

**«Опыт применения энергоэффективной
технологии электрошлакового переплава
для получения заготовок узлов и
агрегатов перспективного
электротехнического оборудования»**

Авторы: Лазукин А.В., Левков Л.Я., Шурыгин Д.А.



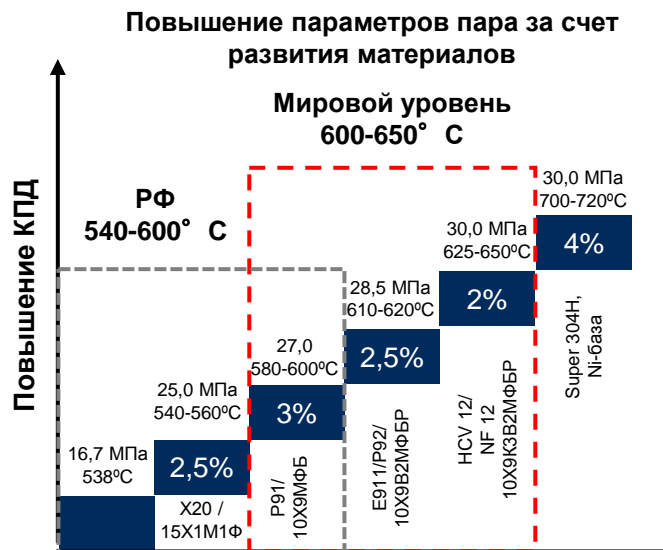
Государственный
научный центр РФ
ЦНИИТМАШ



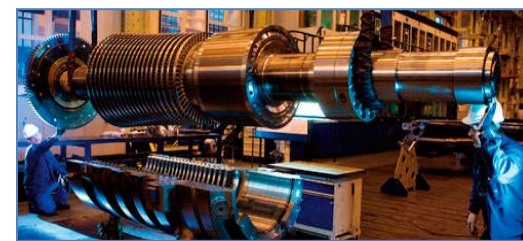
Москва
09.12.2016г.



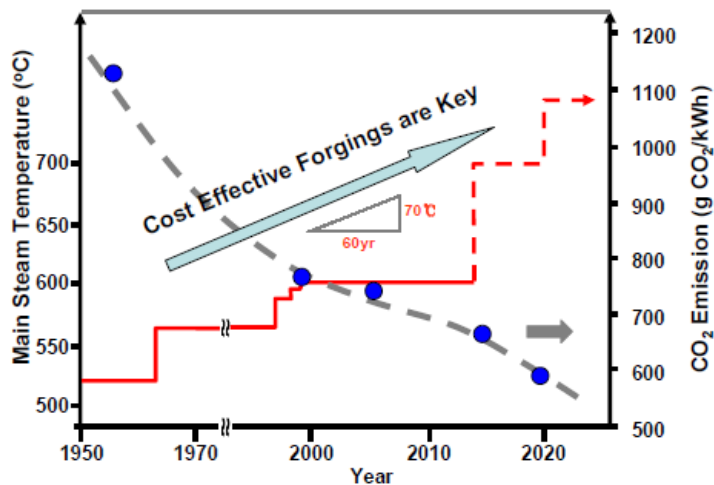
Мировая энергетика направлена на повышение расчетных параметров пара до суперсверхкритических параметрах пара (от 580°C до 650°C, давление 30-35 МПа) с целью повышения КПД до 47%.



Бесшовные трубы



Ротора турбин среднего и высокого давления



Корпуса запорной и регулирующей арматуры

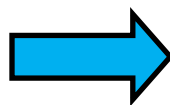


Бандаж ротора генератора

Получение крупных слитков ЭШП из высокохромистых сталей



Слиток ЭШП массой 62 т



Поковка заготовки ротора
высокого давления



Ротор турбины высокого
давления

Расход электроэнергии при выплавке 60т слитков достигает $2500 \div 2800$ кВт*ч/т, т.е. ~ 150000 кВт*ч на производство одного слитка.

Продолжительность плавки ЭШП 60т слитка составляет порядка 45 часов.

Количество отбракованных крупных слитков по металлургическому качеству в среднем составляет порядка 10% от общего объема произведенных слитков.

