошлаковой сваркой в одну заготовку крупного сечения для получения большой поковки. В таком виде процесс, несомненно, найдет определенное применение в производстве судовых двигателей. Возможно,

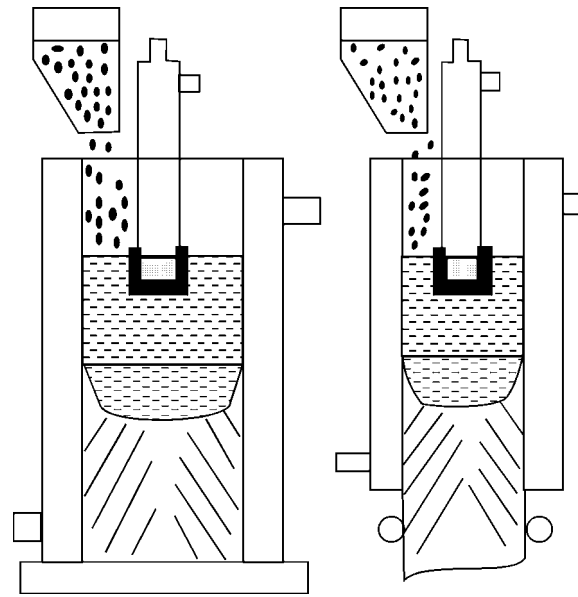


Рис. 5. ЭШП с применением подачи порошка и нерасходуемых электродов

указанная технология сможет использоваться для расширения диапазона существующих максимальных размеров изделий из суперсплавов, если проблема образования трещин вследствие ограничений по температуре, а также избыточного роста зерен в зоне термического влияния будет преодолена. Вероятно, данная технология сможет успешно применяться только при условии разработки для нее специальных сплавов. Наиболее правильным путем в данном случае может быть сварка крупных плит для получения больших дисков.

Предложен и опробован вариант ЭШГП [19], согласно которому используются неплавящиеся графитовые электроды, а требуемая добавка металла поступает в виде перегретой жидкости. Этот процесс получил название электрошлаковой разливки. Несмотря на активное обсуждение в литературе, он по-прежнему вызывает затруднения для крупных слитков, поскольку металл должен находиться на воздухе длительное время в процессе заливки и таким образом поглощать большое количество водорода [20]. В случае использования высоколегированного материала происходят потери вследствие окисления или поглощения азота. В отличие от этого процесс ЭШГП можно вести полностью в аргоне, что позволяет устранить указанную проблему. Другим вариантом процесса электрошлаковой разливки является добавка металла в виде порошка (рис. 5), тем не менее риск загрязнения или непроплавления существует и здесь. Таким образом, любой из этих вариантов вряд ли будет пригоден для легирующих систем, склонных к сегрегации.

**Заключение.** Для сплавов, склонных к сегрегации, процесс ВДП позволяет получать слитки максимального диаметра. Этот максимум почти близок к определенному нашими существующими моделями и базами данных. Для более крупных размеров слитков из менее чувствительных сталей процесс



ЭШП позволяет получить оптимальное качество. Структура слитка может быть определена теми же методами, что и при ВДП. Однако для многих областей применения процесс ЭШП позволяет изготовить слиток аналогичного качества, но при меньших затратах, чем при ЭШП, хотя сам процесс и не имеет потенциального применения для высоколегированного материала. Опыт показал, что альтернативные способы укрупнения слитков с помощью сварки и т. д. можно было бы контролировать с требуемыми уровнями воспроизводимости и качества при определенной геометрии и соответствующих сплавах. Таким образом, процесс ЭШП выбирают для выплавки очень крупных стальных слитков, а ЭШП/ВДП — для меньших слитков из сплавов, склонных к сегрегации.

*Автор благодарит коллег, помогавших в выполнении данной работы, а также фирму «Consarc Corp» за финансовую поддержку.*

