

С-864

На правах рукописи

УДК 539.1

СТРОКОВСКИЙ Григорий Семенович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ
ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ**

Специальность: 01. 04. 20 — физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна — 1996

Работа выполнена в Липецком государственном техническом университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник Игорь Николаевич Мешков

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, старший научный сотрудник Сергей Александрович Коренев

доктор физико-математических наук, профессор Александр Егорович Лигачев

Ведущая организация:

Всероссийский электротехнический институт, г. Москва


Защита состоится "___" _____ 199 г. в ___ час. на заседании Специализированного Совета Д-047.01.06 при Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан "22" января 1996 г.

Ученый секретарь

Специализированного Совета кандидат физико-математических наук


В.А. Кривохижин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Импульсные и непрерывные пучки электронов в диапазоне энергии до 0,5 МэВ и мощностей до 1000 кВт широко применяются для обработки металлов и диэлектриков в качестве мощных источников тепловой энергии. Дальнейшее увеличение энергии электронов (до 3 МэВ) в интервале мощностей 10 - 100 кВт позволит сочетать термические возможности метода с процессами радиационно-термического воздействия до ≈ 1 м, осуществить вывод электронного пучка в атмосферу, повысить производительность обработки и расширить ассортимент обрабатываемых изделий. Настоящий уровень развития техники промышленных ускорителей, экспериментальных знаний в области взаимодействия электронного луча с поверхностью металла позволяет проводить разработку, апробацию и широкое внедрение технологий обработки металлов релятивистскими электронами, для чего необходимо осуществить переход от лабораторно-исследовательских работ к построению технологических систем на основе промышленных ускорителей с энергией 0,5 - 3 МэВ и мощностью 10 - 100 кВт.

Цель работы. Диссертационная работа заключалась в создании автоматизированной технологической системы - промышленного участка электронных технологий, включающего в себя ускоритель ЭЛВ-4 на 0,8 - 1,5 МэВ и 45 кВт, устройство выпуска непрерывного сфокусированного пучка в атмосферу и универсального манипулятора для работы под пучком с деталями различных габаритов и геометрии. Необходимо было создать новое устройство выпуска непрерывного сфокусированного пучка в атмосферу с двойным параллельным переосом, позволяющим существенно улучшить вакуумные условия работы, рассчитать распределение релятивистских электронов соответствующих энергий в атмосфере. Другой задачей была разработка

1

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

теплофизического аспекта взаимодействия релятивистских электронов с металлом, обоснование нескольких базовых режимов электронной обработки, подготовка методики расчета параметров облучения конкретных металлоизделий (валков холодной прокатки) с целью повышения их эксплуатационной стойкости; часть этой же задачи являлась подготовка необходимой технологической оснастки для реализации упомянутых режимов. Целью настоящей работы также являлась разработка на новом технологическом участке и промышленные испытания технологий радиационно-термической обработки валков холодной прокатки, а также эксперименты с использованием участка для радиационно-химической очистки газов от окислов серы и азота.

Научная новизна. Впервые ускоритель такого диапазона энергий применен для промышленной обработки металлов как часть единой автоматизированной технологической системы. Разработано и построено новое устройство выпуска пучка с системой двойного ахроматического параллельного переноса. Система нечувствительна к колебаниям ускоряющего напряжения и позволяет осуществить выпуск в атмосферу электронов любой энергии в границах 0,8 - 1,5 МэВ без перенастройки отклоняющих устройств; она может быть легко установлена в устройство выпуска без каких-либо переделок и доработок последнего и осуществлять выпуск пучка как с устройством переноса, так и без него. Получены значения энергии, угла раствора и поперечного размера пучка в атмосфере в зависимости от расстояния до выпускного окна ускорителя для начальных энергий 0,8, 1,2 и 1,5 МэВ; зависимости аппроксимированы эмпирическими формулами. Рассмотрен теплофизический аспект, определены базовые (с точки зрения теплофизики процесса) схемы электронной обработки металлов ("бегущая точка", "огненное кольцо"), а также необходимые оборудование, радиационная защита и схема построения технологической системы для электронной обработки металлов.