расплавление
расходуемого
электрода

- рафинирование с помощью шлака,
- вакуума,
- контролируемой атмосферы

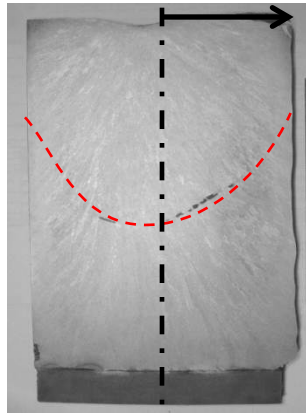
затвердевание
слитка

- направленная управляемая кристаллизация, обеспечивающая получение структуры и качественных характеристик слитка

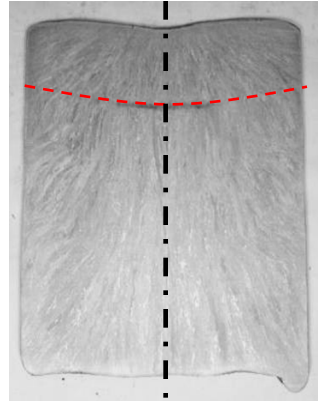
Новые потребительские свойства

Форма ванны в слитках стали 10Х9МФБ-Ш,
выплавленных со средней массовой скоростью
118 кг/час на частоте тока
2 Гц (1) и 140 кг/час на частоте 50 Гц (2)

R_0 - радиус слитка



1)



2)

Для управления процессами
затвердевания важны
теплофизические характеристики в
ДФО:

- линейная скорость затвердевания

$$V = \frac{\partial l}{\partial \tau} \quad (4),$$

- градиент температуры

$$G = \frac{\partial T}{\partial l} \quad (5),$$

- скорость охлаждения

$$\varepsilon = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (6).$$

$$K_{\phi,1} = \frac{H_{B,1}}{R_0} \gg 1 \quad (1) \quad K_{\phi,2} = \frac{H_{B,2}}{R_0} \ll 1 \quad (2)$$

максимальная глубина
ДФО ($H_{д.ф.о.}$)

плоская ванна

$$\Rightarrow H_{д.ф.о.1} > H_{д.ф.о.2} \quad (3)$$

Для стали одного и того же состава:

$$T_{L,1} = T_{L,2} \quad T_{S,1} < T_{S,2}$$

Усредненный градиент температуры в ДФО:

$$\overline{G}_1 = \frac{T_{L,1} - T_{S,1}}{H_{д.ф.о.1}} = \frac{\Delta T_{LS,1}}{H_{д.ф.о.1}} \quad (7)$$

$$\overline{G}_2 = \frac{T_{L,2} - T_{S,2}}{H_{д.ф.о.2}} = \frac{\Delta T_{LS,2}}{H_{д.ф.о.2}} \quad (8) \quad \Rightarrow \overline{G}_1 \ll \overline{G}_2 \quad (9)$$



