

## СОЗДАНИЕ УСТАНОВОК ДЛЯ СВЧ-ТЕРМООБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*В.М. Грицина., А.И Стукалов, Г.В. Кулиш, Ю.А. Линник, М.А. Кузьмичев.  
(НТК "ЯТЦ", ИФТТМТ ННЦ ХФТИ, г.Харьков, Украина)*

*Разработаны установки для индукционного нагрева и спреерного охлаждения канальных труб (установка "Вертикаль") и твэльных труб (установка "Горизонталь"). Описана конструкция и работа установок, а также устройство регулировки температуры нагрева в поперечном сечении канальной трубы. Приведена кинетика индукционного нагрева и охлаждения канальной трубы, расчетное распределение температуры по сечению трубы, а также обоснование выбора частоты тока при индукционном нагреве канальных труб.*

### ВСТУПЛЕНИЕ

Радиационная деформация в значительной мере ограничивает срок службы канальных труб реакторов типа РБМК, CANDU и поэтому уменьшение радиационного формоизменения изделий из циркониевых сплавов, прежде всего канальных и твэльных труб, является важной задачей. [1-4].

В ННЦ ХФТИ совместно с рядом других предприятий Украины и России, проведены исследовательские и конструкторские работы по разработке способа термической обработки, существенно уменьшающего радиационное формоизменение и улучшающего механические свойства изделий из циркониевых сплавов [5-7]. В результате проведенных в ННЦ ХФТИ исследований разработаны и экспериментально обоснованы режимы СВЧ - термообработки изделий из циркониевых сплавов. СВЧ - термообработка по данным режимам приводит к созданию квазиизотропной упрочненной мелкозернистой структуры и обеспечивает практически полное подавление деформации радиационного роста модельных образцов вплоть до флюенсов  $1 \cdot 10^{27}$  н/м<sup>2</sup>. При этом значительно уменьшается деформация радиационной ползучести на СВЧ - термообработанных канальных трубах по сравнению с трубами в исходном состоянии. Для обоснования постановки СВЧ - термообработанных канальных труб в реактор необходимо проведение комплекса исследований на полномерных трубах. В связи с этим

были разработаны, изготовлены и сданы в эксплуатацию установки для бета - термообработки полномерных канальных ( $L \sim 9$  м) и твэльных труб ( $L \sim 4,5$  м). Эта сложная задача потребовала проведения наряду с исследовательскими, опытно-конструкторских и технологических проработок.

При создании опытной установки возникли задачи по оптимизации условий нагрева и охлаждения, частоты тока применяемой индукционной установки, а также обеспечения равномерности нагрева разнотолщинных труб. Эти задачи были успешно решены. Работа завершилась созданием экономичных высокопроизводительных установок бета-термообработки канальных труб "Вертикаль" и бета-термообработки твэльных труб "Горизонталь", пригодных для использования в опытном производстве.

### КОНСТРУКЦИЯ И РАБОТА УСТАНОВКИ

Для СВЧ – термообработки полномерных канальных труб из сплава Zr-2,5%Nb с целью существенного уменьшения их радиационного формоизменения была разработана, изготовлена и сдана в эксплуатацию установка "Вертикаль" для непрерывно-последовательной закалки труб  $\varnothing 40-120$  мм и длиной около 10 м (Рис.1) Функциональная схема установки показана на рис.2. Для непрерывно-последовательной закалки труб  $\varnothing 9 - 20$  мм и длиной 4,5 м