1. *Microstructural evolution of nickel-base alloys* / C. A. Dandre, C. A. Walsh, R. W. Evans et al. // *Superalloys 2000*. — New York, 2000. — P. 85–95.
2. *Mitchell A., Ballantyne A. S.* Factors affecting solidification in ESR // *Proc. 6th Intern. conf. on vacuum metallurgy*. — New York, 1979. — P. 569–599.
3. *Auburtin P., Cockcroft S. L., Mitchell A.* Freckle formation and freckle criterion in superalloys // *Met. Trans B*. — 31B. — 2000. — P. 801–813.
4. *Finch S. L.* // *Am Foundryman*. — 1947. — № 12. — P. 51–61.
5. *Knaggs K.* Arc heating and electroslag feeding of steel castings // *J. BSCRA*. — 1953. — № 73. — P. 2–16.
6. *Dycker P.* Foundry // *Electroslag Feeding of Castings and Ingots*. — 1947. — № 75. — P. 74–77, 224, 226.
7. *Pat. 4,036,278 US.* Process for the production of large steel ingots / A. Ramacciot. — Publ. 19.07.77.
8. *Tarmann R., Machner P., Kuhnelt G.* Manufacture of 55T ingots through the BEST process // *Berg und Huttenmanische Monatshefte*. — 1979. — № 5. — P. 212–221.
9. *Mitchell A.* Electroslag hot-topping of heavy ingots // *Ironmaking and Steelmaking J*. — 1979. — № 1. — P. 32–37.
10. *Mitchell A., Ballantyne A. S.* A comparison of the ESR and ESHT processes for the manufacture of ingots larger than 20T // *Proc. electric furnace conf.* — 1977. — № 35. — P. 229–234.
11. *Inverstigation of the heat transfer from the slag bath during electroslag heating* / Shvetsov V. L., Medovar B. I., Marinski S. S., Serdyukova V. P. // *Refining and remelting*. — Kiev: Naukova Dumka, 1975. — P. 18–25.
12. *TREST process for the manufacture of high quality forging ingots* / A. Ramaccioti, E. Repetto, P. Sommovigo et al. // *Estratto del Bollettino Tecnico Finsider*. — 1977. — № 370. — P. 5–7.
13. *Distribution of metal from consumable electrodes into an ingot fed by ESHT* / V. I. Yavoiskii, S. S. Bektursonov, Y. P. Belyaev et al. // *Avt. Svarka*. — 1963. — № 11. — P. 40–43.
14. *Hirose Y., Morinaka K., Watanabe S.* A New ESHT Process // *Proc. 9th Intern. forging conf.* — Dusseldorf, 1981. — P. 1.5.1–1.5.20.
15. *A New process for the production of high quality forging ingots* / E. Plockinger, G. Kuhnelt, F. J. Weiss et al. // *Ironmaking and Steelmaking J*. — 1976. — № 5. — P. 26–31.
16. *Cherpuoi A. D.* Ways of improvement of the electroslag technology in producing the main products of machine building // *Medovar Memorial Symposium*. — Kiev, 2001. — P. 191–197.
17. *Austel W., Heymann H., Maidorn C.* The manufacture of heavy forgings by the MHKW process and their properties // *Proc. 6th Intern. conf. on vacuum metallurgy*. — New York, 1979. — P. 747–756.
18. *New method for the enlargement of ingots and forgings on the basis of electroslag process* / B. E. Paton, B. I. Medovar, D. A. Dudko et al. // *Proc 3rd Intern. conf. on electroslag*. — Mellon, 1971. — P. 1–17.
19. *New electroslag technologies* / L. B. Medovar, A. K. Tsykulenko, V. Y. Saenko et al. // *Medovar Memorial Symposium*. — Kiev, 2001. — P. 49–59.
20. *Tyagun-Belous G. S., Dudko D. A.* Electroslag heating of ingot heads using non-consumable electrodes // *Avtom. Svarka*. — 1958. — № 10. — P. 99–106.
21. *Special features of the shaping of heavy vacuum arc remelted ingots* / F. I. Schved, G. G. Zimin, A. P. Karyakin et al. // *Stal*. — 1974. — № 8. — P. 703–705.
22. *Development and introduction of vacuum arc furnaces for melting large steel ingots* / L. A. Volokhonsky, V. B. Gogol, V. S. Dub et al. // *Steel in the USSR*. — 1972. — № 11. — P. 875–879.
23. *Sawa S., Shibuya S., Kinbara S.* The nature and origin of segregation in vacuum arc remelted ingots // *Proc. 4th ICVM*. — 1976. — P. 129–134.
24. *Carnahan D. R., Kelley J. H., Bianchi L. M.* Vacuum arc grain refinement // *Vacuum metallurgy conf.* — New York, 1960. — P. 49–56.

Ун-т Британ. Колумбии, Канада, Ванкувер

Поступила 28.09.2004

### Комментарий редколлегии

*Мы полагаем, что многие положения статьи А. Митчелла будут интересны специалистам в области производства крупных слитков, поскольку проблема получения высококачественного, прежде всего кузнечного, слитка — одна из «вечных» проблем металлургии. В этой связи нам представляется заслуживающим особого внимания одно из положений данной работы. Речь идет о необходимости углубленного изучения гидродинамических и теплофизических особенностей затвердевания конкретных сталей и сплавов данного химического состава. Ибо только понимание этих процессов для каждого типа высоколегированных сталей и сплавов, применяемых при изготовлении крупных кованных изделий, позволит технологам осознанно выбирать те или иные приемы подавления различных видов сегрегации. Например, пятнистая ликвация в слитках никелевых суперсплавов связана с некоторыми особенностями гидродинамики двухфазной зоны. Можно назвать и другие стали и сплавы, которые до сих пор не удается получить в слитках таких размеров, которые нужны потребителям. В целом данная проблема особенно актуальна и в части получения поковок для энергетики, поскольку применяемые для этих целей стали и сплавы, в частности сталь с 12 % Cr, имеют повышенную склонность к сегрегации, а технологические приемы, оправдывающие себя на слитках стали типа 25ХЗНМФА, не «работают» для новых сплавов. Просим читателей обратить внимание еще на один способ получения высококачественных крупных слитков, созданный в ИЭС им. Е.О. Патона проф. Ю. В. Латашем и его учениками — способ порционной электрошлаковой отливки тяжелых слитков.*