Разработана методика расчета параметров облучения валков холодной прокатки в низкотемпературном режиме; изобретен способ комбинированной обработки валков; обе технологии испытаны в условиях производства и показали увеличение эксплуатационной стойкости валков в 1,5-2 раза. Показана технологическая универсальность построенной системы на примере высокотемпературной обработки металлов (получение покрытий методом напылки) и радиационно-химической очистки.

Практическая ценность. Обработка металлов релятивистскими электронами в атмосфере выгодно отличается от других способов электронно-лучевой модификации (больше глубина обработки, шире диапазон используемых физических механизмов, больше производительность и диапазон обрабатываемых изделий) и от традиционных термических методов (высокая и легко варьируемая локальность, большие скорости нагрева-охлаждения, высокие КПД и степень автоматизации процесса, отсутствие отходов, загрязняющих окружающую среду). Созданная технологическая система может быть применена для электронно-лучевой модификации различных изделий, используемых в металлургии и машиностроении: облучения валков холодной прокатки; упрочнения роликов для астакадных транспортеров, ножей для обрезания кромки листового проката; напылки глубоких полос износостойкого материала на плиты кристаллизаторов для установок непрерывной разливки стали. Имеется положительный опыт использования данной системы в комплексе с экспериментальным стандом радиационно-химической очистки газов от окислов серы и азота (достигнутая степень очистки составляет 99 %). Разработана методика расчета режимов низкотемпературной обработки валков холодной прокатки, созданная с помощью данной методики технология показала в процессе промышленных испытаний увеличение эксплуатационной стойкости валков в 1,7 - 2 раза. Также разработан способ комбинированной обработки валков, защищенный Патентом РФ и

позволяющий повысить стойкость валков в 1,5-2 раза.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на заседании Координационного Совета Государственной научно-технической программы "Машины, технологии и производства будущего", Липецк, 1992; Семинаре "Обработка материалов пучками заряженных частиц", Липецк, ЛГТУ, 1993; Семинаре "Применение электронных пучков и импульсных разрядов для очистки дымовых газов", Москва, 1993; 3-й Всероссийской конференции "Модификация конструкционных материалов пучками заряженных частиц", Томск, 1994; International Chemical Congress of Pacific Basin Societies "Pacifichem-93", Гонолулу, США, 1993. По теме диссертации имеются 2 публикации в тезисах конференций и семинаров, 1 статья и решение о выдаче Патента РФ.

Основные результаты опубликованы в работах:

1. Кащенко А. П., Коцарь С. Л., Лазарев В. Н., Мешков И. Н., Стебеньев А. С., Строковский Г. С., Чернышев А. П. Использование электроно-лучевой обработки для повышения эксплуатационной стойкости валков холодной прокатки. Тезисы докладов III Всероссийской конференции "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц". В 2-х т. Томск; 1994. Т. 2, 1994. С. 60-62.

2. Кащенко А. П., Колтун М. Р., Лазарев В. Н., Лихачев Г. В., Мешков И. Н., Славутский В. П., Строковский Г. С., Френкель А. Е., Файнштейн А. Л. Радиационно-химический метод очистки газообразных отходов металлургического производства от окислов серы и азота с применением концентрированного выпуска пучка высокоэнергетических электронов. Тезисы докладов семинара "Применение электронных пучков и импульсных разрядов для очистки дымовых газов", М., 1993. С. 10-14.

3. Решение о выдаче Патента РФ; заявка N 931066403/02 (011863) приоритет 27.04.93. Способ радиационно-термической обработки стальных деталей / авт. изобр. Н. М. Александрова, А. Н. Балакин, А. П. Кащенко, В. Н. Лазарев, И. Н. Мешков, В. В. Селин, Г. С. Строковский.

4. Н. М. Александрова, В. Н. Карпельев, А. П. Кащенко, В. Н. Лазарев, И. Н. Мешков, В. В. Селин, Г. С. Строковский. Радиационно-термическая обработка - промышленные испытания валков станов холодной прокатки сфокусированным пучком высокоэнергетических электронов // Сталь, 1986, №1.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из Введения, 5 глав и Заключения и содержит 119 страниц машинописного текста, включая 32 рисунка, 18 таблиц и список литературы из 31 наименования.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСИТСЯ

1. Опытный технологический комплекс на базе ускорителя электронов ЭЛВ-4.
2. Устройство выпуска сфокусированного пучка электронов из ускорителя ЭЛВ-4 в атмосферу с системой двойного параллельного переноса пучка.
3. Экспериментальный стенд радиационно-химической очистки топочных газов от окислов серы и азота.
4. Методика расчета режимов, технология низкотемпературной радиационно-термической обработки валков холодной прокатки.
5. Способ комбинированной обработки валков холодной прокатки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит описание современного состояния электронных технологий и обоснование необходимости перехода к обработке металлов сфокусированными пучками релятивистских электронов в атмосфере.

