

На правах рукописи

~~А.И.~~
ТАШКИНОВ Алексей Юрьевич

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ И ИХ
ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВА

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2003

Работа выполнена в Уральском государственном техническом университете

Научный руководитель – заслуженный деятель науки и техники РФ
действительный член АИН РФ, доктор
технических наук, профессор
ЛИСИЕНКО В.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
ТРУБИН АДОЛЬФ НИКОЛАЕВИЧ

доцент, кандидат технических наук
ЦВЕТКОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

Ведущая организация- НПФ «ПРОСОФТ-Е» г. Екатеринбург

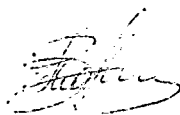
Защита состоится 17 января 2003 года в 15 часов в аудитории Р-237 на заседании диссертационного совета К.063.14.13 Уральского государственного технического университета по адресу: 620002, г. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, РТФ, ул. Мира,32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГТУ-УПИ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ученому секретарю Уральского технического университета.

Автореферат разослан 17 декабря 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



В.А.Морозова

2003-А
1308

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Вакуумный дуговой способ производства слитков занимает значительное место в металлургии. Типичным примером такого способа является производство титановых сплавов и жаропрочных сплавов.

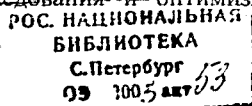
При проектировании и эксплуатации встают вопросы оптимизации ведения вакуумной дуговой плавки металла, размещения, реализации средств контроля и регулирования и повышения качества металла.

В связи с развитием вычислительной техники, важнейшим средством для решения этих задач является математическое моделирование. Использование математических регрессионных моделей позволяет всесторонне исследовать процесс шлавления, чтобы затем правильно выбрать структуру агрегата, обеспечивающую высокие показатели. Одной из составляющей повышения качества металла является всесторонний контроль шихтовых материалов используемых для производства пресованных электродов, в частности рентгеновский контроль пластин.

Весьма актуальна и задача создания математических моделей, работающих в составе систем управления на промышленных вакуумных дуговых печах. В этом случае, с помощью математических моделей технологического процесса и соответствующих методов и алгоритмов, решаются задачи оптимального управления по выбранным критериям. Кроме того, решаются задачи информационного обеспечения, позволяющие плавильщику или технологу более стабильно вести процесс плавки, предоставляя ему дополнительную информацию, недоступную для прямого измерения.

Цель работы

На основании вышеизложенного целью настоящей работы явилась разработка математических моделей, алгоритмов, программно-алгоритмических средств, необходимых для исследования и оптимизации



технологического процесса вакуумного дугового переплава (на примере вакуумной дуговой печи ДТВ8,7-Г10) для слитков титановых сплавов диаметром 770 мм и слитков жаропрочных сплавов диаметром 485 мм. Разработка системы автоматизированного контроля включений повышенной плотности в титановых пластинах.

Достижение поставленной цели реализуется путем решения следующих задач:

- разработка математической модели зависимости падения напряжения и частоты капельных замыканий от межэлектродного промежутка;
- совершенствование алгоритмов численной реализации модели теплообмена в слитке;
- разработка математической модели процесса «ионизации» и ее применение в управлении (для прессованного электрода);
- разработка методики оптимизации режимных параметров вакуумной дуговой печи с целью минимизации удельных расхода электроэнергии и максимизации производства;
- использование фильтра Кальмана для оптимальной оценки межэлектродного промежутка;
- использование разработанных моделей и алгоритмов для контроля вакуумного дугового переплава;
- выработка рекомендаций по модернизации вакуумной дуговой печи и применению математических моделей на действующем агрегате;
- выбор комплекса технических средств системы управления процессом плавки.

Научная новизна:

- на базе комплексного подхода сформулированы требования и реализована математическая регрессионная модель падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий двух типов в зависимости от изменения межэлектродного промежутка и силы тока дуги для титановых сплавов при переплаве слитков диаметром 770 мм;

- разработана структурная регрессионная модель процесса «ионизации». На ее основе предложена математическая регрессионная модель процесса «ионизации», в основу которой положено изменение падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий и величины изменения падения напряжения на дуге от длительности релаксационного процесса;
- разработана упрощенная тепловая модель наплавляемого слитка электрод-слиток-кристаллизатор;
- разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение контроля включений повышенной плотности обварных титановых пластин металлоотходов для прессованного электрода и на основе этого усовершенствована установка рентгентелевизионного контроля.

Практическая ценность диссертации заключается:

- в разработке программно-алгоритмических средств, с помощью которых осуществляется анализ процессов вакуумного дугового переплава и совершенствование режимов плавления; температурно-тепловых режимов, разработка на их основе алгоритмов оптимального ведения процесса плавки;
- в возможности прогнозировать процесс плавления, скорость плавления в стационарном режиме плавки;
- в решении вопросов производства качественного металла и энергосбережения при реализации математических моделей;
- в разработке программно-алгоритмических средств; использование которых позволяет производить контроль качества титановых пластин в автоматическом режиме, без участия оператора рентгендефектоскописта.

