

ИНДУКЦИОННАЯ БЕСТИГЕЛЬНАЯ ПЛАВКА ТИТАНА

В.Б. Демидович, докт. техн. наук

(Санкт Петербургский электротехнический университет, vbdemidovich@mail.ru),

И.И. Растворова, канд. техн. наук

(Национальный минерально сырьевой университет «Горный», rastvorova@mail.ru),

М.Ю. Хацаюк, канд. техн. наук

(ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», [e mailmaxhas@ya.ru](mailto:mailmaxhas@ya.ru))

Предложен способ получения расплава титана внутри самого слитка индукционным методом. Проведены численное моделирование и экспериментальные исследования на макете. Моделируются электромагнитное, температурное и магнетогидродинамическое поля. Определены принципы выбора частоты тока и режимов нагрева и плавки.

Ключевые слова: индукционный нагрев, численное моделирование, расплав титана, бестигельная плавка, электромагнитное поле, температурное поле, поле скоростей в жидком металле.

Induction Crucibleless Melting of Titanium. V.B. Demidovich, I.I. Rastvorova, M.Yu. Khatsayuk.

A process for producing molten titanium inside of an ingot by the induction method is proposed. Numerical simulation and experimental study were carried out on the layout. Electromagnetic, thermal and magneto hydrodynamic fields were simulated. The principles of choice of current frequency and heating and melting modes were defined.

Key words: induction heating, numerical modeling, molten titanium, crucibleless melting, electromagnetic field, temperature field, the velocity field in the liquid metal.

Одним из наиболее перспективных материалов в металлургической промышленности является титан и сплавы на его основе. Однако из-за трудностей их конечной механической обработки многие детали из титана, особенно небольшого размера, удобнее изготавливать методом прецизионного литья и сводить механическую обработку к минимуму.

Работу с данными материалами усложняют не только механические свойства титана и его сплавов. В жидком состоянии они имеют чрезвычайно высокую химическую активность. Титан реагирует с кислородом, азотом, водородом, вступает во взаимодействие с различными оксидами, образующими огнеупорные материалы, и восстанавливает их [1]. Поэтому плавку титана осуществляют в вакуумных камерах. Кроме того, расплав титана растворяет углерод графитового тигля, что приводит к резкому снижению пластичности сплавов, по

этому титан нельзя плавить в печах, футерованных обычными огнеупорами. Все вышесказанное ведет к значительному удорожанию технологии литья титана и его сплавов.

Наиболее распространена дуговая плавка с расходуемым электродом, схема которого представлена на рис. 1. В вакуумную камеру 3 помещают медный водоохлаждаемый тигель 6, расходуемый электрод 2 и литейные формы 5. Расходуемый электрод представляет собой шихтовой слиток титана или прутки, спрессованный из титанового порошка.

После вакуумирования печи зажигают электрическую дугу между электродом и дном тигля и прогревают тигель и электрод на малой мощности. При повышении мощности до рабочих значений происходит плавление расходуемого электрода, расплавленный металл постепенно заполняет тигель. По мере оплавления расходуемого электрода он автоматически

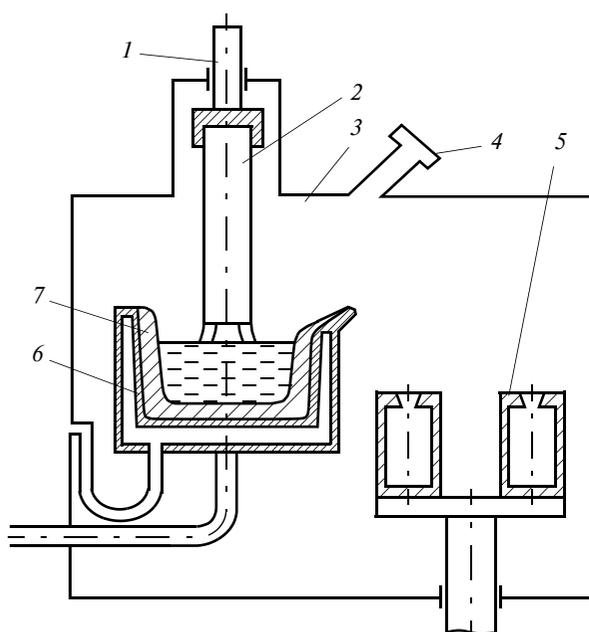


Рис. 1. Схема вакуумной дуговой печи [2]