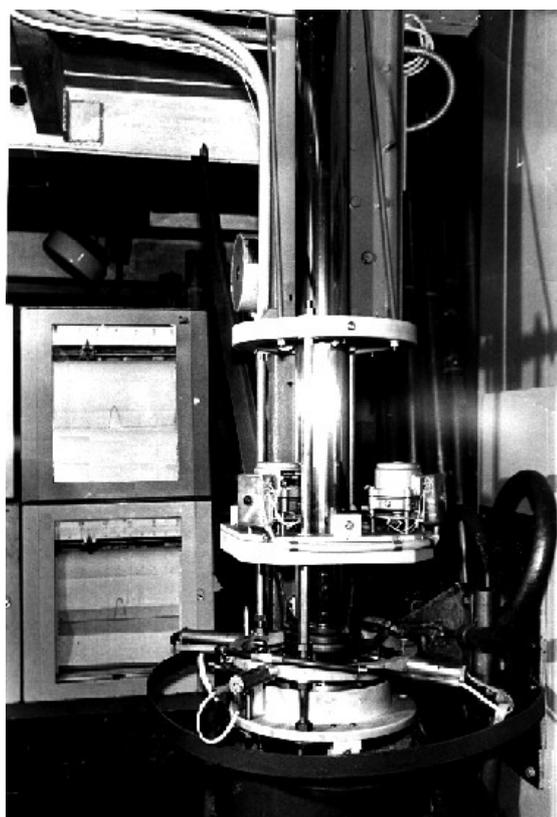


Рис. 1. Установка "Вертикаль"

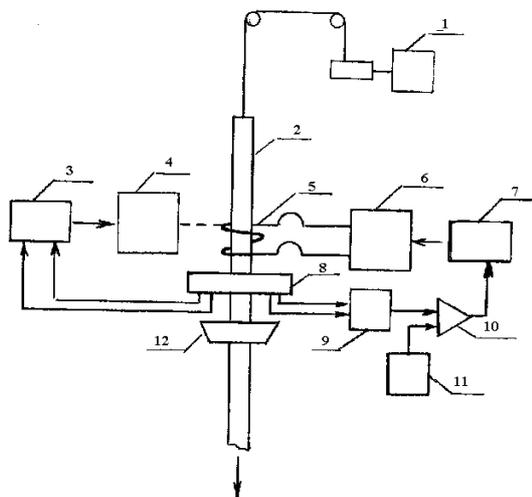


Рис. 2. Функциональная схема установки

- 1-электропривод и механизм перемещения трубы;
- 2- труба;
- 3- схема управления перемещения индуктора;
- 4- механизм перемещения индуктора;
- 5- подвижный индуктор;
- 6- генератор;
- 7- схема управления мощностью генератора;
- 8- модуль фотопирометров и фотопирометрических дифференциальных датчиков;
- 9- сумматор;
- 10- дифференциальный усилитель;
- 11- задающее устройство

была разработана, изготовлена и сдана в эксплуатацию установка "Горизонталь" (Рис.3).

Установка "Вертикаль" содержит механизм перемещения (1) трубы (2) в осевом вертикальном направлении, генератор переменного тока ВЧГ1-60/0,066 (3), индуктор (4), пирометр (5), блок управления мощностью генератора (6), связанный с пирометром, систему охлаждения трубы (7),-механизм перемещения индуктора (8), по крайней мере две пары встречно-направленных фотодатчиков (9), соединенных в каждой паре дифференциально и электрически связанных с механизмом перемещения индуктора. Оптические оси датчиков лежат в плоскости, нормальной к оси трубы, равномерно по ее окружности, при этом сама плоскость находится на выходе трубы из индуктора.

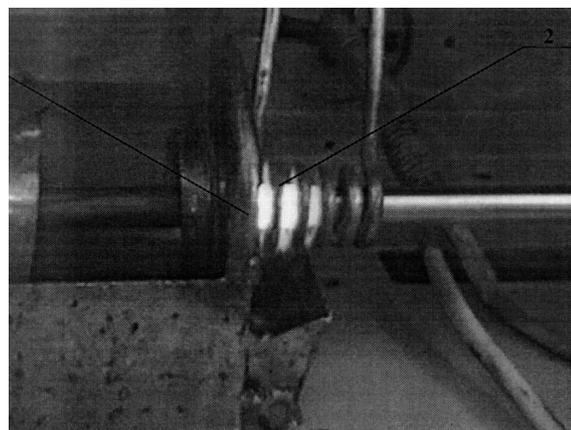
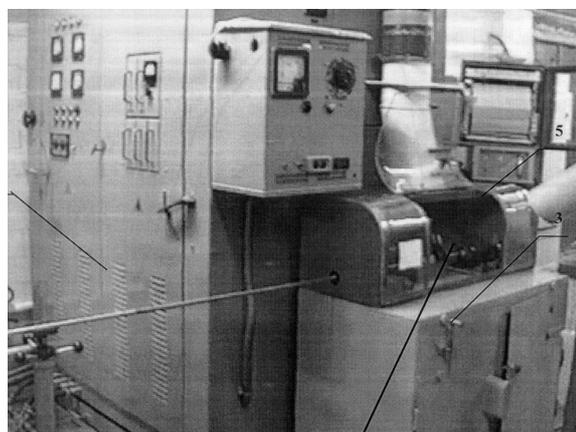