Материалы диссертации использованы при усовершенствовании вакуумной дуговой печи №1 и системы рентгеновского контроля металлоотходов цеха №32 Верхнесалдинского металлургического

производственного объединения. Разработан способ управления плавкой и устройство контроля межэлектродного промежутка при вакуумном дуговом переплаве. По материалам исследований подана заявка на изобретение.

Апробация работы.

Результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и сообщениях: Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии, системы управления и электроника» (г.Екатеринбург, 1999г.), 2-й международной научно-технической конференции «На передовых рубежах науки и инженерного творчества» РУО АИН (г. Екатеринбург, 2000г.), Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии, системы управления и электроника» (г. Екатеринбург, 2000г.), Международная конференция «Теплотехника и энергетика в металлургии» (Днепропетровск, 2002 г.), Студент и научно-технический прогресс «Сборник тезисов докладов студенческой научно-технической конференции» (г. Екатеринбург, 2002г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 80 наименований, приложения, изложена на 185 страницах, содержащих 154 страницы основного текста, 32 иллюстрации, 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы проблемы, существующие в области создания математических моделей процесса вакуумного дугового переплава и усовершенствования режимных параметров плавления.

В первой главе дается описание состояния проблем в выбранном направлении исследования. Рассмотрены особенности производства слитков титановых и жаропрочных сплавов вакуумным дуговым способом, а также

конструкции вакуумных дуговых печей. Проанализированы условия формирования поверхностного слоя слитков, а также возможные способы улучшения проплавления его боковой поверхности. Рассмотрены особенности дугового разряда при вакуумном дуговом разряде. Рассмотрены диффузный и контрагированный виды разрядов, а также положительный столб дуги, прикатодная и анодная область. Показаны проблемы измерения межэлектродного промежутка и пути их решения с использованием математического моделирования. Сформулированы цели и задачи исследования.

Объектом исследования является вакуумная дуговая печь типа ДТВ8,7-Г10 с возможностью плавки титановых слитков диаметром 770 мм жаропрочных сплавов стали диаметром слитков 485 мм. Основными элементами печи являются кристаллизатор с поддоном, герметично соединенный с вакуумной камерой. Показана актуальность создания систем автоматизированного контроля включений повышенной плотности титановых обварных пластин с использованием современных вычислительных средств и компьютерной обработки видеоизображений для сплавов аэрокосмического назначения.

Во второй главе приводится разработанная, на основе промышленного эксперимента, математическая регрессионная модель описывающая падение напряжения между ванной жидкого металла и торцом плавящегося электрода в зависимости от параметров межэлектродного промежутка и силы тока дуги. Произведена оценка скорости движения катодных на поверхности плавящегося электрода. Расчетным путем оценен радиус катодного пятна для плотностей токов 10^9 - 10^{10} А/м².

Рассмотрено влияние параметров ВДП тока дуги I_d , межэлектродного зазора L_d и давления в камере печи P . Чтобы оценить величину межэлектродного промежутка был проведен следующий промышленный эксперимент: изучили реакцию падения напряжения на дуге и частоту капельных замыканий на изменение межэлектродного промежутка и тока печи при постоянном давлении в камере печи. Промышленный эксперимент состоял

в переплаве в вакуумной дуговой печи электрода диаметром 705 мм в слиток диаметром 770 мм титанового сплава ВТ6. Параметры процесса изменяли в следующих пределах: силу тока от 7500-15000 А, межэлектродный промежуток от 0 мм до 160 мм, давление в печи поддерживали постоянным 9-15 мкм. рт.ст. В процессе эксперимента производили регистрацию падения напряжения на дуге, частоты капельных замыканий, перемещения электрода и глубины вакуума с использованием промышленного компьютера AWS-800 ф. Advantech с частотой опроса 2 Гц. Сигнал от падения напряжения на дуге подавали на прибор выделения капельных замыканий, который после обработки сигнала выдавал импульсы определенной длительности и амплитуды в промышленный компьютер. Межэлектродный промежуток изменяли с постоянной скоростью $0,5 \pm 0,1$ мм/сек. Каждый опыт продолжался по 10 минут, после чего работу печи в течении 10 минут стабилизировали и начинали следующее измерение. Моделирование производили с использованием методики регрессионного анализа, который выполняли на IBM PC совместимом компьютере с помощью пакета Statistica 5.0. Также использовали кейтовую систему сбора и обработки информации, позволяющей производить регистрацию параметров с частотой до 50 кГц с программным обеспечением POSM – пакетом обработки сигналов. На рис.1 представлена структурная схема системы регистрации параметров плавки. Данные напряжения на дуге, частоты капельных замыканий, перемещения штока, вакуума, после регистрации на промышленном компьютере AWS-800 и кейтовой системе приводили к общему времени и производили обработку.