Государственный научный центр РФ
ЦНИИТМАШ

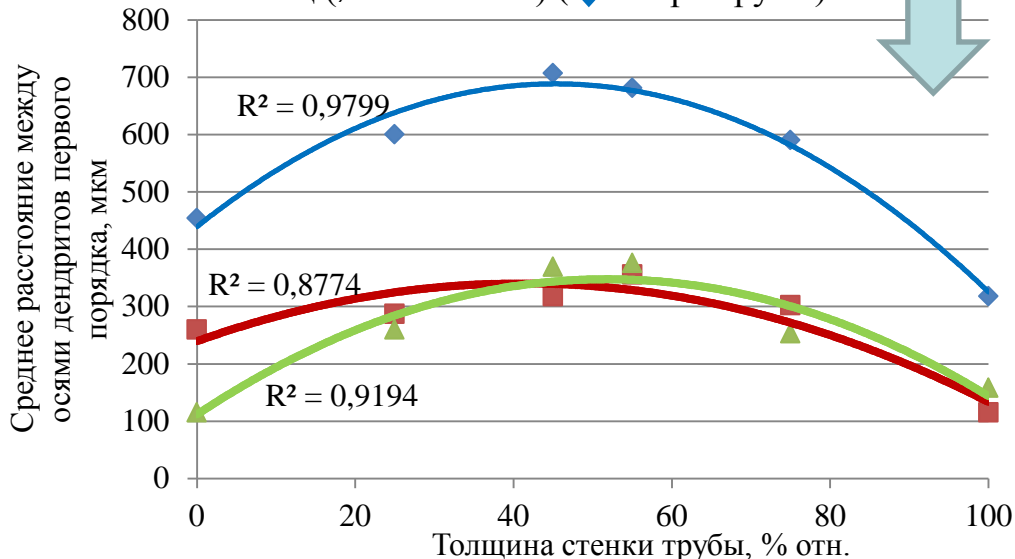


атомэнергомаш
ГРУППА КОМПАНИЙ РОСАТОМА

Влияние частоты тока на характеристики литой структуры в полых слитках стали марки 10Х9МФБ-Ш

Сопоставление расстояния между осями дендритов первого порядка в трубах электрошлаковой выплавки из стали марки 10Х9МФБ-Ш, произведенных на токе с частотой

2 Гц (▲ - низ и ■ - верх трубы), (Ø275×60 мм) и 50 Гц (◆ - верх трубы). (Ø325×55 мм)



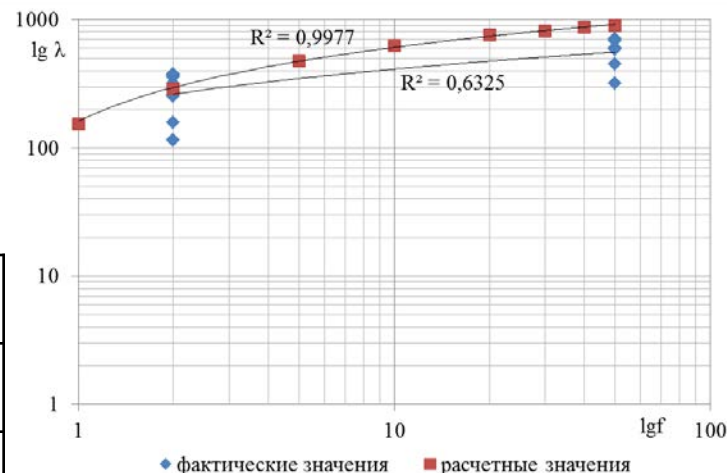
Зависимость среднего расстояния между осями дендритов от частоты тока переплава:

$$\lg \bar{\lambda} = \lg \lambda_0 - m \cdot \lg \left(\frac{\Delta T \cdot V_3^2 \cdot f \cdot \alpha}{K_D} \right)$$

V_3 – линейная скорость кристаллизации, м/с,
 λ_0 – постоянная величина, характеризующая минимальное расстояние между осями первого порядка, мкм и
 m – безразмерный коэффициент, составляющий для хромистых сталей от 0,25 до 0,43, определяемые эмпирически;
 α – коэффициент, характеризующий изменение времени затвердевания при уменьшении температуры, определяемый эмпирически, $с^\circ C$;

$$K_D = \frac{(jRTv)^2}{2c^2 \cdot (nF)^4 \cdot \pi \cdot (U_{нч})^2}$$

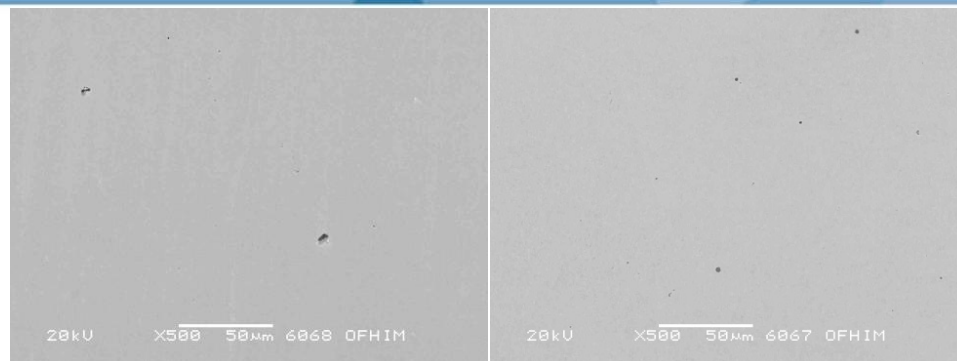
– показатель коэффициента диффузии, $м^2/с^2$.