Рис. 3. Установка "Горизонталь"

Установка работает следующим образом. Включаем механизм перемещения циркониевой каналной трубы в вертикальном направлении. После входа нижней части трубы в индуктор по сигналу фотореле на него подается ток высокой частоты от гене-

ратора переменного тока. Труба разогревается и сигнал, получаемый с выхода пирометра, сравнивается с величиной опорного сигнала, которым задается необходимая температура нагрева. В зависимости от знака сигнала рассогласования между сигналом пирометра и опорным сигналом мощность генератора увеличивается или уменьшается и таким образом поддерживается постоянной температура нагрева трубы.

Равномерность температуры по периметру трубы контролируется системой из двух пар встречно-направленных фотодатчиков, расположенных во взаимоперпендикулярных направлениях и соединенных в каждой паре дифференциально.

Последовательно выходя из зоны нагрева участки трубы входят в зону закалки, где охлаждаются струей воды или воздуха со скоростью (400-1200)°C/с.

Следует отметить, что в большинстве случаев при разработке высокопроизводительных процессов удобнее горизонтальное расположение деталей, при котором осуществляется конструктивная связь закалочной установки с конвейером механической обработки. Однако, учитывая возможное коробление деталей в процессе нагрева при горизонтальном расположении оси трубы, разработана установка с вертикальным расположением главной оси индуктора и трубы, при этом также значительно увеличивается равномерность охлаждения трубы.

### КИНЕТИКА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ КАНАЛЬНОЙ ТРУБЫ

Температурный режим нагрева циркониевых труб определяют критические точки материала, скорость нагрева, время пребывания сплава в области температуры протекания фазовых превращений, а также исходная структура.

На рис.4(а,б) приведены кинетические кривые индукционного нагрева и охлаждения внешней (1) и внутренней (2) поверхности канальной трубы в процессе термообработки.

Весь цикл термообработки условно можно разбить на 4 периода.

**АВ** - период нагрева до начала фазовых превращений;

**ВС** - период нагрева в области фазовых превращений;

**CD** - период выдержки в однофазной области;

**DE** - период принудительного охлаждения.

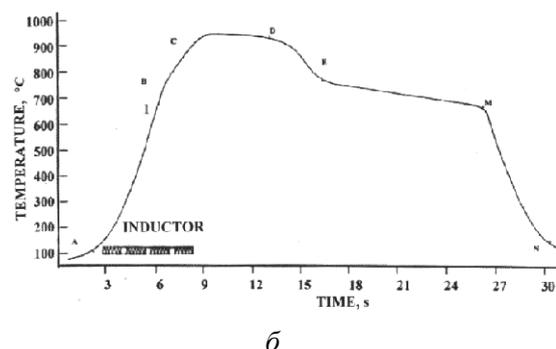
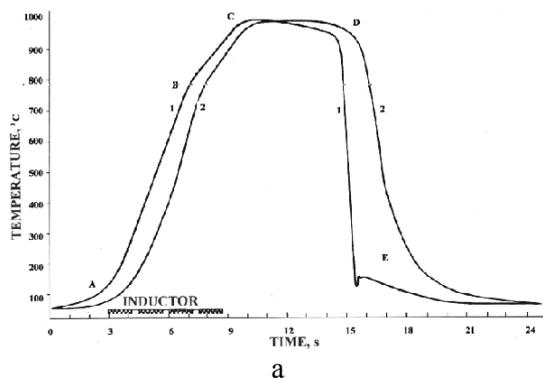


Рис.4. Температурный режим нагрева и охлаждения канальных труб водой (а); воздухом (б)

Нагрев осуществляется со скоростью (100-200)°C/с. Это необходимо для разрушения текстуры обработки канальных труб. Контроль температуры производили с помощью внутренних и наружных предварительно проградуированных термопар равномерно распределенных по сечению и зачеканенных одна против другой. Показания термопар записывались с помощью шлейфного осциллографа. Достижение максимальной температуры происходит вне индуктора, в момент нахождения участка между индуктором и зоной охлаждения. В этот же период времени происходит выравнивание температуры сначала по сечению трубы, а при ее дальнейшем движении - по окружности. Из-за излучения и теплопередачи охлаждение наружной поверхности трубы происходит