Зависимость падения напряжения от межэлектродного промежутка L_d в диапазоне измерений от 0 до 160 мм аппроксимировали нелинейным уравнением:

$$U_d = A_u(I) + B_u(I) \cdot \ln(L_d), B \quad (4)$$

где; $A_u(I)$ и $B_u(I)$ – коэффициенты регрессионной модели, зависящие то тока дуги.

Проанализирован параметр частоты капельных замыканий в зависимости от межэлектродного промежутка. Было определено, что эта зависимость будет описываться следующим нелинейным уравнением:

$$F_{к.з.} = A_f(I) \cdot (L_d)^{B_f(I)}, \text{Гц} \quad (5)$$

где $A_f(I), B_f(I)$ – коэффициенты регрессионной модели зависящие от тока дуги.

В табл.1 представлены коэффициенты полученных моделей при различных величинах тока дуги с коэффициентами детерминации (R^2) и дисперсии (D).

На рис.2 и рис.3 представлены полученные модели падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий в зависимости от изменения межэлектродного промежутка и силы тока дуги.

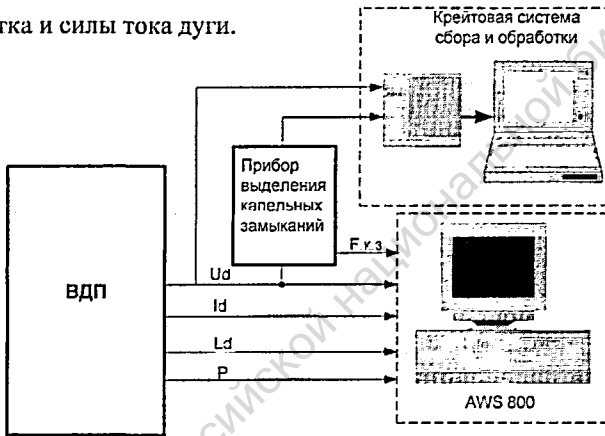


Рис.1 Структурная схема системы регистрации параметров плавления.

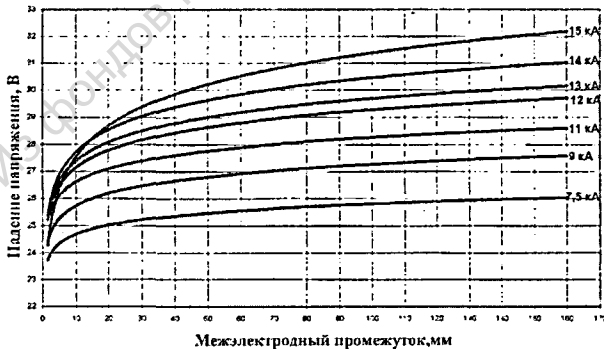


Рис.2 Падение напряжения на дуге в зависимости от межэлектродного промежутка и силы тока дуги.

ТАБЛИЦА 1. Коэффициенты моделей частоты капельных замыканий и падения напряжения

Номер опыта	Ток дуги, А	Модель по Уд				Модель по Фк.з.				P, мкм рт.ст.
		A	B	R ²	D, %	A	B	R ²	D, %	
a1	7500	23	0,64	0,81	65,7	6,18	-0,4	0,55	32	10,3
a2		23,7	0,49	0,85	73	7,2	-0,6	0,55	30	11,72
a3		24	0,48	0,82	67	8,4	-0,54	0,49	26	13,5
b1	9000	24,6	0,52	0,79	63	4,89	-0,83	0,56	31	10,6
b2		24,4	0,6	0,81	67	5,54	-0,94	0,64	51	13,2
b3		24,19	0,87	0,89	80	2,86	-0,63	0,66	45	14,1
c1	11000	24,95	0,72	0,95	90,5	3,59	-0,82	0,75	57	9,4
c2		24,9	0,76	0,9	81	1,7	-0,45	0,61	38	11,6
c3		24,8	0,79	0,89	80	1,93	-0,52	0,66	44,4	11,9
d1	12000	25	0,91	0,93	86	3,49	-0,85	0,84	71	11,54
d2		25	0,93	0,94	88,1	3,58	-0,89	0,87	76	11,2
d3		24,3	1	0,94	84	2,33	-0,67	0,83	69,7	11
e1	13000	25,8	0,91	0,85	73	1,23	-0,45	0,72	63	10,3
e2		25,1	1	0,94	88,1	1,58	-0,64	0,85	73	9
e3		24,4	1,12	0,91	84	0,89	-0,39	0,78	62	12
f1	14000	24,95	1,2	0,96	92	2,97	-0,64	0,84	76	11,4
f2		25	1,28	0,95	90	3,32	-0,99	0,9	82	13,2
f3		23,7	1,55	0,95	91	3,43	-1	0,88	78	10,4
g1	15000	24,15	1,5	0,97	94,7	2	-0,82	0,88	78	12
g2		23,2	1,8	0,97	94,3	2,1	-1,85	0,88	78	11,3
g3		23,65	1,68	0,97	94,9	1,8	-2,11	0,8	61	10,9

