

На правах рукописи

Масликов Павел Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ТИТАНОВЫХ
СПЛАВОВ ВНУТРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ
НАГРЕВЕ

Специальность: 05.09.10– Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) в межотраслевой лаборатории «Современные Электротехнологии».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Демидович Виктор Болеславович Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" имени В.И. Ульянова (Ленина), профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники

Официальные оппоненты: Фролов Владимир Яковлевич доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, заведующий кафедрой электротехники и электротехнологии

Тихомиров Илья Сергеевич кандидат технических наук, ООО «Интерм», начальник производства

Ведущая организация: Федеральное Государственное Унитарное Предприятие Всероссийский Научно - Исследовательский Институт Токов Высокой Частоты ВНИИТВЧ

Защита состоится " ____ " _____ 2014 г. в ____ часов ____ минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан " ____ " _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.05

М. П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Анализ международных тенденций и прогнозов в области применения металлических сплавов до 2020 года показывает, что титановые сплавы являются перспективными материалами мирового машиностроения широкого назначения. В международной научной среде идет постоянная работа по поиску новых идей применения титановых сплавов в различных отраслях промышленности, и, прежде всего, акцент ставят на областях, где важна качественная составляющая конечного изделия, а не коммерческая: космонавтика, авиатехника, военная промышленность и медицина.

Основные свойства титана и его сплавов, представляющие основную ценность для машиностроения – механическая и удельная прочности, сохраняющиеся при высоких температурах; малая плотность, ведущая к снижению массы конечного изделия – являются одновременно минусами для ценовой характеристики процесса обработки титановых сплавов и конечного изделия в целом. Исходя из вышесказанного, одна из основных проблем расширения использования титана – это сложность его механической обработки. Для обеспечения требуемых физико-механических свойств деталей из титановых сплавов и сведения механической обработки к минимуму повышаются требования к термообработке титановых заготовок. В настоящее время индукционный нагрев – это один из вариантов технологии термической обработки этого специфического металла с целью обеспечения необходимых теплофизических свойств.

Однако не только механические свойства титана и его сплавов усложняют работу с данными материалами. Титан и его сплавы в жидком состоянии имеют чрезвычайно высокую химическую активность: титан реагирует с кислородом, азотом, водородом, вступает во взаимодействие с различными оксидами, образующими огнеупорные материалы, и восстанавливает их. Кроме того, расплав титана растворяет углерод графитового тигля, что приводит к резкому снижению пластичности сплавов, поэтому титан нельзя плавить в печах, футерованных обычными огнеупорами.

На сегодняшний день единственным техническим решением для изготовления литых изделий из титановых сплавов весом до 5 кг является вакуумная плавка и разливка в медном водоохлаждаемом тигле. Все технологии, как отечественные, так и зарубежные объединяет одно условие – устранение контакта жидкого металла с окружающей средой за счет создания вакуума или защитной атмосферы, где и происходит процесс литья.

Следующим шагом в использовании титана и его сплавов является разработка технологии, обеспечивающей получение расплава титана на воздухе при нормальном давлении, что значительно удешевит процесс производства литых титановых изделий небольшой массы и расширит сферу использования титана и его сплавов. В ходе исследований предложен способ получения расплава титана внутри слитка индукционным способом, не прибегая к дополнительному оборудованию для создания вакуума, что значительно сокращает время процесса, и в конечном итоге снизит энергозатраты при производстве, уменьшит цену процесса и конечного изделия в целом.

В связи с вышесказанным **целью работы является** исследование, моделирование и разработка инновационной технологии получения жидкой фазы титановых сплавов внутри цилиндрических заготовок на воздухе и при нормальном давлении при индукционном нагреве.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Анализ состояния и перспективы развития производства литых изделий из титановых сплавов;
2. Разработка математической модели расчета сопряженных электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов для получения жидкой фазы металла внутри цилиндрических немагнитных тел;
3. Разработка в программных пакетах ANSYS и UNIVERSAL 2D численных моделей системы электромагнитной обработки титановых сплавов, на которых исследован процесс образования расплава внутри слитка;
4. Экспериментальные исследования процесса получения жидкой фазы титановых сплавов с помощью индукционной плавильной установки;
5. Исследование режимов работы индукционной установки и экспериментальная верификация разработанных численных моделей;
6. Составление рекомендаций для реализации процесса получения жидкой фазы титановых сплавов при индукционной плавке.

Методы исследования. Исследования электромагнитных, температурных полей и интегральных параметров индукционных систем проводились методами математической физики и вычислительной математики. Достоверность научных положений, представленных в диссертационной работе, подтверждается результатами моделирования с использованием апробированных программных средств и экспериментальными данными, полученными в результате верификации модели индукционного нагревателя.

Научная новизна и значимость работы состоит в следующем:

1. Разработаны численные модели расчета сопряженных электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов для получения жидкой фазы титановых сплавов при индукционной плавке цилиндрических заготовок;
2. На моделях исследовано влияние частоты тока и режима плавки на процесс получения жидкой фазы титановых сплавов внутри цилиндрических тел при индукционном нагреве;
3. Установлены закономерности получения жидкой фазы титановых сплавов внутри цилиндрических заготовок при индукционной плавке;
4. Экспериментально исследовано получение жидкой фазы титановых сплавов внутри цилиндрических заготовок индукционным методом на воздухе и при нормальном давлении.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Реализованы в виде программ численные модели, позволяющие выполнить расчет различных параметров индукционной системы и характеристик процесса получения расплава внутри титанового слитка цилиндрической формы.

2. Разработан экспериментальный макет индукционной установки для получения жидкой фазы титановых сплавов внутри цилиндрических заготовок при индукционном нагреве.

3. Даны рекомендации по выбору частоты тока и режимов нагрева с целью получению расплава внутри титановой заготовки индукционным способом.