быстрее. Скорость охлаждения внешней поверхности трубы (11-15)<sup>o</sup>C/c, а внутренней (7-12)<sup>o</sup>C/c. Время выдержки в однофазной области определяется временем полного растворения легирующих элементов в бета-фазе циркония. Последовательно выходя из зоны выдержки участки труб входят в зону закалки, где охлаждаются со скоростью (400-1200)<sup>o</sup>C/c струей воды (участок DE, рис.4а) или потоком воздуха (участок DM, рис.4б). Скорость охлаждения канальных труб воздухом в температурном интервале (910-750)<sup>o</sup>C/c на участке DE составляет 100<sup>o</sup>C/c. В процессе охлаждения воздух нагревается, скорость охлаждения трубы уменьшается до 10<sup>o</sup>C/c (участок EM). Дальнейшее охлаждение трубы проводили водой (участок MN). Модернизация спреерного устройства позволила в широких пределах изменять скорость охлаждения трубы. Так в спреерном устройстве с кольцевой струей, направленной под углом 75<sup>o</sup> к оси трубы при расходе воды 0,2 л/с и давлении 0,3 МПа получили непрерывную кольцевую струю, позволяющую охлаждать внешнюю поверхность канальной трубы со скоростью 500<sup>o</sup>C/c, а внутреннюю - 150<sup>o</sup>C/c. Однако при такой кольцевой струе не удается эффективно сбивать паровую рубашку на поверхности трубы. При увеличении расхода или давления воды происходили подливы воды в зону выдержки, что приводило к неравномерному охлаждению трубы. Наиболее эффективно паровая рубашка при закалке сбивается при падении струи охладителя на поверхность под углом 15<sup>o</sup>. Расход воды при этом составляет 2 л/с при давлении 0,35МПа. Внешняя поверхность канальной трубы в данном спреере охлаждается со скоростью 1200<sup>o</sup>C/c, а внутренняя - 450<sup>o</sup>C/c.

### РАСЧЕТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО СЕЧЕНИЮ ТРУБЫ

Точный расчет нагрева и охлаждения трубчатых изделий с учетом эффекта фазовых превращений связан с некоторыми трудностями, поэтому в работе расчет изменения распределения температуры по сечению трубы сделан при определенных упрощающих допущениях. Предполагали, что канальная

труба имеет правильную геометрическую форму, и при расчете использовали средние значения теплофизических констант для сплава Zr-2,5%Nb. Производили расчет индукционного нагрева и охлаждения водой канальной трубы Ø 88x4 мм движущейся непрерывно через индуктор с участком разогрева 40 мм со скоростью 7 мм/с.

$$f=10\text{kHz} \quad f=66\text{kHz} \quad f=440\text{kHz}$$

$$\Delta=3.52 \text{ mm} \quad \Delta=1.37 \text{ mm} \quad \Delta=0.53 \text{ mm.}$$

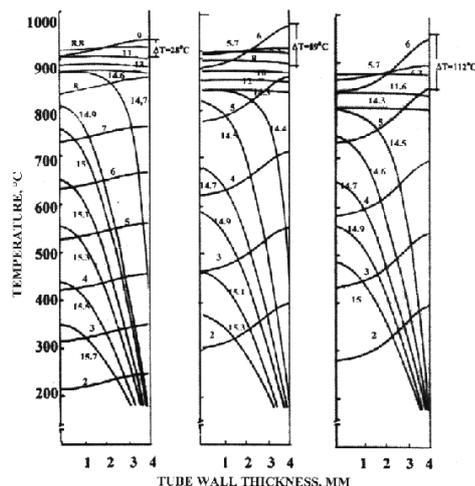


Рис.5. Расчетное распределение температуры по поперечному сечению трубы из сплава Zr-2,5%Nb в процессе ее индукционного нагрева и последующего охлаждения водой

Время выдержки в температурной области существования бета - фазы циркония, в течение которого происходит полное растворение выделений второй фазы и выравнивание температуры по периметру трубы задавали равным 5с, затем следует охлаждение трубы водой. Расчет распределения температуры по сечению трубы проводили для следующего ряда стандартных частот 2,4; 10; 66; 440 кГц. Результаты вычислений представлены на рис.5 в виде временных графиков распределения температуры по сечению трубы.