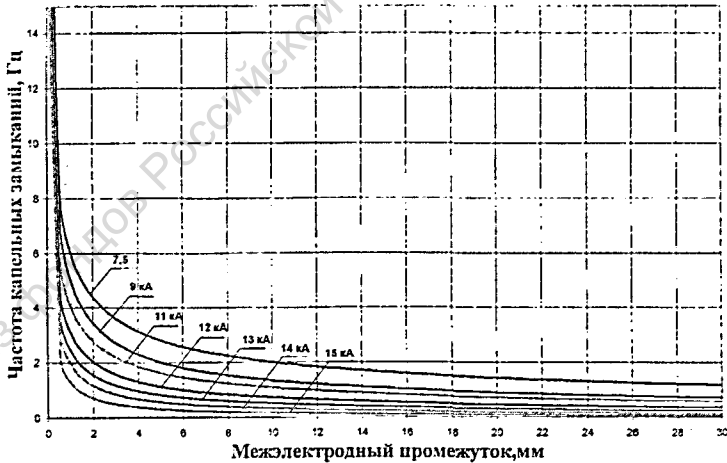
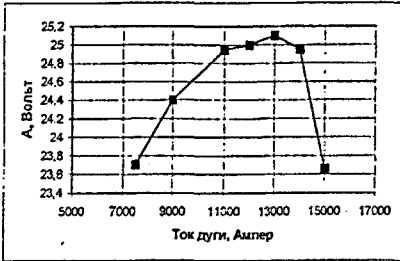
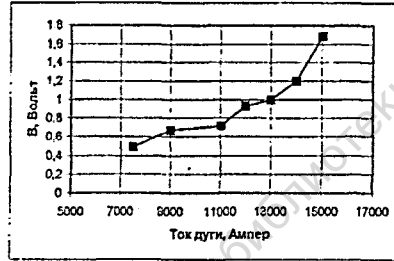
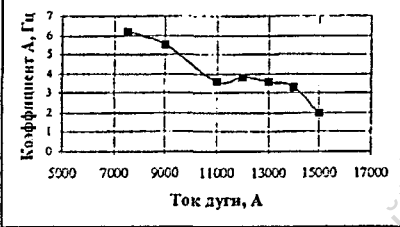
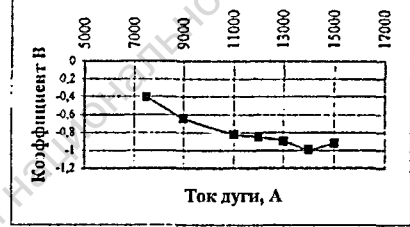


Рис.3 Частота капельных замыканий в зависимости от межэлектродного промежутка и силы тока дуги.

Проанализирована динамика изменения коэффициентов регрессионных моделей от силы тока дуги. Для каждого коэффициента $A_u(I), B_u(I), A_f(I), B_f(I)$ были построены зависимости его изменения от силы тока дуги и предложены регрессионные модели. На рис.4,5,6 и 7 показаны зависимости изменения коэффициентов от силы тока дуги.

Рис.4 Зависимость коэффициента $A_u(I)$ Рис.5 Зависимость коэффициента $B_u(I)$ Рис.6 Зависимость коэффициента $A_f(I)$ Рис.7 Зависимость коэффициента $B_f(I)$

По полученным зависимостям предложены модели поведения коэффициентов предложенных моделей от силы тока.

Произведен анализ процесса капельного замыкания во время вакуумного дугового переплава. Было выделено два условно называемых типа - тип «А» и тип «В», представленных соответственно на рис.8 и рис.9.. Капельные замыкания типа «А» отличаются от типа «В» тем, что по окончании капельного замыкания напряжение восстанавливается до прежнего уровня, а при типе «В» напряжение увеличивается до уровня 50-100 В на время 1-10 микросекунд с дальнейшим восстановлением до прежнего уровня. Проанализирована динамика изменения падения напряжения на дуге во время ее горения на азотированные добавки. При горении дуги возникает резкое изменение электропроводности дуги со скоростью 10^5 В/сек, что выражается в резком изменении падения напряжения, показанное на рис.10.