4. По результатам научных исследований получен патент РФ на полезную модель №136666 «Индукционная установка для плавки титановых сплавов».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Условия получения жидкой фазы титановых сплавов внутри цилиндрических тел индукционным способом;

2. Численные модели электромагнитной обработки титановых сплавов в программных пакетах ANSYS, UNIVERSAL 2D и FLUENT для получения жидкой фазы титановых сплавов внутри цилиндрических заготовок индукционным методом;

3. Исследование предложенного процесса получения расплава внутри титановой заготовки на основе разработанных численных моделей;

4. Экспериментальные исследования образования расплава внутри титановых слитков разных высоты и диаметра на воздухе при нормальном давлении.

Внедрение результатов. Научные и практические результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы при проектировании установок, использующихся для получения литых изделий из титановых сплавов весом до 5кг, а также при обучении студентов ВУЗов.

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах и конференциях кафедры ЭТПТ и МОЛ СЭТ СПбГЭТУ (2010 – 2013), на международном молодежном форуме «Энергоэффективные электротехнологии» (Санкт-Петербург, 2011), на 27-ом международном конгрессе UIE-2012 (Санкт-Петербург, 2012), на международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты МКЭЭЭ-2012» (Алушта, 2012), на научных коллоквиумах в Институте Электротехнологии Университета Ганновера (Ганновер, Германия, 2012 и 2013), на международном симпозиуме «HES-13 International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources» (Падуя, Италия, 2013).

Диссертационная работа написана в рамках выполнения ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы, госконтракты ГК 14.740.11.0951 и ГК 14.740.11.0824.

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 17 работах, среди которых 6 работ в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых в действующем перечне ВАК, 3 – материалах всероссийских конференций и форумов, 6 работ – в материалах международных конференций и форумов и 2 – в иностранных издательствах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 53 наименования. Работа изложена на 147 листах машинописного текста и содержит 120 рисунков и 36 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель ее проведения, излагаются основные концепции, лежащие в основе работы и определяющие ее структуру и методы исследования.

Первая глава посвящена обзору технологий получения литых изделий из титана и титановых сплавов. Целью исследований являлось выявление состояния уровня техники в области разработок нагревательных систем, обеспечивающих достижение жидкого состояния заготовок из титана и его сплавов для последующего литья и использования изделий в различных областях машиностроения и металлургии. Выполнен анализ работ, в результате которого выявлены основные недостатки существующих технологий, и показана перспективность технологии с применением индукционного нагрева без использования защитной атмосферы или вакуума.

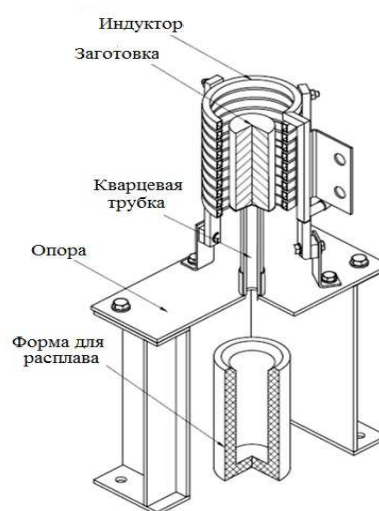


Рисунок 1 – Общий вид оборудования для плавки титана при отказе от вакуумной камеры (слева) и 3D-модель индукционной установки для бестигельной плавки титановых сплавов (справа).

Характер изменения температурного поля по сечению заготовки в процессе индукционного нагрева и получения расплава внутри слитка иллюстрирует рисунок 2.

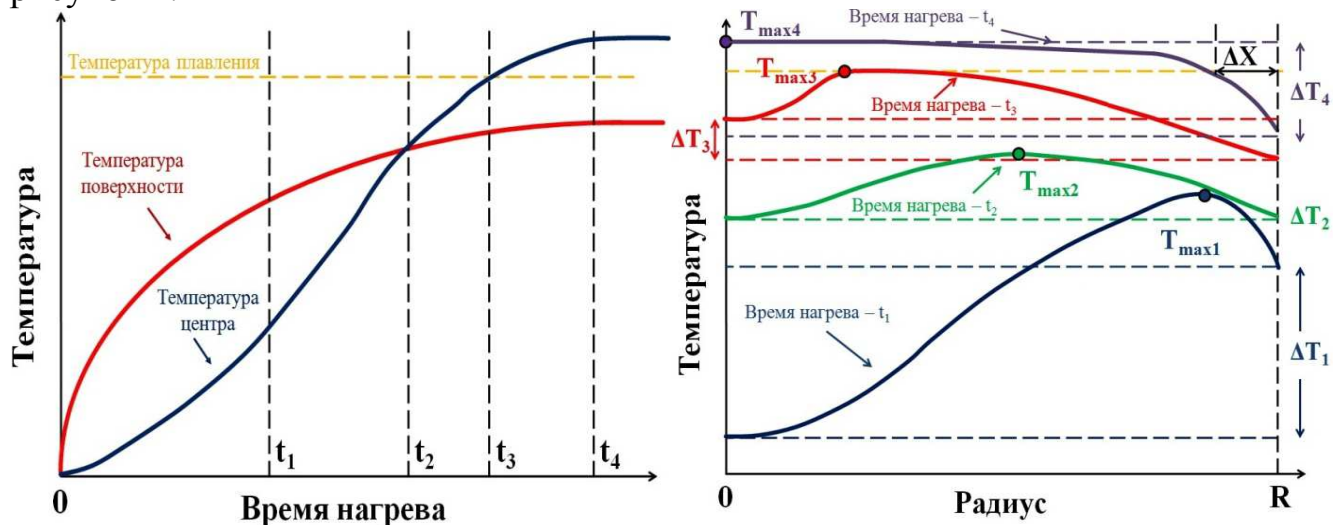


Рисунок 2 – Характер распределения температурного поля по радиусу заготовки в процессе индукционного нагрева в различные моменты времени.