Нагрев токами высокой частоты  $f = 440$  кГц приводит к значительному, не допустимому по технологическим параметрам, перегреву по толщине трубы, что приводит к значительной неоднородности структуры по ее толщине. Снижение частоты тока генератора уменьшает перепад температуры по толщине трубы и при глубине проникновения тока, сравнимой с толщиной трубы, она нагрева-

ется равномерно. Из представленных на рис.5 графиков также видно, что выравнивание температуры по толщине трубы происходит за время 1с, что согласуется с экспериментальными данными, приведенными на рис.4.

## УСТРОЙСТВО РЕГУЛИРОВКИ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ТРУБЫ

По различным технологическим причинам трубы в процессе изготовления получают разнотолщинными, причем отклонение по толщине труб от номинальной может достигать 10% (например, в трубах для канального реактора РБМК это отклонение достигает 7,5% от номинальной толщины 4 мм). Эти изменения толщины стенки значительно влияют на поглощаемую металлом при индукционном нагреве активную мощность и приводят к неравномерному нагреву стенок трубы по периметру ее поперечного сечения. Так, например, в процессе скоростного индукционного нагрева таких труб до 950°C при осесимметричном расположении индуктора и трубы наиболее тонкие участки перегреваются по сравнению с толстостенными на 50-100°C, что после закалки приводит к неоднородности структуры и физических свойств трубы по ее сечению и длине, значительному ее короблению. С целью регулирования температуры нагрева в поперечном сечении трубы установка снабжена парами встречно-направленных фотодатчиков (рис.2), (9), соединенных в каждой паре дифференциально и фиксирующих возникающую разность температур. Сигнал рассогласования с каждой пары фотодатчиков (9) поступает в механизм перемещения (8) индуктора (4) и в зависимости от знака сигнала рассогласования индуктор (4) с помощью механизма (8) перемещения приближается или удаляется от поверхности трубы (2), тем самым, перераспределяя плотность энерговыделения в трубе, и за счет этого автоматически поддерживается равенство температур в поперечном сечении трубы. Высокая точность регулирования температуры обес-

печивается за счет управления расположением индуктора относительно трубы по прямому параметру - тепловому излучению и сильно зависит от положения фотодатчиков.

Фотодатчики могут быть расположены как в промежуточной части индуктора, так и на выходе трубы из индуктора. Положение фотодатчиков, регистрирующих температуру в сечении, нагретом до (700-850)°C позволяет при дальнейшем нагреве до температуры 950°C автоматическим перемещением индуктора выравнивать температуру по окружности трубы. Установка фотодатчиков в сечении, нагретом до (400-700)°C, приводит к перегреву утолщенных участков трубы или, при неоднородной структуре - участков с повышенным электрическим сопротивлением. Когда фотодатчики расположены в сечении, нагретом до температуры выше 850°C, то разность температур по окружности трубы лишь незначительно уменьшается. В данной установке для усиления сигнала фотодатчики регистрируют разность температуры по окружности в сечении, нагретом до 700-850°C. При разности температур по окружности более 10°C индуктор автоматически перемещается и при дальнейшем нагреве до 950°C происходит выравнивание температуры по окружности. Испытания показали, что при точности определения температуры  $\pm 5^\circ\text{C}$  фотодатчиками в диапазоне 700-850°C, разность температуры участков трубы в зоне максимальной температуры составляет  $\pm 15^\circ\text{C}$  [ 8 ].

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЧАСТОТЫ ТОКА ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ ТРУБ

Выбирая частоту тока при нагреве труб, обычно ориентируются на их толщину и максимальный электрический коэффициент полезного действия [9]. В то же время, если трубы разнотолщинны, то перепады температур по периметру поперечного сечения трубы могут быть столь значительными, что будет невозможна их качественная термообработка. Из этого вытекает необходимость правильного выбора частоты тока конкретно для каждого изделия. Плотность тока должна быть такой, чтобы разброс размеров стен-

ки трубы не повлиял на поглощаемую трубой мощность.

$$f \geq 4\rho / \pi\delta^2\mu\mu_0, \quad (1)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала трубы;  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость материала трубы;  $\mu_0$  - магнитная постоянная;  $\delta$  - толщина стенки трубы.