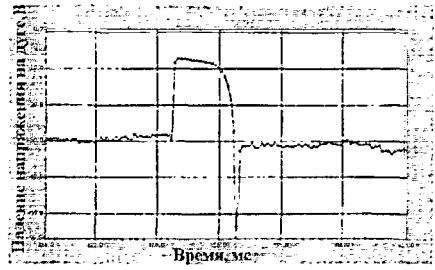
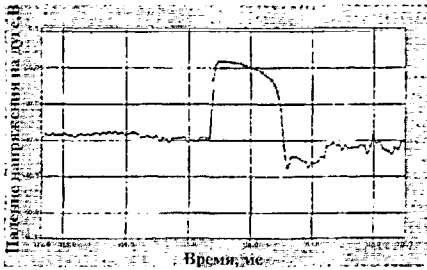


Рис.8 Капельное замыкание типа «А». Рис.9 Капельное замыкание типа «В».

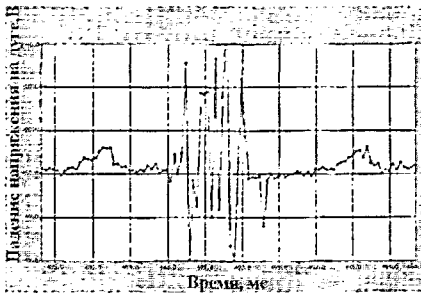


Рис.10. Изменение падения напряжения на дуге во время ее горения на азотированную добавку.

В качестве меры близости оценки межэлектродного промежутка к истинному значению примем сумму квадратов отклонений ϵ , результаты которых представлены в табл. 2 для моделей падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий во время плавки.

Для поддержания заданного значения межэлектродного промежутка по моделям падения напряжения и частоты капельных замыканий разработаны алгоритмы, позволяющие производить оценку и корректировку скорости движения электрода вниз. На рис.11 и рис.12 представлены блок – схемы алгоритмов управления движением электрода по предложенным моделям.

Таблица 2

Межэлектродный промежуток, мм	ϵ по уравнению (4), мм	ϵ по уравнению (5), мм
10	$\pm 1,8$	$\pm 3,2$
20	$\pm 2,3$	$\pm 5,1$
50	$\pm 7,7$	$\pm 12,7$
100	$\pm 12,5$	-

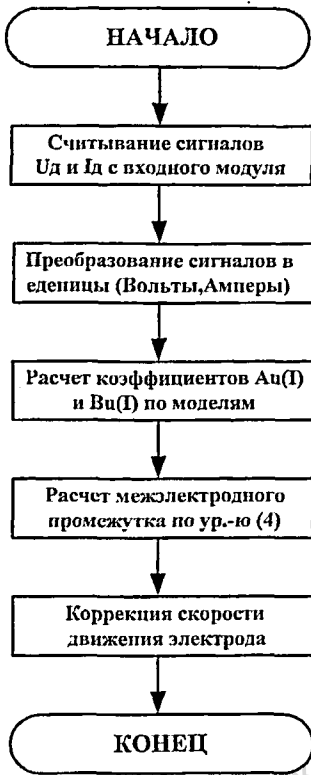


Рис.11. Блок-схема алгоритма оценки межэлектродного промежутка по модели падения напряжения на дуге.

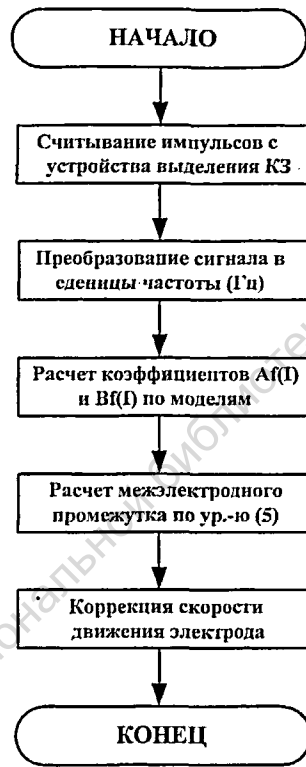


Рис.12. Блок-схема алгоритма оценки межэлектродного промежутка по модели капельных замыканий.

Дана оценка массы мостика переплавляемого металла за время одного капельного замыкания. Используя основное уравнение теплового баланса и количество подведенного тепла для его испарения.

$$m \cdot L_{\text{subl}} = \rho \cdot j^2 \cdot V \cdot \tau, \text{Дж} \quad (6)$$

где m - масса испаряемого металла; L_{subl} -удельная теплота сублимации; ρ - удельная теплопроводность жидкого металла; j - плотность тока; V - объем металла; τ - длительность капельного замыкания.

Выражая из этого уравнения плотность тока и принимая силу тока протекающего через расплавленный мостик металла равной 20 кА, а значения

межэлектродного промежутка порядка 10-30 мм. Дана была приближенная оценка массы расплавленного мостика металла, которая лежит в пределах от 0,0005 кг до 0,002 кг для титановых сплавов.