До момента времени t_1 происходит интенсивный нагрев поверхности заготовки при постоянном значении подаваемой мощности, вследствие чего температура поверхности значительно превышает температуру центра $T_n > T_c$. Далее значение мощности снижается, и температурный перепад между поверхностью и центром выравнивается. В момент времени t_2 температуры на поверхности и в центре равны $T_n = T_c$ и соответственно $\Delta T_2 = 0$. Из-за тепловых потерь с поверхности заготовки максимум температуры находится на некоторой глубине от поверхности. При достижении температуры поверхности уровня $1400^\circ\text{C} - 1450^\circ\text{C}$ и уменьшении мощности за счет излучения и конвекции максимум температур постепенно переходит в центр заготовки. Это явление имеет место при индукционном нагреве всех металлов, однако для титановых сплавов оно проявляется сильнее из-за низкой теплопроводности и высокой температуры плавления. Перегрев внутренних слоев металла приводит к их расплавлению в момент времени t_3 . Процесс плавления происходит до наступления термодинамического равновесия между энергией, поступающей в заготовку, и тепловыми потерями с её поверхности, когда внутри заготовки образуется зона расплава, отделенная от внешней среды слоем защитного гарнисажа ΔX (момент времени t_4).

Во второй главе рассмотрены принципы построения электротепловых моделей, которые учитывают взаимное влияние электромагнитных и температурных полей. Расчет электромагнитных и тепловых полей, позволяющий обеспечить адекватность разрабатываемых моделей реальным процессам нагрева заготовок, осуществляется различными методами, в частности МИУ, МКР или МКЭ, или их комбинацией, но алгоритм расчета электротепловых процессов одинаков (рисунок 3).

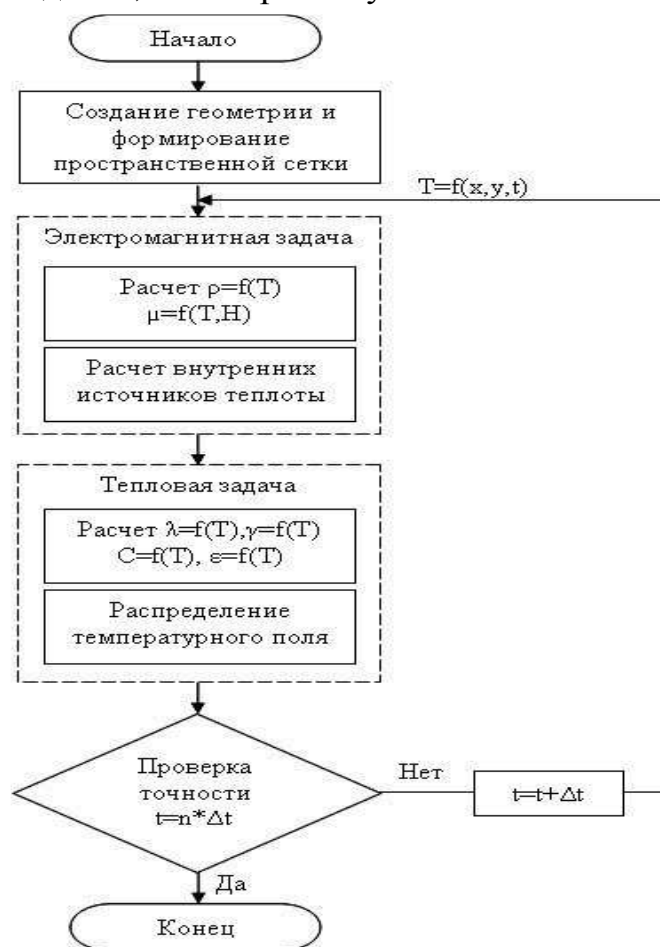


Рисунок 3 – Алгоритм совместного решения электромагнитной и тепловой задач при индукционном нагреве.

температурных полей. Расчет электромагнитных и тепловых полей, позволяющий обеспечить адекватность разрабатываемых моделей реальным процессам нагрева заготовок, осуществляется различными методами, в частности МИУ, МКР или МКЭ, или их комбинацией, но алгоритм расчета электротепловых процессов одинаков (рисунок 3).

На первом этапе производится первичная обработка исходных данных, в том числе формирование пространственной сетки тепловой задачи, аппроксимация таблично заданных тепло- и электрофизических свойств, зависящих от температуры, установление эквивалентных граничных условий для тепловой задачи, разбиение загрузки на элементы для электрической задачи. Затем производится расчет электрических параметров системы и распределения источников теплоты.

После решения электрической задачи происходит формирование массива внутренних источников теплоты в узлах пространственной сетки загрузки. Одновременно задаются граничные условия для тепловой задачи, причем на торцах и поверхности заготовки условия теплообмена могут быть заданы разными. В дальнейшем производится расчет температурного поля в заготовке, как с внутренними источниками теплоты, так и без них. После чего полученные данные обрабатываются, и процесс расчета либо повторяет цикл, либо завершается.

В третьей главе на основе разработанных численных моделей исследовано влияние частоты тока и режима нагрева на процесс получения жидкой фазы титановых сплавов при индукционном нагреве цилиндрических тел. На первом этапе исследований в программном пакете ANSYS была рассмотрена простейшая одномерная модель процесса индукционного нагрева заготовки из титанового сплава ВТ6 диаметром 60мм, которая позволила наглядно продемонстрировать образование защитного слоя гарнисажа и построить семейство графиков распределения температуры по радиусу в любой момент времени (рисунки 4-6).