Нагрев переменным током с частотой, полученной по соотношению (1), обеспечивает значительное увеличение равномерности нагрева за счет устранения основного фактора, влияющего на неравномерность нагрева - изменения плотности тока по периметру трубы, обусловленного разной толщиной стенки. Соотношение (1) получено из предположения, что основная доля энерговыделения (~ 98%) приходится на поверхностные слои стенки трубы, что соответствует глубине проникновения тока в стенку трубы равной 0,5мм. В этом случае плотность тока по периметру трубы будет практически постоянной, и неравномерность нагрева трубы будет пропорциональна толщине стенки в первой степени. В противном случае, использование для нагрева переменного тока с частотой меньше, чем полученной по соотношению (1), приведет к появлению неравномерности плотности тока по периметру трубы, а так как энерговыделение пропорционально квадрату плотности тока, то неравномерность нагрева будет пропорциональна толщине стенки в квадрате и коррекция энерговыделения с помощью подвижного индуктора будет недостаточна для достижения положительного эффекта. Для обоснования выше приведенных теоретических предположений были проведены эксперименты по индукционному нагреву канальных циркониевых труб  $\varnothing 88 \times 4$  мм с максимальным разбросом их толщины  $b_{\max} - b_{\min} = 0,6$ мм.

При индукционном нагреве применяли стандартные частоты с глубиной проникновения как значительно меньше, так и больше толщины трубы. По соотношению (1) для данной трубы  $f=31,06 \cdot 10^3$  Гц. Стандартная ча-

стота, наиболее удовлетворяющая соотношению (1), 66 кГц. Из таблицы 1 видно, что за счет разнотолщинности  $\delta = 4 \pm 0,3$  мм при индукционном нагреве циркониевых труб в неподвижном индукторе появляется значительный перепад температуры по окружности, который еще более усиливается при индукционном нагреве током низкой частоты, когда глубина проникновения тока больше толщины трубы. Введение системы автоматической регулировки значительно выравнивает перепад температуры по окружности. При низких частотах нагрева труб перепад температуры по окружности настолько значительный, что полностью компенсировать его изменением плотности электромагнитного поля (перемещением индуктора) не представляется возможным. В то же время нагрев токами высокой частоты  $f=440$ кГц, обеспечивая высокую равномерность температуры по окружности, приводит к значительному, не допустимому по технологическим параметрам, перегреву по толщине трубы, что приводит к значительной неоднородности, настолько значительной, что полностью компенсировать его изменением плотности электромагнитного поля (перемещением индуктора) не представляется возможным. Только индукционный нагрев циркониевых труб  $\varnothing 88 \times 4$ мм частотой 40-66 кГц обеспечивает их равномерный нагрев по окружности и длине и позволяет получить изделия с однородным комплексом физических свойств по всему объему трубы.

#### УСТАНОВКА СВЧ-ТЕРМООБРАБОТКИ ТВЭЛЬНЫХ ТРУБ И ПРУТКОВ "ГОРИЗОНТАЛЬ"

#### КОНСТРУКЦИЯ И РАБОТА УСТАНОВКИ.

Основные узлы установки "Горизонталь" (рис.3): высокочастотный генератор ВЧГ1-25/0,44 (1), индуктор (2), механизм перемещения трубок и прутков в горизонтальном направлении (3), система охлаждения трубы (4), пирометр с регистрирующим самописцем.

Скоростная высокочастотная (СВЧ) термообработка труб и прутков на установке "Горизонталь" осуществляется следующим

образом. Включаем высокочастотный нагрев на генераторе ВЧГ-1-25/0,44 и механизм перемещения трубок или прутков (изделий) в горизонтальном направлении. Изделие, перемещаясь с постоянной скоростью через кольцевой индуктор, разогревается ВЧ полем до температуры существования  $\beta$  - фазы

циркония и входит в душевое устройство, где охлаждается кольцевой струей воды. Температура нагрева изделий на выходе из индуктора контролируется с помощью пирометра "Спектропир-10" и фиксируется самописцем КСП-4 на диаграммной ленте.

Таблица 1.  
Максимальный перепад температуры по окружности и толщине разнотолщинной трубы  $\varnothing 88 \times 4$  мм в зависимости от частоты генератора и режима работы регулировки положения индуктора.