Разработана математическая регрессионная модель процесса «ионизации» и произведена оценка длительности релаксационного процесса ионизации от изменения падения напряжения на дуге. На рис.13 показана графическая модель процесса ионизации при вакуумном дуговом переплаве в которой определены следующие параметры: среднее значение падения напряжения на дуге (U_{cp}) и частоты капельных замыканий (F_{cp}) до ионизации, T_c -длительность спада напряжения, T_r -длительность релаксационного процесса, $U_{мин}$ -минимального значения напряжения, $U_{разн}$ -разность падений напряжения до ионизации U_{cp} и ее минимальным значением $U_{мин}$.

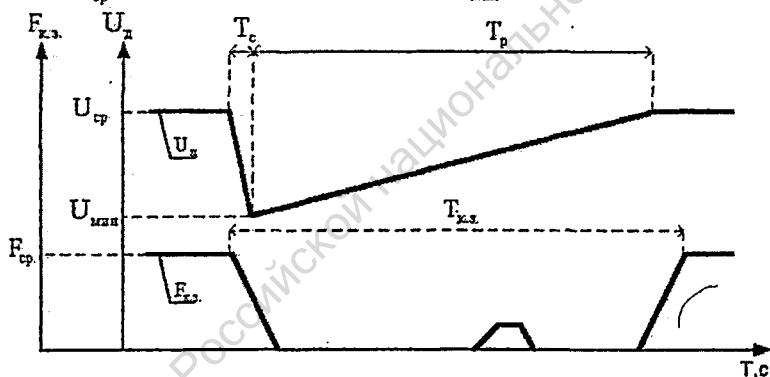


Рис.13 Графическая модель падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий от времени при ионизации.

Проанализированы 15 различных ионизаций, по которым предложена регрессионная модель:

$$U_{разн} = A + B \cdot T_p B, \quad (7)$$

где A, B — коэффициенты регрессионной модели. Коэффициент $A=1,046$, $B=0,0282$. Для предложенной модели коэффициент регрессии составляет 0,78.

Также была рассмотрена математическая модель, описывающая теплообмен в течение всего процесса ВДП. Тепловая модель системы

расходуемый электрод – слиток – кристаллизатор, используя данные по расходу электрической энергии и теплового потока, позволяет рассчитать температурное поле в осевом сечении слитка и массовую скорость плавки в любой момент времени. Для определения массовой скорости плавки предложен коэффициент распределения мощности дуги, зависимый от диаметра электрода, слитка и значения межэлектродного промежутка

$$K_q = f(D_{кр}, d_{эл}, L_d). \quad (8)$$

Предложены алгоритмы и методы определения включений повышенной плотности (ВПИ) в титановых пластинах металлоотходов, использующихся для обварки прессованных электродов. Основу методов обработки видеоизображений составили преобразования Фурье, Адамара. Для определения пластины в кадре использовались яркостные признаки и гистограммные признаки. Для определения ВПИ использовались контурные признаки. Была разработана структурная схема рентгентелевизионной установки на базе отечественного усилителя рентгеновского изображения УРИ-612П.

Третья глава посвящена исследованию и анализу закономерностей технологического процесса ВДП и разработке программного обеспечения использующегося для выделения ВПИ в титановых пластинах. Показаны основные соотношения для вычисления скорости движения электрода. Исследовано влияние важнейших технологических параметров на массовую скорость плавления вакуумной дуговой печи и удельные расходы электроэнергии при заданном межэлектродном промежутке на основном периоде плавления.

Для определения межэлектродного промежутка использовали аналоговый стационарный фильтр Кальмана, позволяющий при различных оценках межэлектродного промежутка по моделям падения напряжения и частоты капельных замыканий получить оптимальную оценку межэлектродного промежутка на основе стационарных гауссовых сигналов. В основу этого положены следующие соотношения:

$$L_{opt} = L_u \cdot \frac{\sigma_f^2}{\sigma_u^2 + \sigma_f^2} + L_f \cdot \frac{\sigma_u^2}{\sigma_u^2 + \sigma_f^2} \text{ мм}, \quad (9)$$

$$1/\sigma_{opt}^2 = (1/\sigma_u^2) + (1/\sigma_f^2) \text{ мм}, \quad (10)$$

где L_{opt} – оптимальная оценка, L_u – оценка по модели падения напряжения, L_f – оценка по частоте капельных замыканий; σ_u^2 – дисперсия по падению напряжения на дуге и σ_f^2 – дисперсия частоты капельных замыканий.

Изменение массовой скорости плавления от межэлектродного промежутка для жаропрочных сплавов на никелевой основе показано на рис. 14.