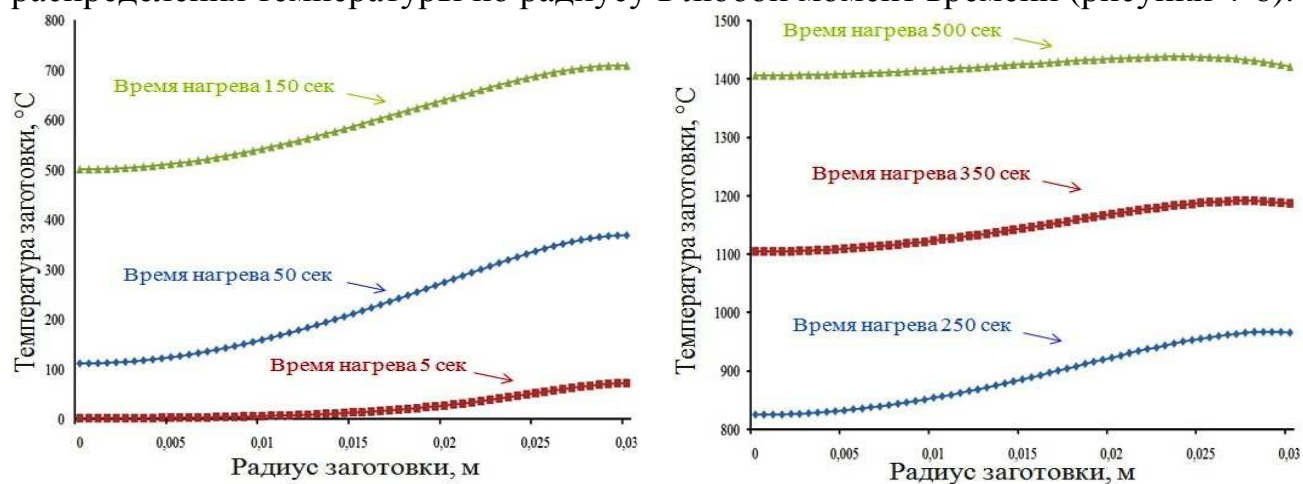


Рисунок 4 – Распределение температуры по радиусу заготовки на первом этапе нагрева в разные моменты времени.

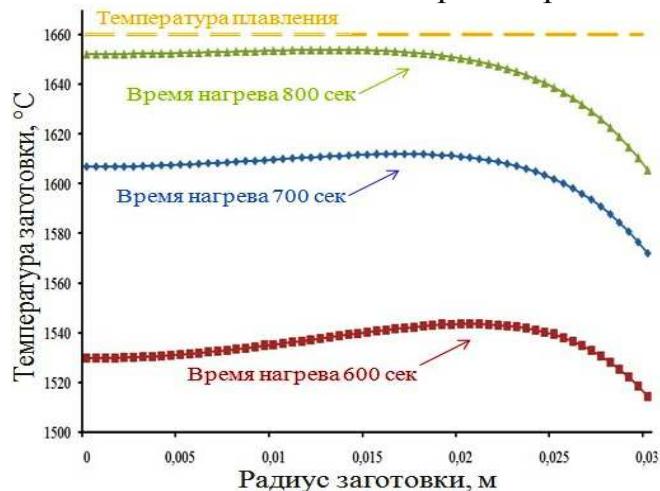


Рисунок 5 – Постепенное смещение максимума температуры с поверхности к внутренним слоям заготовки в разные моменты времени.

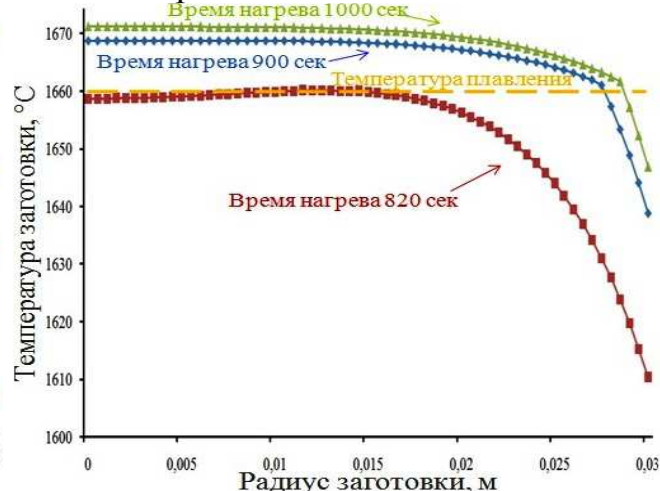


Рисунок 6 – Распределение температуры с момента появления расплава до наступления термодинамического равновесия.

Главной целью данного моделирования является определение потенциальной возможности реализации технологии плавки внутри слитка. Длина как заготовки, так и индуктора не играет роли ввиду использования на начальном этапе исследований только одномерного моделирования. Нагрев осуществлялся на частоте, оптимальной для заготовки, исходя из обеспечения приемлемого электрического КПД и максимальной глубины проникновения токов в материал.

Второй этап включал в себя более подробные исследования на 2D моделях в программах ANSYS и UNIVERSAL. Исследования проводились в диапазоне частот от 1кГц до 100 кГц (рисунок 7). Для подтверждения результатов, полученных при численном моделировании в ANSYS, были проведены расчеты в программном пакете UNIVERSAL 2D, что позволило путем перекрестных расчетов подтвердить достоверность результатов (таблица 1). Расчеты проводились до наступления термодинамического равновесия между энергией, поступающей в заготовку, и тепловыми потерями с её поверхности, когда внутри заготовки образуется зона расплава, отделенная от внешней среды слоем защитного гарнисажа (рисунок 8).

Таблица 1.

Частота, Гц	Активная мощность загрузки, Вт		Активная мощность индуктора, Вт		Напряжение индуктора, В		Объём расплава в % от общей массы слитка	
	ANSYS	UNI 2D	ANSYS	UNI 2D	ANSYS	UNI 2D	ANSYS	UNI 2D
1000	6770	7321	19054	16200	66	70	60	65
4000	7383	7658	11602	11500	116	119	75	70
10000	7714	7789	11542	11450	209	213	72	60
15000	7597	7880	11296	11100	271	277	67	52
25000	7656	7930	11285	11080	383	388	52	50
35000	7569	7870	11117	11040	481	492	15	10
44000	7459	7720	10949	11000	560	574	4	3
66000	7219	7440	10626	10820	840	856	2	2
100000	7051	7120	10389	10500	974	980	1	1