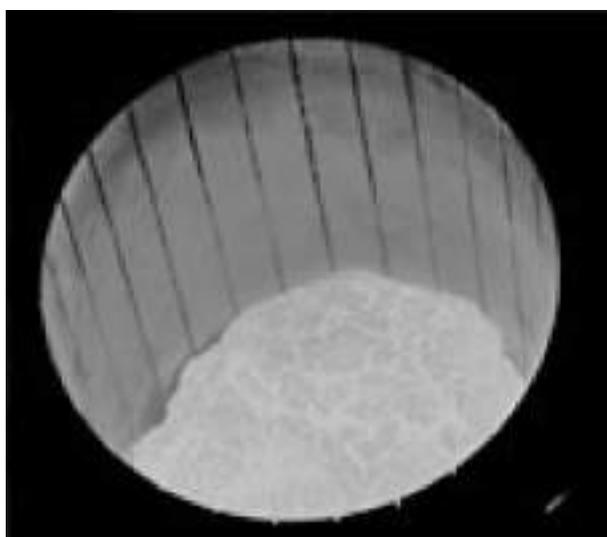


Рис. 2. Медный водоохлаждаемый «холодный» тигель [3]

опускается вниз электрододержателем 1. В связи с высокой теплопроводностью медного водоохлаждаемого тигля на его стенках образуется слой затвердевшего расплава толщиной 10–15 мм, который является своего рода футеровкой и называется гарнисажем 7. Смотровое окно 4 предназначено для визуального контроля и наблюдения за процессом.

Толщина слоя гарнисажа зависит от соотношения мощности, выделяемой дугой, и коли

чества теплоты, отводимого от расплава через гарнисаж и тигель охлаждающей водой. При недостаточной мощности увеличивается толщина гарнисажа, и объем расплавленного металла уменьшается. Чрезмерная мощность дуги может привести к локальному расплавлению гарнисажа и медного тигля.

Индукционная вакуумная плавка и разливка в медном водоохлаждаемом тигле является также распространенным техническим решением данной проблемы [3]. Данный процесс возможен вследствие того, что в медном тигле, изготавливаемом из нескольких водоохлаждаемых медных сегментов (рис. 2), загрязнение загрузочного материала сведено к минимуму, а электромагнитное перемешивание расплава приводит к его химической и термической гомогенизации. Правильный выбор частоты тока, режим нагрева, оптимальный выбор конструкции сегментов позволяют существенно снизить электрические потери и добиться приемлемого полного КПД.

Компания ALD представляет на рынке индукционные установки LEICOMELT® с объемом расплава от нескольких кубических сантиметров до 30 л (рис. 3). В данных установках используются системы разливки наклоном тигля и донного слива, а диапазон технологий разливки завершают формы для неподвижного и центробежного литья или постоянные формы из специальных сплавов, например титановых. Поскольку по своему принципу установки LEICOMELT® являются индукционными, они могут загружаться ломом, отходами и губкой вместо дорогих слитков круглого сечения.

Установки для литья титана и его сплавов позволяют проводить отливку деталей весом от 40 г до 2 кг и размером от 1 до 300 мм. Однако можно с уверенностью сказать, что все технологии как отечественные, так и зарубежные, объединяет одно условие – процесс должен проходить в вакууме или в защитной атмосфере и характеризуется низкой производительностью и маленьким общим КПД.