В первой главе описано новое устройство выпуска в атмосферу сфокусированного пучка электронов (рис. 1) с энергией 0,8-1,5 МэВ диаметром около 1мм и расходимость не более

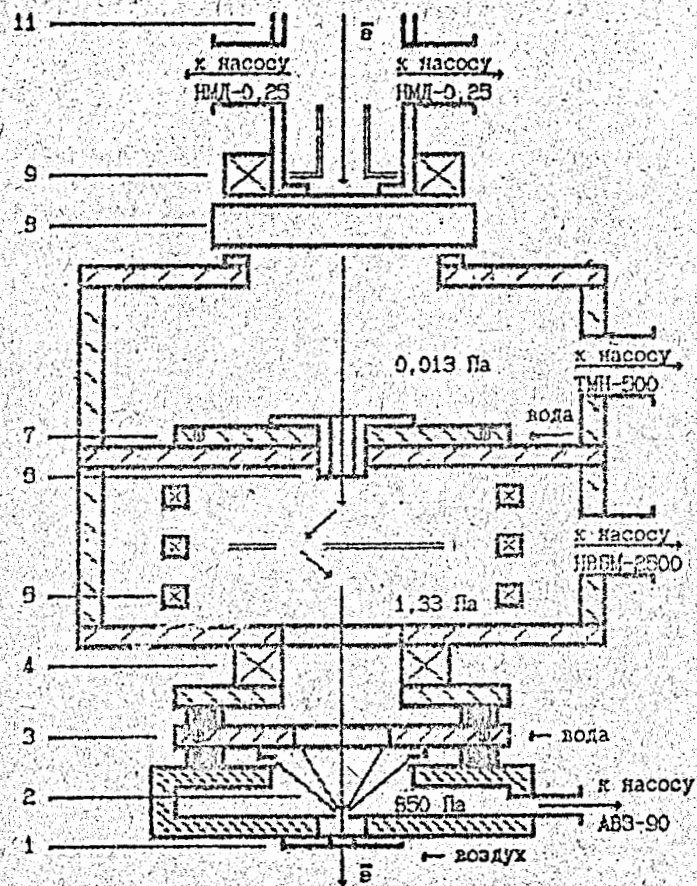


Рис. 1 Схема устройства выпуска сфокусированного пучка электронов в атмосферу из ускорителя 9ЛВ-4: 1,2,6 - диафрагмы; 3,7 - охлаждаемые фланцы; 4,9 - магнитные линзы; 5 - устройство двойного параллельного переноса; 8 - шлюз

0,1 рад. Для улучшения вакуумных условий между диафрагмами 2 и 6 (см. рис. 1) устанавливается устройство параллельного переноса пучка, в основе которого лежит схема ахроматического двойного переноса (рис. 2). Ослабление потока частиц, летящих навстречу пучку, достигается за счет наличия газоотражательного экрана. Условие ахроматичности $f \cdot B \cdot ds = 0$ при такой схеме достигается, по крайней мере, двумя способами:

$$B_1 = -B_2 = B_3, \Delta z_1 = 2\Delta z_2 = 2\Delta z_3, \quad (1)$$

$$B_2 = -2B_1 = -2B_3, \Delta z_1 = \Delta z_2 = \Delta z_3. \quad (2)$$

Способ (1) применялся при использовании в дефлекторах постоянных магнитов, (2) - электромагнитов. Распределение величины поля вдоль оси устройства переноса показано на рис. 3, отклонение пучка в плоскости экрана - в табл. 1.

Таблица 1

Отклонение пучка в плоскости экрана, мм

	Расчет		Эксперимент	
	0,8	1,5	0,8	1,5
Энергия, МэВ	0,8	1,5	0,8	1,5
Постоянные магниты	10	7	15	10
Электромагниты	7,5	5	10	7

Схема нечувствительна к изменениям ускоряющего напряжения и с точки зрения оптических свойств эквивалентна свободному промежутку. Устройство выпуска и система переноса конструктивно автономны.