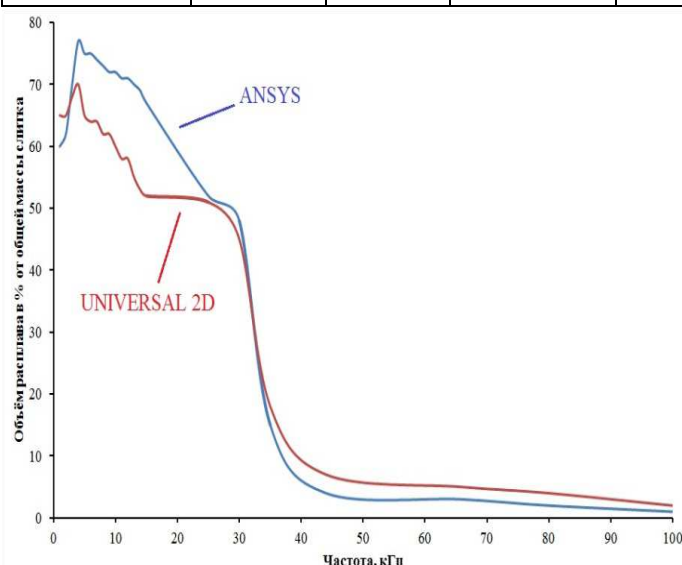


Рисунок 7 – Количество расплава в % от общей массы слитка в зависимости от частоты тока.

Расхождение результатов в двух программных пакетах составляет около 5-7% при расчете напряжений, мощностей и КПД. Нагрев на частоте 4 кГц позволяет получить максимальное количество расплава (около 75% от общей массы) внутри титановой заготовки без значительного перегрева торцов, тогда как увеличение частоты до 30 кГц и выше ведет к резкому перегреву и проплавлению заготовки в торцевой зоне, нарушая технологический процесс. Вследствие «раннего» проплавления поверхности заготовки количество расплава значительно

снижается, при этом время процесса остается неизменным и колеблется в пределах 10-11 минут. Перегрев заготовки объясняется краевыми эффектами индуктора и детали, которые с увеличением частоты становятся ярко выраженными.

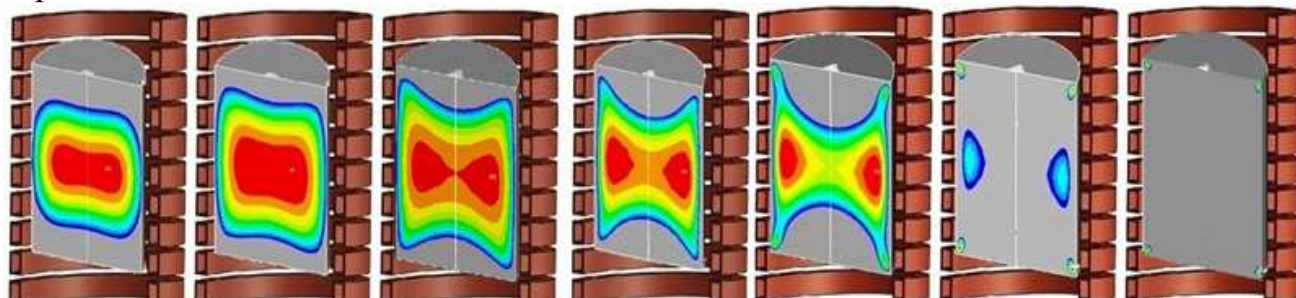


Рисунок 8 – Ванна расплава внутри слитка на частотах слева направо: 1кГц, 4кГц, 10кГц, 15 кГц, 25 кГц, 35 кГц, 44 кГц.

Дальнейшие исследования проводились в программном пакете ANSYS на частоте 4 кГц, и уже на заданной частоте осуществлялся подбор оптимального режима по мощности, напряжения и току (таблица 2). Лучший результат (максимальный объем расплава в % от общей массы слитка) достигается на частоте 4 кГц при токе индуктора 1270 А. Дальнейшее даже незначительное увеличение тока индуктора и мощности соответственно приводит к проплавлению поверхности заготовки. В то же время тока в 1160 А недостаточно для образования расплава внутри слитка (рисунок 9).

Таблица 2.

Активная мощность загрузки, Вт	Активная мощность индуктора, Вт	Время нагрева, с	Ток индуктора, А	Напряжение индуктора, В	Эл. КПД	Cos φ	Объем расплава в % от общей массы слитка
6159.62	9678.88	625	1160	106,2	0,636	0,0786	Расплава нет
6244.87	9812.85	625	1168	106,93	0,636	0,0786	Появление расплава
6266.27	9846.48	620	1170	107,11	0,636	0,0786	7
6427.98	10100.57	605	1185	108,48	0,636	0,0786	42
6591.74	10357.9	605	1200	109,86	0,636	0,0786	55
6813.3	10706.04	605	1220	111,69	0,636	0,0786	62
7145,75	11239,04	600	1250	114,44	0,636	0,0786	70
7383.21	11601.57	575	1270	116,27	0,636	0,0786	75 (лучший результат)
7499.94	11784.99	570	1280	117,18	0,636	0,0786	Проплавление поверхности

Исследования показывают, что максимально возможный объем расплава, полученный при нагреве титана, составляет 75-76%, но при этом с ростом частоты вследствие краевого эффекта идет сильный перегрев торцов, что недопустимо для технологического процесса.

Численное моделирование показало возможность реализации предложенной технологии, после чего полученные результаты были перенесены на экспериментальные исследования.

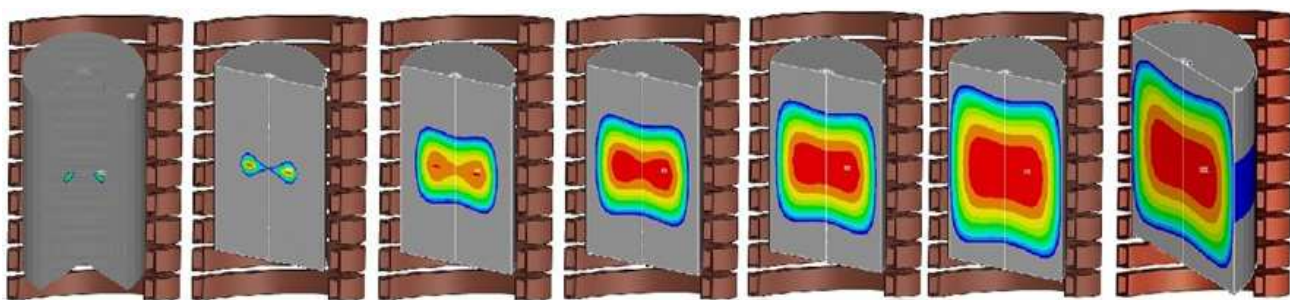


Рисунок 9 – Ванна расплава внутри слитка при токе индуктора слева направо: 1168А, 1170А, 1185А, 1200А, 1220А, 1270А и 1280А.