Значительно упростить необходимое оборудование и повысить энергоэффективность можно, получая расплав титана внутри цилиндрического слитка индукционным методом. С помощью такой технологии можно получать расплав титана в обычной атмосфере без ис

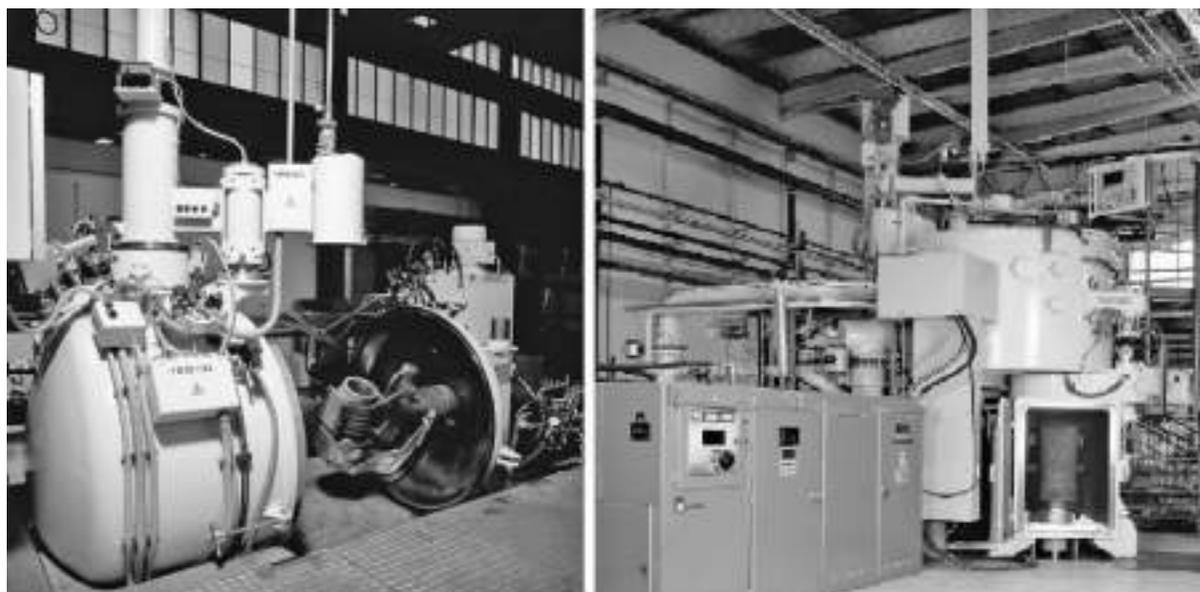


Рис. 3. Установки LEICOMELT® для вакуумной индукционной плавки [3]

пользования вакуумной системы, что в конечном итоге, безусловно, снизит энергозатраты при производстве и стоимость процесса в целом. В данном случае поверхность титановой заготовки будет служить защитным слоем гарнисажа и защитит расплав от примесей, не позволив ему реагировать с окружающей атмосферой. Сложность реализации процесса заключается в обеспечении режима нагрева, при котором поверхность заготовки обеспечивает достаточную прочность, в то время как внутри слитка находится расплав титана.

Вследствие скин эффекта при индукционном нагреве тепловые источники распределены по сечению заготовки неравномерно: максимальное тепловыделение происходит на поверхности, с увеличением расстояния от поверхности интенсивность источников теплоты падает. Соответственно, поверхностные слои имеют более высокую температуру, чем середина, причем эта разность температур тем больше, чем больше мощность, на которой осуществляется нагрев, и чем выше частота тока.

По мере разогрева заготовки происходит рост тепловых потерь в окружающую среду. Отвод теплоты с внешней поверхности качественно отражается на характере температурного поля: вследствие охлаждения поверхности в глубине заготовки образуется зона, имеющая более высокую температуру, чем поверхность [4].

Это явление имеет место при индукционном нагреве всех металлов, однако для титановых сплавов оно сильно проявляется из-за низкой теплопроводности и высокого уровня тепловых потерь. Перегрев внутренних слоев металла может привести в конечном счете к расплавлению внутренних слоев. В данном случае поверхность титановой заготовки будет служить защитным слоем гарнисажа и защитит расплав от примесей, не позволив ему реагировать со средой. Следовательно, для титана возможно путем правильного выбора частоты тока, мощности и режима нагрева добиться получения расплава внутри слитка.