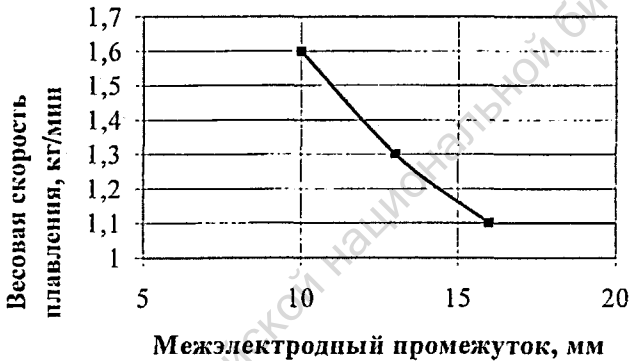


Рис.14. Изменение массовой скорости плавления металла от значения межэлектродного промежутка для постоянной силы тока дуги.

Разработано программное обеспечение определения ВПП на базе среды разработки DELPHI 5.0. Показаны основные модули программы RTU.EXE. Описана работа автоматизированной системы рентгентелевизионного контроля в автоматическом режиме функционирования. Показано, что система в автоматическом режиме работы определяет ВПП диаметром 0,6 мм без участием оператора рентгендефектоскописта. Обработанные видеоизображения с выявленными ВПП записываются в базу данных компьютера и имеют возможность дополнительного просмотра.

В четвертой главе диссертации даны рекомендации по совершенствованию и модернизации вакуумных дуговых печей применительно к плавильным цехам ВСМПО, а также применению математических моделей во время ее эксплуатации.

С участием автора, разработана модернизированная система управления процессом плавления на базе программируемых контроллеров и панелей отображения ф.Allen-Bradley.

Были сформулированы требования к системе управления процессом вакуумного дугового переплава, составлен перечень задач базового и верхнего уровня, обоснована необходимость реализации оптимизационных задач.

Принятая к реализации система управления и контроля процессом ВДП и корректировка режимов работы, выполненных, а апреле 2000 г., позволило получить следующие результаты:

- управлять процессом плавления с оптимальной скоростью расходующего электрода;
- поддерживать межэлектродный промежуток на заданном уровне по математическим моделям параметров падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий и заложенным алгоритмам;
- идентифицировать процесс «ионизации» и производить коррекцию скорости движения электрода в реальном времени;
- предоставлять оператору-технологу (плавильщику) текущую информацию о технологическом процессе в реальном времени;
- производить расчет массовой скорости плавления, высоты и объема ванны жидкого металла, высоту наплавленного слитка, остаток электрода, а также времени окончания процесса плавки.

Таким образом, использование предложенных разработок позволит создать современную высокоэффективную систему автоматизированного управления процессом плавки.

Результаты работы приняты к практической реализации на вакуумной дуговой печи плавильного цеха №32 ОАО ВСМПО.

ВЫВОДЫ

Совокупность выдвинутых и обоснованных в диссертационной работе теоретических положений и их практическое использование представляет собой решение важной производственной задачи увеличения выхода годного металла, повышения качества металла и уменьшения потребления энергоресурсов на базе создания автоматизированных систем контроля и управления процессом вакуумного дугового переплава.

При этом были получены следующие научные и практические результаты:

1.1 Произведена оценка катодных пятен и их скорости. Показаны факторы, определяющие динамику движения катодных пятен и механизм их влияния на плазму дуги:

1.2 Получена статистическая зависимость распределения напряжения на дуге в зависимости от изменения тока дуги и межэлектродного промежутка для диаметра электрода 705 мм и диаметра слитка 770 мм титанового сплава ВТ-6. Математические регрессионные модели падения напряжения на дуге в зависимости от межэлектродного промежутка имеют хорошую корреляцию с экспериментальными данными. Предложенные математические модели могут использоваться для оценки межэлектродного промежутка во время вакуумного дугового переплава. Предложены алгоритмы управления скоростью движения электрода по предложенным моделям. Проведены исследования капельного короткого замыкания между торцом электрода и ванной жидкого металла и параметра частоты капельных замыканий типа «А» и типа «В». Определены экспериментальным путем длительности капельных замыканий и их связь с массой переплавляемого мостика металла для титановых сплавов. Предложены математические регрессионные модели поведения частоты капельных замыканий в зависимости от межэлектродного промежутка и силы тока дуги. Предложен алгоритм управления движением переплавляемого электрода.