В четвертой главе производится экспериментальное исследование системы индукционного нагрева заготовок из титанового сплава ВТ6 с целью проверки на технологическую точность и адекватность реальному процессу нагрева разработанной в диссертации электротепловой двумерной модели.

После проведения численного моделирования, были разработаны лабораторные макеты для индукционного нагрева заготовок $\varnothing 20 \times 30 \text{ мм}$, $\varnothing 30 \times 35 \text{ мм}$ и $\varnothing 60 \times 100 \text{ мм}$, параметры которых представлены в таблице 3, которые позволили оценить степень соответствия данных, рассчитанных по модели и данных, полученных в результате проведения эксперимента.

Таблица 3.

	Макет №1		Макет №2	Макет №3
Размеры заготовки	$\varnothing 20 \times 30 \text{ мм}$	$\varnothing 30 \times 35 \text{ мм}$	$\varnothing 60 \times 100 \text{ мм}$	$\varnothing 60 \times 100 \text{ мм}$
Диаметр индуктора	60 мм		100 мм	100 мм
Высота индуктора	85 мм		190 мм	190 мм
Частота	7 кГц	7 кГц	4кГц	66кГц
Ток индуктора	~ 975 А	~ 910 А	~ 1050 А	~ 55 А
Время процесса	~ 235 сек	~ 245 сек	~700 сек	~ 2100 сек

Индуктор представляет собой многовитковую спиральную катушку из тонкостенной медной трубки с различными монтажными элементами, длина, диаметр, количество витков которой повторяют данные при численном моделировании. В индукторе по центру и коаксиально установлена кварцевая трубка, на верхний торец которой помещена титановая заготовка симметрично относительно обоих концов индуктора (рисунок 10).

Исходное значение мощности генератора, полученное по численной модели, корректировалось оператором в зависимости от температуры на поверхности заготовки. На конечном этапе нагрева наблюдалась стабилизация температуры и соответственно



Рисунок 10 – Макет экспериментальной установки для нагрева заготовок $\varnothing 60 \times 100 \text{ мм}$ на 4кГц

стабилизация электрических параметров. В ходе экспериментов на лабораторных макетах №1 и №2 было получено частичное подтверждение численных результатов (рисунки 11,12), после чего сделан вывод, что численное моделирование не показывает точного распределения расплава внутри заготовки, и для представления картины процесса необходимо в модель включать расчет кроме тепловой и электромагнитной, еще и гидродинамической задачи.



Рисунок 11 – Заготовка Ø20x30мм после нагрева (слева) и результат эксперимента с заготовкой Ø30x35 (справа).



Рисунок 12 – Половина заготовки Ø60x100мм – стенка гарнисажа ~ в 2 мм.

Для оценки роли МГД процессов были проведены дополнительные экспериментальные исследования на высоких частотах. В процессе дополнительных экспериментов на 66кГц на лабораторном макете №3 (рисунок 13), несмотря на режим длительной стабилизации температуры, когда значение тепловых потерь с поверхности заготовки компенсируется значением потребляемой мощности, произошло проплавление боковой поверхности цилиндра (рисунок 14).



Рисунок 13 – Макет экспериментальной установки для нагрева заготовок Ø60x100мм на 66кГц



Рисунок 14 – Результат эксперимента на частоте 66кГц. Поверхность заготовки расплавлена

Это позволяет сделать выводы о важном влиянии на формирование расплава МГД процессов, связанных с воздействием электромагнитного поля на интенсивность перемешивания жидкого металла, и приводит к необходимости комплексного моделирования системы с учетом электромагнитных, тепловых и магнитогидродинамических явлений.

В пятой главе разрабатывается численная модель, сочетающая в себе решение электромагнитной, тепловой и гидродинамической задач, для получения расплава внутри титанового слитка на воздухе при нормальном давлении.

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.

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

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

где u_i – скорость жидкости, ρ – плотность жидкости, $\nu = \mu/\rho$ – кинематическая вязкость, p – давление и f_i – представляет собой вязкость внешней объёмной силы, действующей на жидкость. В приведённой выше и следующих формулах индексы могут принимать значение 1, 2 и 3, обозначая направления x , y и z .

В процессе плавления основными объёмными 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, для замыкания системы используется следующее 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», т.к. скорости потока много меньше скорости звука в данной среде. В связи с тем, что жидкость несжимаема, в модели отсутствует учёт плавучести. Если градиенты температур в жидкой среде не велики (несколько градусов) флуктуации плотности ρ' будут крайне малы: $\rho' \ll \rho$, таким образом, уравнение состояния среды может принять не зависимую от давлению 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: $f_{EM} = 0.5R \cdot e(j \times B)$, 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 расчётов также не были включены уравнения, учитывающие перенос массы.

Существует несколько подходов к моделированию турбулентности. Широко известен метод с осреднением уравнений Навье – Стокса по Рейнольдсу (Reynolds Averaged Navier–Stokes – RANS) при замыкании рейнольдсовских 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 трёхмерных 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 позволяют увидеть форму ванны расплава в процессе плавления внутренних слоев слитка и получить результат распределения вектора скоростей в расплаве (рисунок 15).