Процесс нагрева происходит до наступления теплового баланса мощности, поступающей в заготовку, и тепловых потерь с поверхности. Такой режим нагрева позволяет добиться максимума температур в центре слитка, частота при этом остается неизменной.

Описанная технология выглядит конкурентоспособной и энергоэффективной по отношению к существующей технологии плавки в холодном тигле ввиду того, что в процессе не используется дополнительное оборудование для создания вакуума, а сам процесс плавления титана внутри слитка индукционным способом требует значительно меньшего времени и энергозатрат [5].

Исследования проводили как на численных моделях, так и на экспериментальных макетах.

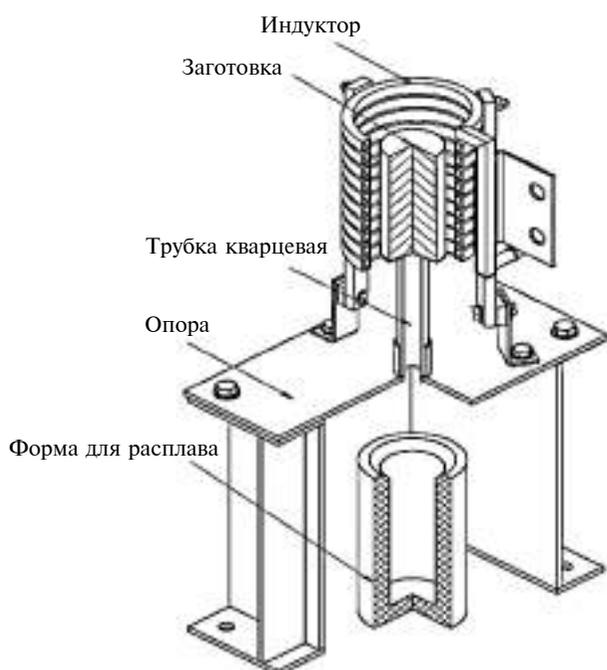


Рис. 4. 3D модель электромагнитной системы нагрева и плавки цилиндрических заготовок

Численная модель, основанная на расчете двумерного электромагнитного поля и температурного поля без учета магнитогидродинамических эффектов, показала, что при оптимальном выборе частоты и режима нагрева и плавки максимально возможный объем расплава, полученный при нагреве титанового цилиндрического слитка, составляет 75–76 % [6–9].

Численное моделирование показало возможность реализации предложенной технологии, после чего полученные результаты были перенесены на экспериментальные исследования, проводимые на макете (рис. 4, 5).

Эксперимент проходил при следующих параметрах установки:

- частота преобразователя 4000 Гц;
- ток индуктора ~ 1000–1100 А;
- напряжение индуктора 60–70 В;
- время нагрева и плавки ~ 720 с (до момента проплавления нижнего торца заготовки).

Заготовка представляла собой цилиндр диаметром 60 мм, высотой 100 мм из сплава ВТ6 (рис. 6).

В ходе эксперимента получили подтверждение численных результатов моделирования электрических параметров индукционного нагрева и плавки цилиндра от комнатной температуры до слива жидкой фазы титана. Однако обнаружили, что вместо 75 % жидкой фазы по численной модели, жидкий металл от массы цилиндра может достигать 95 %.

Физическое объяснение этого явления связано с необходимостью учета магнитогидродинамических процессов внутри цилиндра, когда возникает жидкая фаза титана.