Полученные во второй главе результаты дают возможность выбирать размер и, соответственно, удельную поверхностную мощность пучка на мишени за счет изменения расстояния от выпускного окна до обрабатываемой поверхности (рис. 4). Рассмотрена физика радиационно-термической обработки (РТО) металлов. Если считать зону облучения цилиндром с диаметром, равным диаметру пучка d_p , и высотой, соответствующей

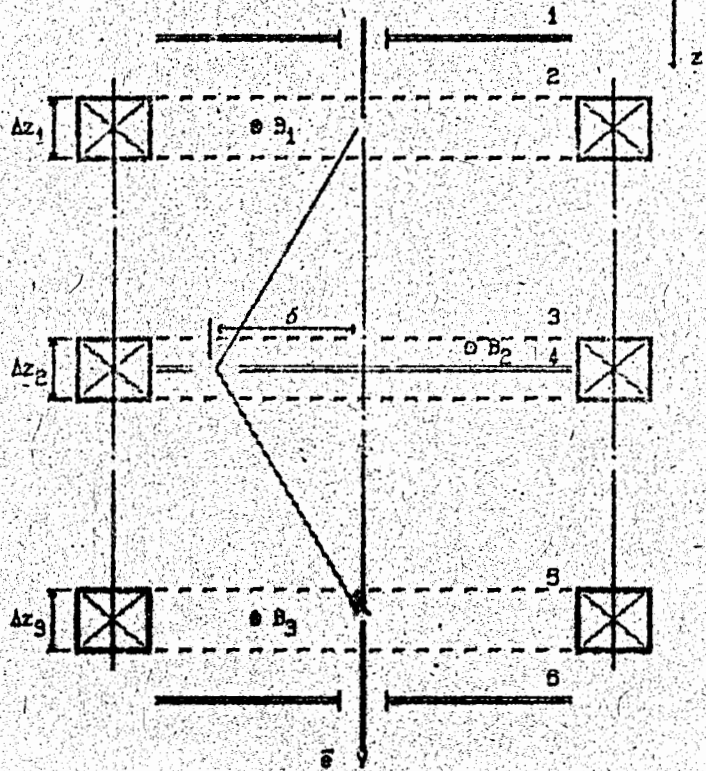


Рис. 2 Схема работы устройства двойного параллельного переноса: 1 - верхняя диафрагма камеры устройства выпуска, 2, 3, 5 - дефлекторы, 4 - газоотражающий экран, 6 - нижняя диафрагма.

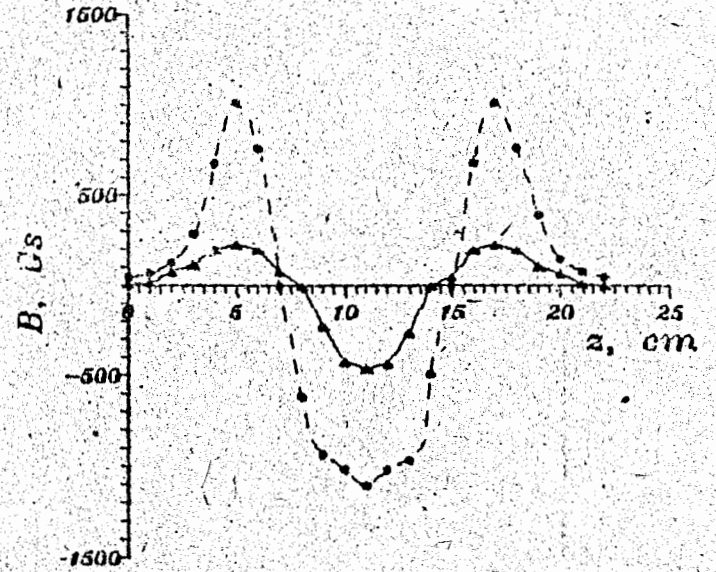


Рис. 3 Распределение величин магнитного поля по оси устройства параллельного переноса: ● - постоянные магниты, ■ - электромагниты