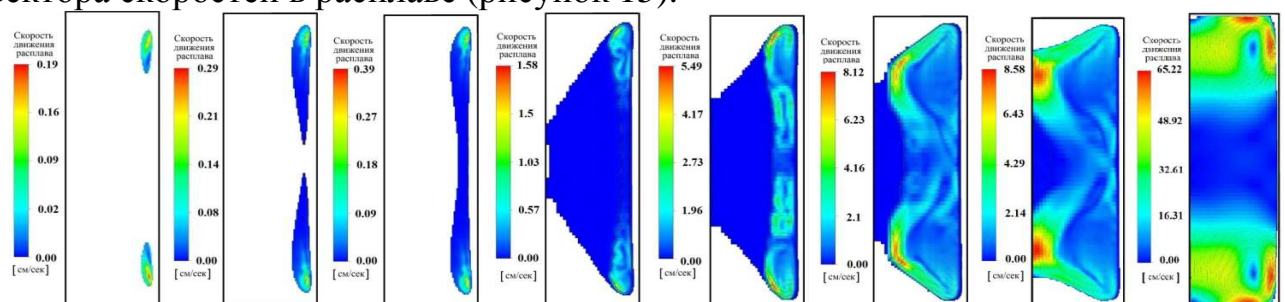


Рисунок 15 – Распределение средних скоростей в расплаве титана с момента образования расплава и до момента наступления термодинамического равновесия в системе

Стандартные методы описания гидродинамической задачи требуют значительных затрат вычислительной техники и не всегда целесообразны в использовании ввиду длительности расчета. Основываясь на вышесказанном,

была разработана упрощенная модель получения жидкой зоны внутри слитка при индукционном нагреве.

Одной из основных причин «размывания» металла внутри заготовки является скачкообразное изменение теплопроводности металла при образовании расплава. Исходя из данного предположения, было принято решение внести в модель понятие «турбулентной теплопроводности» в момент появления расплава внутри заготовки. В жидких металлах теплопроводность велика, и поэтому распределение температур существенно от неё зависит. При этом, имея ту же вязкость, что и многие жидкости, расплавы обладают в десятки раз большей теплопроводностью, а количество теплоты, передаваемой по молекулярному и турбулентному механизму, значительно превосходит аналогичное значение в жидкостях. Наряду с явлением теплопроводности, развивающимся на микрофизическом уровне, в жидких средах существует турбулентная теплопроводность, которая обуславливается возникающим при определенных обстоятельствах макроскопическим пульсационным движением молекул. В отличие от коэффициента λ коэффициент λ_t только отчасти зависит от физических свойств данной среды, определяемых ее внутренним состоянием, главным же образом характеристики турбулентной структуры течения зависят от конфигурации и размеров поля, от уровня осредненных скоростей, от первоначальной организации потока и от других внешних факторов. Кроме того, величина λ_t может меняться и действительно меняется от места к месту. Турбулентному режиму течения свойствен специфический вид переноса теплоты, физически отвечающий конвективному, а по форме записи – теплопроводности: $Q_t = -\lambda_t \cdot \text{grad } T$

При развитой турбулентности $\lambda_t \gg \lambda$ и соответственно $Q_t \gg Q_c$; исключение составляют зоны потока, прилегающие к твердой поверхности, где турбулентность затухает, и интенсивность турбулентного переноса уменьшается. Значения λ_t во много раз превышают значения λ , так как в ядре потока количество тепла, переносимое турбулентными пульсациями, гораздо больше, чем при переносе путем теплопроводности.

В результате численного моделирования в программном пакете ANSYS была разработана модель, которая позволяет наглядно продемонстрировать процесс образования расплава внутри заготовки, где поверхность, оставаясь в твердом состоянии, образует защитный слой гарнисажа, и качественно показывает направление, в котором происходит «размывание» металла внутри титанового цилиндра (рисунок 16).

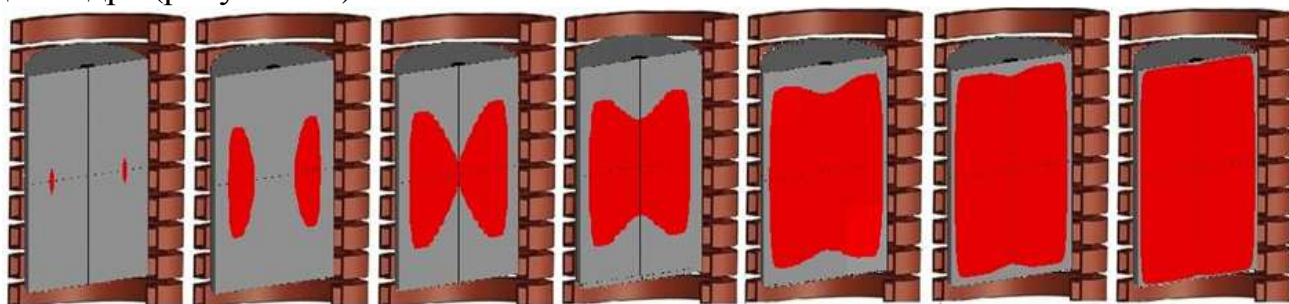


Рисунок 18 – Пошаговое образование расплава внутри заготовки при увеличении значения теплопроводности в расплаве в 15 раз по оси X и в 150 раз по оси Y по сравнению с этим параметром твердого материала

Основываясь на результатах численного моделирования и сравнивая их с экспериментальными данными, можно сделать следующие выводы:

1. Скорость движения и соответственно «размывание» металла после появления расплава внутри слитка по осям различны: в стороны торцов слитка скорость значительно выше, нежели у боковой поверхности.

2. В расплаве теплопроводность титана по оси Y примерно в 10 раз выше теплопроводности по оси X. Стоит учитывать, что увеличение теплопроводности в сторону боковой поверхности больше, чем в 20 раз по сравнению с теплопроводностью твердого металла, приводит к снижению толщины боковой стенки до критического уровня и влечет за собой проплавление. В то же время увеличение теплопроводности расплава в сравнении с этим же показателем твердого металла меньше, чем в 10 раз по оси X, недостаточно для образования достаточно тонкого слоя гарнисажа у торцов заготовки, независимо от увеличения теплопроводности по оси Y.