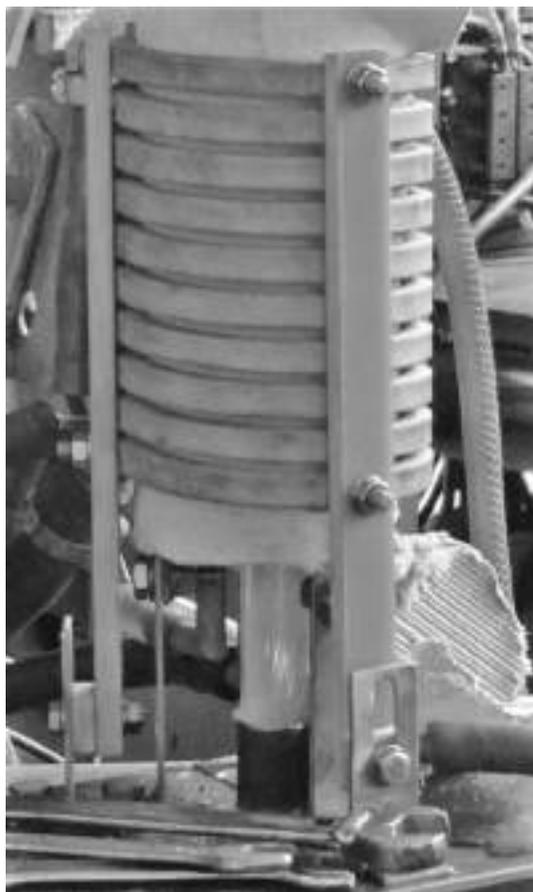


Рис. 5. Макет индукционной системы



Рис. 6. Результат эксперимента. Остатки заготовки из ВТ6 диаметром 60 мм и высотой 100 мм. Стенка гарнисажа ~1,5 мм

ЛИТЬЕ, КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ, ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, наглядно показали, что в ходе данного технологического процесса происходит сильное «размывание» металла внутри заготовки за счет движения жидкого металла под воздействием электромагнитных сил.

Эксперимент на высокой частоте тока (50 кГц) подтвердил эту гипотезу. Электромагнитное поле на этой частоте из-за сильно выраженного скин-эффекта практически не проникает внутрь цилиндра и не может влиять на движение жидкого металла и образование жидкой фазы титана.

Уточненная математическая модель с моделированием магнитогидродинамических процессов внутри цилиндра позволяет обоснованно выбрать частоту и режим нагрева и плавки.

Течение металла внутри заготовки описывается уравнением Навье – Стокса, которое основано на законе сохранения импульса и для несжимаемой жидкости может быть записано в следующей форме [10–12]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i, \quad i = 1, 2, 3,$$

- где u_i – скорость жидкости;
- ρ – плотность жидкости;
- $\nu = \mu/\rho$ – кинематическая вязкость, p – давление, f_i – представляет собой вязкость внешней объемной силы, действующей на жидкость.

В приведенной выше и следующих формулах индексы могут принимать значение 1, 2 и 3, обозначая направления x , y и z .

В процессе плавления основными объемными силами, действующими на металл, являются сила гравитации и сила электромагнитного поля.

Закон сохранения массы принимает для несжимаемой жидкости вид уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0.$$

Если плотность жидкости не является постоянной, то для замыкания системы используется уравнение: $\rho = \rho(T, p)$.

Для несжимаемой жидкости $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$. Это

условие удовлетворяет для потока металла в индукционной системе «расплав – твердая заготовка», так как скорости потока много меньше скорости звука в данной среде. В связи с тем, что жидкость несжимаема, в модели отсутствует учет плавучести. Если градиенты температур в жидкой среде невелики (несколько градусов), флуктуации плотности ρ' будут крайне малы: $\rho' \ll \rho$. Таким образом, уравнение состояния среды может принять не зависящую от давления форму: $\rho = \rho_0(1 - \alpha \Delta T)$, где ρ_0 – значение средней плотности, $\alpha = -\rho^{-1}(\partial \rho / \partial T)_p$ – коэффициент термического расширения, ΔT – разница температур.

С другой стороны, конвективному течению в металле способствует электромагнитное поле. Сила электромагнитного поля может быть представлена как:

$$f_{EM} = 0,5 \text{Re}(jB),$$

- где j – плотность тока в индукторе;
- B – интенсивность магнитного поля.

В математической модели, использованной для исследования, в связи со значительными временными затратами на каждый численный эксперимент с целью упрощения влияние гравитации на движение металла не учитывалось.