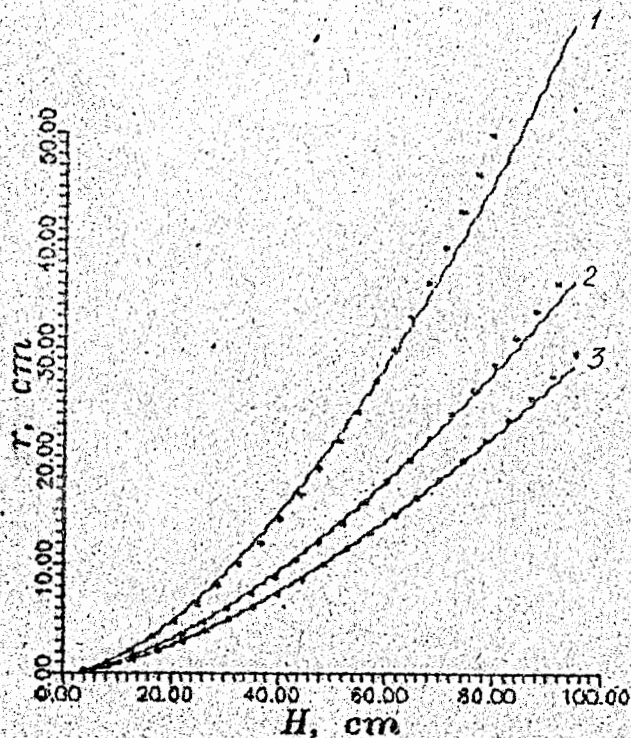


Рис. 4 Зависимость радиуса пучка от расстояния до плоскости выпускного окна при начальной энергии: 1 - 0,8 МэВ, 2 - 1,2 МэВ, 3 - 1,5 МэВ. Точки - результат расчета, сплошные линии - аппроксимация.

глубине проникновения электронов в материал h , то время облучения обратимого слоя τ_b и время его остывания τ_c :

$$\tau_b \approx d_b \sqrt{\gamma} / v, \quad \tau_c = (h^2 C_p) / 4\lambda \quad (3)$$

где C, λ, ρ - удельная теплоемкость, теплопроводность и плотность материала мишени, v - относительная скорость пучка и мишени. Тогда можно различить 3 основных типа РТО: $\tau_b \ll \tau_c$ - адиабатическая ("быстрая") обработка, эквивалентная мгновенному внесению энергии в слой h ; $\tau_b \gg \tau_c$ - термическая ("медленная"); $\tau_b \approx \tau_c$ - квазиравновесная. Во второй главе также получены соотношения, позволяющие оценивать температуру, скорость нагрева-охлаждения обрабатываемого слоя, дозу поглощенного излучения и рассмотрены изменения в стали на структурном и субструктурном уровне при адиабатической обработке.

В третьей главе выделены 2 базовых технологических режима адиабатической обработки: "бегущая точка" (БТ) и "огненное кольцо" (ОК). Если цилиндрическая деталь вращается с периодом T и перемещается в аксиальном направлении под неподвижным сфокусированным пучком, то режим БТ реализуется при $\tau_b \ll T \ll \tau_c$, режим ОК - при $T \ll \tau_c$. При обработке в режиме ОК тепло за время T не успевает уйти из облучаемого слоя в соседний, который при последующей обработке не испытает предварительного нагрева (что является преимуществом), однако этот режим требует более высоких скоростей вращения и аксиального перемещения, чем БТ (что иногда трудно реализовать на практике). В главе получены практические соотношения между параметрами пучка, детали и технологических перемещений для реализации указанных режимов. Проведен анализ предварительного нагрева облучаемого слоя, рассмотрены особенности многократной (циклической) обработки, получены зависимости для расчета времени выдержки между циклами и условия применения принудительного охлаждения детали. Описан Участок радиационных технологий (рис. 5).