3. Увеличив значение теплопроводности титана в расплаве в 15 раз по оси X и в 150 раз по оси Y по сравнению с этим параметром твердого материала, численная модель повторяет результаты эксперимента и расчет в программном пакете FLUENT, доказывая тем самым значительную роль МГД процессов в реализации предложенной технологии получения расплава титана внутри слитка индукционным способом на воздухе и при нормальном давлении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ состояния уровня техники в области разработок нагревательных систем, обеспечивающих достижение жидкого состояния заготовок из титана и титановых сплавов для последующего литья, в результате которого выявлены основные недостатки существующих технологий, и показана перспективность технологии с применением индукционного нагрева без использования защитной атмосферы или вакуума;

2. Разработаны в средах FLUENT, ANSYS и UNIVERSAL 2D численные модели расчета сопряженных электромагнитных, тепловых и гидродинамических задач для получения жидкой фазы металла в цилиндрических немагнитных телах индукционным способом;

3. Показана методология расчета и оптимизация предложенного процесса получения расплава внутри титановой заготовки на основе разработанных численных моделей;

4. Спроектирован индукционный нагреватель для реализации технологии получения расплава внутри титанового слитка на воздухе при нормальном давлении;

5. Проведены экспериментальные исследования образования расплава внутри титановых слитков разных высоты и диаметра на воздухе при нормальном давлении.

6. По результатам научных исследований получен патент РФ на полезную модель №136666 «Индукционная установка для плавки титановых сплавов».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в перечень ВАК:

1. Масликов П.А. Моделирование электромагнитных и температурных полей при периодическом индукционном нагреве цилиндрических немагнитных заготовок [Текст] / Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Григорьев Е.А., Растворова И.И., Масликов П.А. // Индукционный нагрев. – 2010. – №4(14), С.13-18
2. Масликов П.А. Прецизионный нагрев цилиндрических заготовок в индукционном нагревателе периодического действия [Текст] / Демидович В.Б., Григорьев Е.А., Растворова И.И., Масликов П.А. // Известия «ЛЭТИ» – 2011. – №2, С.53-59
3. Масликов П.А. Влияние на качество нагрева в одном индукторе заготовок различной длины и диаметра [Текст] / Демидович В.Б., Григорьев Е.А., Масликов П.А. // Индукционный нагрев. – 2011. – №2(16), С.22-26
4. Масликов П.А. Технологии электромагнитного получения литых изделий из титана и титановых сплавов [Текст] / В.Б. Демидович, П.А. Масликов, Д.А. Баранов, А.А. Ковинька // Индукционный нагрев. – 2012. – №2(20), С.14-18
5. Масликов П.А. Инновационные технологии обработки титановых сплавов с применением индукционного нагрева [Текст] / В.Б. Демидович, П.А. Масликов, Е.А. Григорьев, В.А. Оленин // Индукционный нагрев. – 2012. – №3(21), С.26-28
6. Масликов П.А. Роль МГД явлений для получения жидкой фазы в титановом слитке при безтигельной плавке на воздухе [Текст] / В.Б. Демидович, П.А. Масликов // Индукционный нагрев. – 2013. – №2(24), С.33-36

Другие публикации:

7. Maslikov P. Precize heating of the cylindrical billets in the stage induction heaters (Прецизионный нагрев цилиндрических заготовок в индукционном нагревателе периодического действия) [Текст] / Demidovich V., Grigoriev E., Maslikov P., Rastvorova I. // ICEEE-2010 “13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components” Alushta, Crimea, Ukraine, – 2010 – P. 123
8. Maslikov P. Precize heating of the cylindrical billets in the stage induction heaters (Прецизионный нагрев цилиндрических заготовок в индукционном нагревателе периодического действия) [Текст] / Demidovich V., Grigoriev E., Maslikov P., Rastvorova I., Olenin V. // International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources, Padua, – 2010 – P. 37-44
9. Масликов П.А. Особенности индукционного нагрева титановых сплавов [Текст] / Демидович В.Б., Григорьев Е.А., Масликов П.А., Растворова И.И., Комагорцева У.В. // Материалы конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-11», Екатеринбург – 2011 – С. 111-116
10. Maslikov P. Precise induction heating of Ti and Zr billets (Прецизионный нагрев титановых и циркониевых заготовок) [Текст] / Demidovich V., Grigoriev E., Maslikov P., Rastvorova I., Olenin V. // Heat Processing, Essen, Germany, – 2011 . – №3(9), С.266-270

11. Масликов П.А. Современные технологии получения литых изделий из титановых сплавов [Текст] / Масликов П.А. // Материалы международного молодежного форума «Энергоэффективные электротехнологии», Санкт-Петербург – 2011 – С. 58-59
12. Масликов П.А. Исследование энергоэффективных индукционных технологий обработки титановых сплавов [Текст] / П.А. Масликов, В.Б. Демидович, Б. Наке // Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», Екатеринбург – 2011 – С. 153-155
13. Maslikov P. Innovative induction heating technologies of processing titanium alloys (Инновационные индукционные технологии по обработке титановых сплавов) [Текст] / Demidovich V., Maslikov P., Olenin V. // Proceedings of the XVII UIE Congress, St.Petersburg – 2012 – P.390-393
14. Масликов П.А. Получение твердожидкого состояния титановых сплавов индукционным способом [Текст] / В.Б. Демидович, П.А.Масликов, А.А. Ковинька. // Материалы международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты МКЭЭЭ-2012», Крым, Алушта – 2012 – С.341-343
15. Масликов П.А. Энергоэффективные индукционные технологии получения твердожидкого состояния титановых сплавов с применением индукционного нагрева [Текст] / П.А. Масликов, В.Б. Демидович, Б. Наке // Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», Екатеринбург – 2011 – С. 111-113
16. Maslikov P. Obtaining of semi-solid state of titanium alloys by the induction method (Получение твердо-жидкого состояния титановых сплавов индукционным способом) [Текст] / V.Demidovich, E. Grigoriev, P.Maslikov // International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources, Padua, – 2013 – P. 523-530
17. Maslikov P. Advanced induction heating technology for titanium alloy (Передовые технологии индукционного нагрева титановых сплавов) [Текст] / Demidovich V., Maslikov P., Grigoriev E., Olenin V. // Heat Treatment, Shanghai, China, – 2013 . – Vol. 28 №6(125), С.16-18