Таким образом, уравнение Навье – Стокса может быть переписано в безразмерном виде, включающее число Рейнольдса Re , которое определяет отношение сил инерции к силам вязкости:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j \partial \tilde{x}_j} + \tilde{f}_i,$$

где число Рейнольдса определяется как:

$$Re = \frac{UL\rho}{\mu} = \frac{UL}{\nu}.$$

В работе в качестве характерного размера L был принят диаметр заготовки, под значением скорости U понимается средняя скорость потока самых больших вихрей в потоке, ν – динамическая вязкость расплава. Под характерным временем принят период обращения вихрей. В процессе моделирования для упрощения

ЛИТЬЕ, КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ, ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

расчетов также не были включены уравнения, учитывающие перенос массы.

Для учета влияния процессов, протекающих при плавлении и затвердевании, термогидродинамическая модель дополняется моделью кристаллизации и плавления, основанной на методе «энтальпия–пористость». В уравнение движения добавляется дополнительный источник член:

$$\frac{(1-\beta)^2}{\beta^3 + \xi} A |\tilde{u}_i|,$$

где β – доля жидкой фазы;

$\xi = 0,001$ – число, предотвращающее деление на 0;

A – постоянная двухфазной зоны, выражающая быстроту перехода скорости к нулю при затвердевании.

Существует несколько подходов к моделированию турбулентности. Широко известен метод с осреднением уравнений Навье – Стокса по Рейнольдсу (Reynolds Averaged Navier–

Stokes – RANS) при замыкании реинольдсовских напряжений полуэмпирическими моделями турбулентности, например $k-\epsilon$ моделью. Преимуществом RANS являются пониженные требования к вычислительной мощности компьютера, к ограничениям относится существенное упрощение пульсационной структуры течения. Именно данный метод был использован на данном этапе исследований гидродинамической задачи в качестве альтернативы прямого решения трехмерных нестационарных уравнений Навье – Стокса. Значения всех необходимых параметров для расчета магнитогидродинамической задачи извлекаются в ходе решения электромагнитной задачи. Совместное решение осредненных уравнений Навье–Стокса, уравнения теплопроводности и уравнения состояния с помощью методов численного моделирования RANS позволяет увидеть форму ванны расплава в процессе плавления внутренних слоев слитка и получить результат распределения вектора скоростей в расплаве (рис. 7).