Частота, кГц	Глубина проникновения, мм	Максимальный перепад температуры, °С			
		подвижный индуктор		неподвижный индуктор	
		по окружности	по толщине	по окружности	по толщине
440	0,53	30	110	160	105
66	1,37	30	85	160	80
4	5,57	100	15	260	10

### РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОСНАСТКИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОКИСЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ПРИ $\beta$ - ОБРАБОТКЕ

Твэльные трубки в 5-10 раз тоньше канальных и поэтому больше насыщаются газом в процессе термообработки. Для предотвращения взаимодействия внешней и внутренней поверхности трубок с атмосферой воздуха в процессе СВЧ - термообработки был разработан, изготовлен и смонтирован на установке "Горизонталь" специальный защитный кожух. Внутренний объем трубки заполняется инертным газом (аргоном, гелием) и трубка герметизируется с обеих сторон. Внешняя часть трубки, что нагревается, находится в защитном кожухе и в зоне нагрева продувается инертным газом вплоть до ее охлаждения в водяном душе. После СВЧ-термообработки на воздухе на трубке образуется темная, плотносцепленная окисная пленка. СВЧ-термообработка трубок в защитной атмосфере приводит к формированию на внутренней и внешней поверхности трубок окисной пленки светло-коричневого цвета, которая легко устраняется при дальнейшей обработке трубок.

### ВЫВОДЫ

1. Разработаны, изготовлены и сданы в

эксплуатацию опытные установки "Вертикаль" для скоростного нагрева токами высокой частоты и охлаждения с регламентированными скоростями канальных труб диаметром 40-120 мм и установка "Горизонталь" для бета-термообработки твэльных трубок диаметром 9-20 мм и полос толщиной 1-3мм и шириной до 20 мм.

2. Разработано устройство, обеспечивающее равномерность нагрева разнотолщинных труб (разнотолщинность  $\delta = 0,5$  мм).

- стабилизация температуры по длине труб осуществляется за счет автоматического изменения мощности генератора при отклонении температуры от заданной на участке трубы, что проходит через индуктор (сигнал рассогласования управляет мощностью генератора);

- стабилизация температуры по поперечному сечению труб осуществляется путем смещения индуктора при отклонении температуры трубы от заданной (сигнал рассогласования управляет величиной зазора между трубой и индуктором).

3. Обоснован теоретически и подтвержден экспериментально выбор оптимальной частоты нагрева при поступательном перемещении канальных труб через индуктор.

4. Проведен теоретический расчет распределения температуры по сечению изделий и построен график изотерм, что позволило вы-

брать оптимальные параметры СВЧ - обработки (скорость нагрева, скорость перемещения, время выдержки) и в конечном счете, обосновать метод скоростной высокочастотной термообработки изделий из циркониевых сплавов для атомной техники.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adamson R.P., Tucker R.P., Fidleris V. //5th International Symposium on zirconium in the nuclear industry, Boston, Mass., ASTM-STP-754, 1980 P.208-233.
2. Цыканов В.А., Давыдов Е.Ф., Куприенко В.А. и др. Изменение размеров изделий из циркониевых сплавов, облученных в реакторе СМ-2 до большого флюенса // Атомная энергия. 1983. Т.55. Вып.4. С.211-214.
3. Field G.J. Problem causes by irradiation deformation in CANDU reactor// J.Nucl. Mater. 1988. V.159.P.3-11.
4. Никулина А.В., Некрасова Г.А., Крысанов Д.Л. Циркониевые сплавы для канальных труб тяжеловодных реакторов // Атомная техника за рубежом. 1990. №1. С.9-12.
5. Стукалов А.И., Зеленский В.Ф., Грицина В.М. и др. Патент Украины №18386 с приоритетом от 25.12.89г. Способ термической обработки циркониевых сплавов.
6. Стукалов А.И., Грицина В.М., Кулиш Г.В., Линник Ю.А., Кузьмичев М.А. и др. Патент Украины №17285 с приоритетом от 29.03.90г. "Устройство для последовательной закалки труб".
7. Заявка Франции № 2303348, 1977 г.
8. Головин Г.Ф., Замятнин М.М. Высокочастотная термическая обработка. Л.: Машиностроение, 1990.
9. Глуханов Н.П. Физические основы высокочастотного нагрева, Л.: Машиностроение, 1989.