1.3 Исследован процесс «ионизации» при переплаве жаропрочных сплавов. Выявлена закономерность изменения падения напряжения при ионизации и соответствующий ей релаксационный процесс. Предложена

математическая регрессионная модель длительности релаксационного процесса «ионизации» от величины «просадки» напряжения на дуге. Исследована зависимость поведения частоты капельных замыканий при появлении «ионизации». Предложен алгоритм идентификации ионизации по параметрам падения напряжения и частоты капельных замыканий во время вакуумного дугового переплава. Разработана автоматизированная система управления и контроля вакуумным дуговым переплавом с использованием стационарного фильтра Кальмана. В результате внедрения усовершенствованной технологии, согласован метод производства и одобрен способ выплавки слитков из сплавов аэрокосмического назначения ф. «General Electric»

1.4 Предложена математическая тепловая модель наплавляемого слитка при вакуумном дуговом переплаве жаропрочных сплавов. Предложенная тепловая модель системы расходуемый электрод-слиток-кристаллизатор использует данные по расходу электрической энергии и теплового потока и позволяет массовую скорость плавления в любой момент времени по параметрам напряжения на дуге, силы тока, значению межэлектродного промежутка и температуры воды на входе и выходе. Предложен коэффициент распределения мощности дуги позволяющий оценить весовую скорость плавления.

1.5 Предложен метод и разработан алгоритм определения включений повышенной плотности для системы рентгеновского контроля металлоотходов титановых сплавов на примере титановых обварных полос. Предложенный метод позволяет производить контроль ВПП автоматически с использованием системы компьютерной обработки видеоизображения без участия оператора рентгендефектоскописта. Разработано программное обеспечение, позволяющее в реальном масштабе времени производить контроль ВПП в титановых пластинах толщиной от 1 до 10 мм размерами 0,6×0,6×0,6.

1.6 Даны предложения и подана заявка на патент по способу вакуумного дугового переплава слитков и устройства для его осуществления. Определен и обоснован объем информационного обеспечения, необходимого

для реализации на промышленном объекте задач управления технологическим процессом. Даны предложения по построению системы управления, ее функционированию, выбору КТС, а также по средствам визуализации и отображению информации о ходе технологического процесса.

По теме диссертации были опубликованы следующие работы:

1. Лисиенко В.Г., Ташкинов А.Ю. Применение математических моделей в вакуумном дуговом переплаве титана.//Информационные технологии и электроника: тезисы докладов III Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГТУ.1999г.
2. Лисиенко В.Г., Ташкинов А.Ю. Применение математических моделей при ВДП // На передовых рубежах науки и инженерного творчества . II Международная научно-техническая конференция РУО АИН РФ под ред. Лисиенко В.Г, Екатеринбург, УГТУ-УПИ.2000. Стр. 58-61.
3. Лисиенко В.Г., Ташкинов А.Ю., Гончаров А.Е.. Применение математических моделей в вакуумном дуговом переплаве титана.//Информационные технологии и электроника: тезисы докладов III Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГТУ.2000г.
4. Лисиенко В.Г., Ташкинов А.Ю. Применение математических моделей в вакуумном дуговом переплаве титана.//Информационные технологии и электроника: тезисы докладов IV Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГТУ.1999г.
5. Лисиенко В.Г., Ташкинов А.Ю. Особенности распределения падения напряжения и частоты капельных замыканий во время ВДП.// Студент и научно-технический прогресс: сборник тезисов докладов студенческой научно-технической конференции. Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ.2002, с. 106.
6. Лисиенко В.Г., Ташкинов А.Ю., Новиков В.Ф., Гончаров А.Е. Влияние ионизации на напряжение и частоту капельных замыканий при

ВДП//Международная конференция–Теплотехника и энергетика в металлургии. Украина. Днепропетровск 2002.

7. Лисиенко В.Г.,Ташкинов А.Ю.,Альтман П.С.,Насыйров Я.А.,Климов М.И., Гончаров А.Е. Особенности распределения напряжения дуги и частоты капельных замыканий в процессе вакуумного-дугового переплава титановых сплавов. //Проблемы спецэлектрометаллургии.-2002.-№4, с.28-31.
8. Лисиенко В.Г., Альтман П.С., Насыйров Я.А., Климов М.И.,Ташкинов А.Ю., Гончаров А.Е. Влияние ионизации на напряжение и частоту капельных замыканий при вакуумном дуговом переплаве стали. // Проблемы спецэлектрометаллургии.-2003.-№1, с.38-42.
9. Лисиенко В.Г., Альтман П.С., Насыйров Я.А., Климов М.И.,Ташкинов А.Ю., Гончаров А.Е. Особенности распределения напряжения дуги и частоты капельных замыканий при ВДП титановых сплавов. // Titanium–2002.№1, с.12-15.

Из фондов Российской национальной библиотеки

Из фондов Российской национальной библиотеки

2003-A

1308

308

Из фондов Российской национальной библиотеки

Подписано в печать 16.11.2002	Формат 60 x 84 1/16	Бумага писчая
Офсетная печать	Тираж 60	Заказ № 147

Ризография НИЧ УГТУ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19