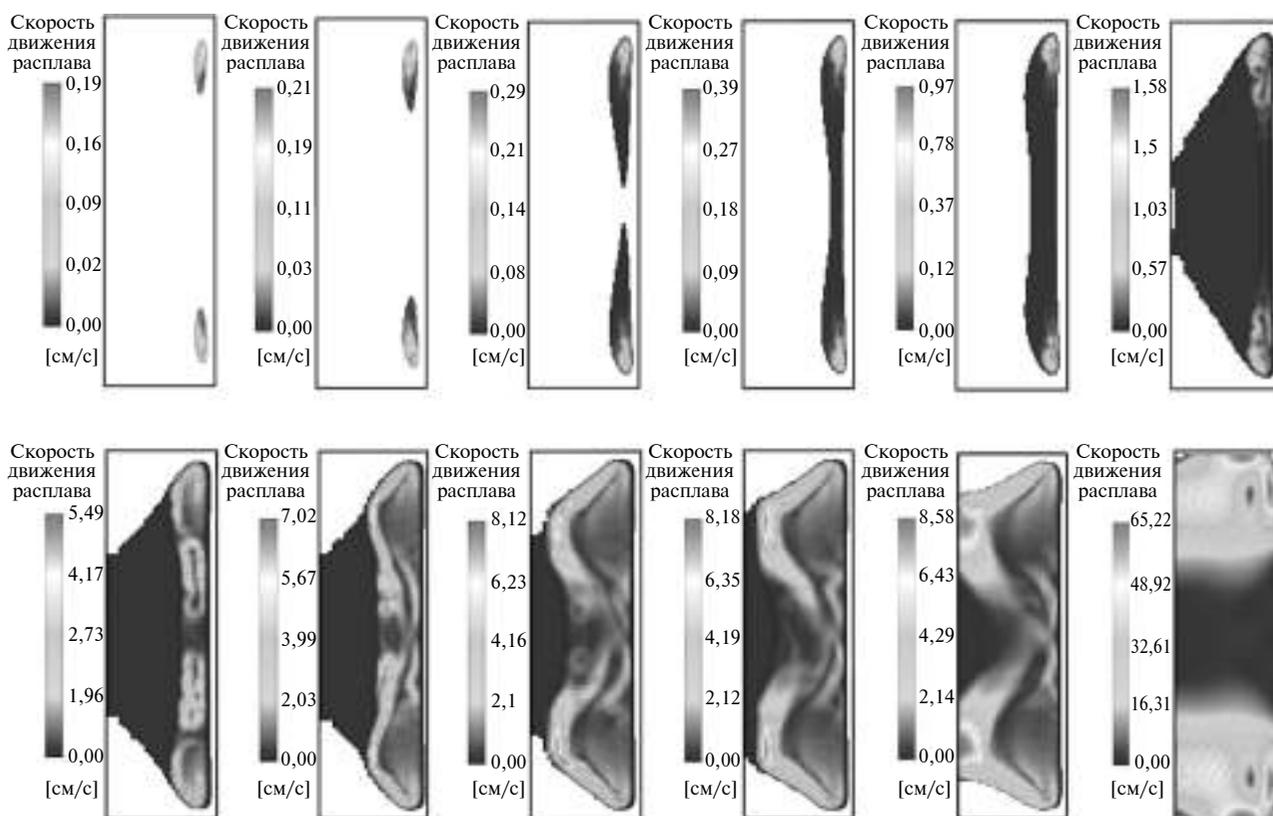


Рис. 7. Распределение средних скоростей в расплаве титана в разные моменты времени: с момента образования расплава (слева сверху) и до момента наступления термодинамического равновесия в системе (справа снизу)

Заключение

Теоретические и экспериментальные исследования показали возможность получения индукционным способом жидкой фазы титановых сплавов внутри цилиндрических слитков. Разработаны модели и оп

ределены условия достижения этих результатов*.

* Публикация подготовлена в рамках государственной работы «Организация проведения научных исследований» базовой части государственного задания Минобрнауки России (задание № 2014/187).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С.** Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. – М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Ресурсы интернет сайта <http://www.trastcomp.ru>
3. Ресурсы официального интернет сайта компании ALD http://www.ald_vt.ru
4. **Демидович В.Б., Комракова Г.Д., Стефанов Б.В.** Сравнение индукционного нагрева крупногабаритных титановых заготовок на промышленной и низкой частотах / Технология легких сплавов. 1992. № 11–12. С. 46–48.
5. Полезная модель РФ 136666. Индукционная установка для плавки титановых сплавов // Изобретения. Полезные модели. 10.01.2014. № 1.
6. **Демидович В.Б., Масликов П.А., Баранов Д.А., Ковинька А.А.** Технологии электромагнитного получения литых изделий из титана и титановых сплавов // Индукционный нагрев. 2012. № 2 (20). С. 14–18.
7. **Demidovich V., Maslikov P., Olenin V.** Innovative induction heating technologies of processing titanium alloys // Proceedings of the XVII UIE Congress. 21–25 May, 2012. St. Petersburg. P. 390–393.
8. **Демидович В.Б., Масликов П.А., Григорьев Е.А., Оленин В.А.** Инновационные технологии обработки титановых сплавов с применением индукционного нагрева // Индукционный нагрев. 2012. № 3 (21). С. 26–28.
9. **Demidovich V., Rastvorova I.** Induction Heating in the Processing of Ti & Zr // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. 2014. № 6. P. 404–441.
10. **Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л.** Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: уч. пособие. – Санкт-Петербургский политехнический университет. – 2012. – 88 с.
11. **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М., 1984. – 124 с.
12. **Недопекин Ф.В., Белоусов В.В.** Моделирование гидродинамических и теплообменных процессов в металлургических технологиях // Вестник удмуртского университета. 2008. Вып. 1. С. 189–199.