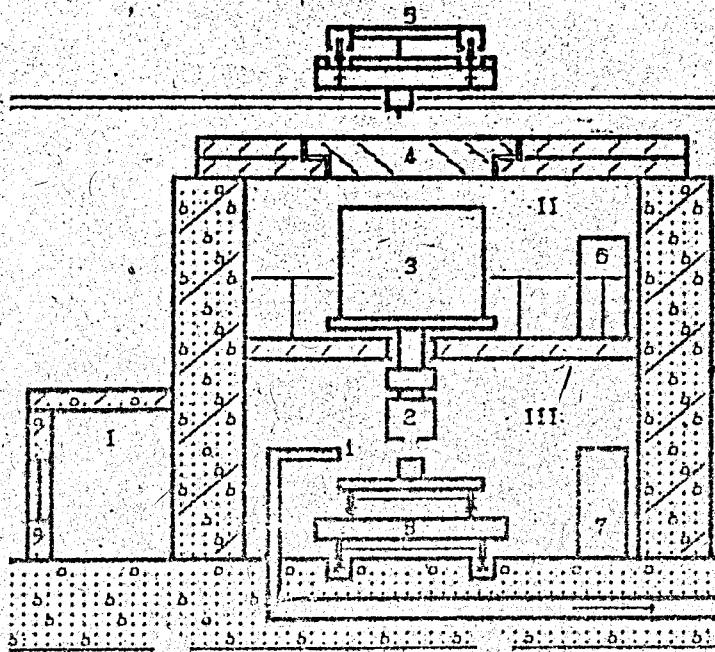


Рис. 5 Схема участка радиационных технологий:

I - пультовой зал, II - ускорительный зал, III - зал облучения; 1 - устройство отсоса продуктов радиолиза, 2 - устройство выпуска сфокусированного пучка в атмосферу, 3 - ускоритель ЭВ-4, 4 - крышка люка, 5 - грузоподъемное устройство, 6 - блоки питания магниторазрядных насосов, 7 - стены управления вакуумной системой, 8 - манипулятор

созданный на Новолипецком металлургическом комбинате, и рассмотрены конструкции механического оборудования электронно-лучевой обработки.

Четвертая глава посвящена РТО валков холодной прокатки. К основным критериям эксплуатационной стойкости валка относятся: суммарное количество прокатанного металла M и средняя износостойкость $\langle w \rangle$:

$$\langle w \rangle = M / (D_n - D_k) \quad (4)$$

где D_n, D_k - диаметр валка в начале работы и после выработки. На основе теоретических разработок, проведенных в предыдущих главах, создана методика расчета режимов низкотемпературной РТО валков со средним нагревом зоны облучения до 300. Партия рабочих валков 20-валкового стана (в нее входили как новые, так и бывшие в эксплуатации на момент облучения) была обработана в режиме, рассчитанном по предлагаемой методике, и прошла испытания в условиях производства.

Испытания показали, что низкотемпературная РТО увеличивает износостойкость валков в 1,7-2 раза (для сравнения использовалась партия из 23 необлученных валков, работавших на стане одновременно с обработанными, а также данные по 734 валкам того же стана за 4 года, предшествовавших испытаниям - табл. 2, рис. 6). Поверхностная твердость четырех валков, бывших в эксплуатации на момент облучения, возросла после обработки на 2-3 ед. НРС; это позволило их вновь использовать в производстве и прокатать дополнительно в среднем по 200 т на валок, что соответствует увеличению ресурса M в среднем в 1,5 раза.

Дальнейшим развитием данной технологии стало изобретение способа комбинированной обработки в интервале 350-500, позволяющего более надежно выдерживать требуемый температурный режим облучения и более полно использовать механизмы термомеханического воздействия пучка на закаленную сталь с целью ее упрочнения. Обработку осуществляют в

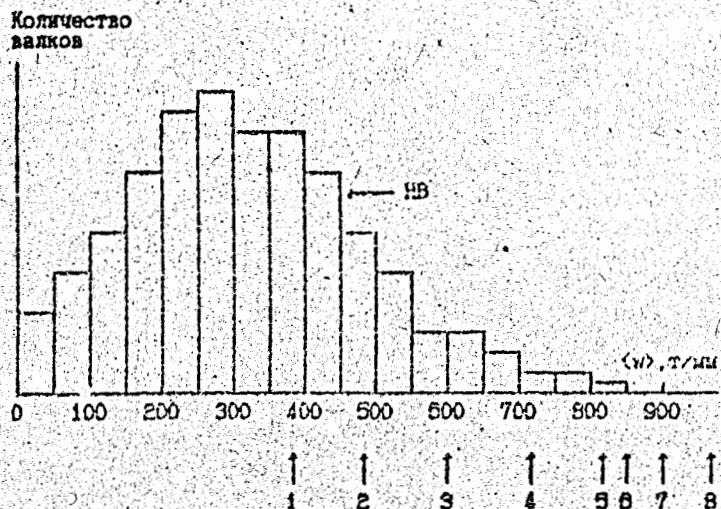


Рис. 6 Сравнение износостойкости облученных и необлученных валков:

НВ - распределение для 754 необлученных валков, работавших на 20-валковом стане в течение 4-х лет, предшествовавших испытаниям; 1, 2... 8 - значения износостойкости для каждого из облученных валков

Таблица 2

Износостойкость (w) облученных и необлученных валков

Партии валков	Период работы	Количество валков	Средняя износостойкость, Т/мм
Необлученные	1.01.88-1.04.92	754	317
Необлученные	1.03.92-1.10.92	23	428
Облученные	1.03.92-1.10.92	8	733

два этапа с различными значениями нагрева облучаемого слоя. Промышленные испытания способа показали увеличение эксплуатационной стойкости облученных валков в 1,5-2 раза.

Пятая глава иллюстрирует возможности созданной технологической системы экспериментами по электронной наплавке износостойкого материала (нержавеющей стали) на медные плиты кристаллизаторов установок непрерывной разливки стали, а также созданием экспериментального стенда радиационно-химической очистки (РХО) топочных газов от окислов серы и азота (рис. 7):

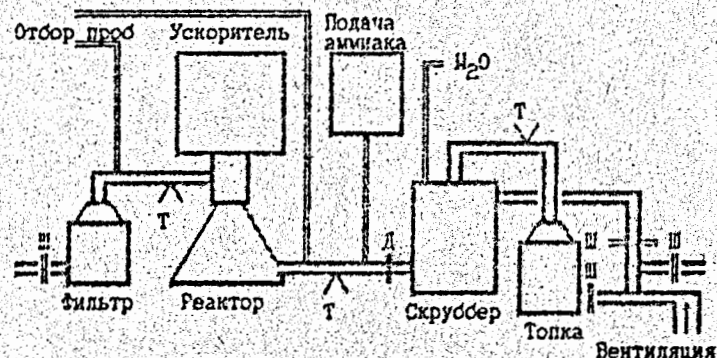
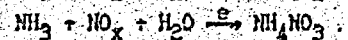
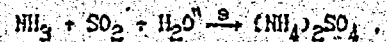


Рис. 7 Схема экспериментального стенда РХО газов: Т - термомпара, Ш - шибер, Д - диафрагма

На стенде можно моделировать состав газообразных выбросов металлургического производства; производить замеры концентраций NO, NO₂, SO₂ в топочных газах до и после облучения; варьировать расход газа; улавливать и собирать отходы газоочистки (аммонийные соли) - ценные минеральные удобрения; оценивать поглощенную газом дозу излучения по изменению температуры газа. В реакторе, построенном с уче-

том расходимости пучка в газовой атмосфере, электронный пучок инициирует химические реакции газоочистки:



В проведенных экспериментах достигнута степень очистки 99 % при энергозатратах ≈ 10 эВ на молекулу окисла.

В Заключении приводятся основные результаты работы.

1. Разработан и построен опытный технологический комплекс для обработки металлических деталей в атмосфере сфокусированным пучком электронов с энергией 0,8 - 1,5 МэВ и мощностью до 45 кВт.

2. Создано новое устройство выпуска пучка в атмосферу с системой ахроматического дельта-параллельного переноса.

3. Разработана методика расчета режимов низкотемпературной радиационно-термической обработки валков холодной прокатки; созданная с помощью данной методики технология прошла испытания в условиях производства и показала увеличение эксплуатационной стойкости валков в 1,7-2 раза.

4. Разработан и запатентован новый способ обработки валков холодной прокатки - комбинированный; предложена методика расчета режимов для данного способа; технологические испытания в условиях производства показали увеличение эксплуатационной стойкости валков в 1,5-2 раза.

5. На основе созданного технологического комплекса построен экспериментальный стенд радиационно-химической очистки газов от окислов серы и азота; на стенде достигнута степень очистки 99 %.

Подписано в печать 3.01.90 г. Формат 60x81 1/16. Бумага газетная. Подписано в печать 10.10.100. Заказ 749. ИЖТН.

Индекс 7. Адрес: ул. Тамбовская, 1.