Коэффициенты дендритной ликвации легирующих элементов стали 10Х9МФБ (хрома, кремния, молибдена) полых заготовок ЭШВ

Частота тока переплава, Гц	Элемент	Коэффициенты дендритной ликвации (междендритная область /дендрит)			
		внутренний край	центр	внешний край	среднее значение
2	Cr	1,06±0,02	1,13±0,03	1,09±0,02	1,09±0,023
	Si	1,18±0,03	1,26±0,035	1,20±0,04	1,21±0,035
	Mo	1,13±0,04	1,20±0,03	1,16±0,03	1,16±0,033
50	Cr	1,13±0,04	1,18±0,04	1,15±0,035	1,15±0,038
	Si	1,29±0,04	1,45±0,06	1,33±0,03	1,36±0,043
	Mo	1,25±0,05	1,36±0,04	1,26±0,035	1,29±0,043

При использовании тока низкой частоты происходит измельчение неметаллических включений и более равномерное их распределение в объеме металла.



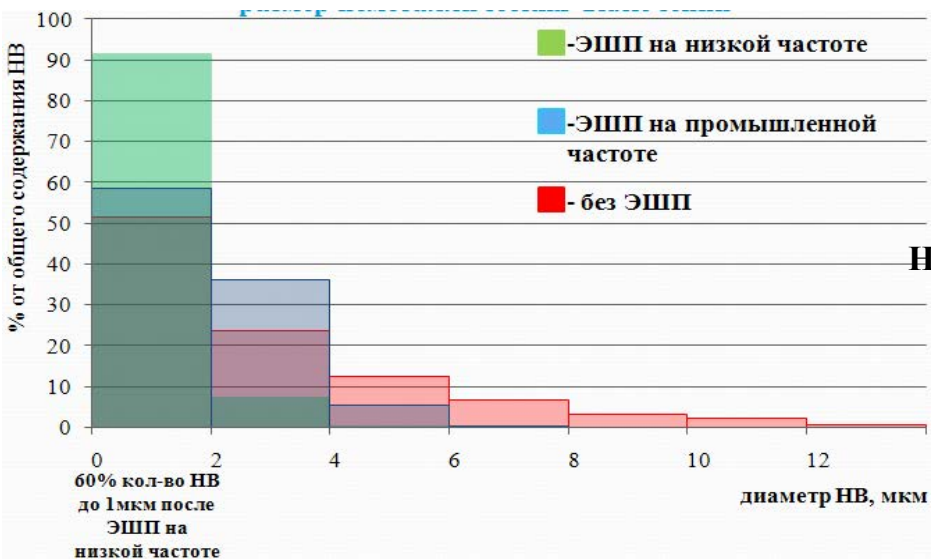
(а)

(б)

Неметаллические включения в образцах полых слитков ЭШП из стали 10Х9МФБ-Ш, выплавленных на промышленной частоте (а) и на пониженной частоте тока (б).

Неметаллические включения в металле полых слитков ЭШП

Тип заготовки, Марка стали 10Х9МФБ-Ш	Место отбора проб	Неметаллические включения по ГОСТ 1778, балл	
		Сульфиды	Оксиды и силикаты
Полый слиток Ø325×55 мм, 50Гц	Головная часть	0,5	2,5
	Донная часть	0,5	1,0
Полый слиток Ø275×60 мм, 2Гц	Головная часть	0,5	1,5÷2,0
	Донная часть	0,5	1,0÷1,5
Требования ТУ 1301-039-00212179-2010		≤ 2,0	≤ 3,0



Влияние частоты тока на размер неметаллических включений в металле ЭШП, сталь 10ГН2МФА-Ш



Конструктивные особенности:

- Универсальная двухмодульная конструкция печи обеспечивает:
 - независимую выплавку заготовок на каждом модуле;
 - совместную работу двух колонн на общей позиции;
- Широкий выбор схем переплава и механизмов перемещения позволяет осуществлять следующие варианты:
 - монофиляр/бифиляр;
 - неподвижный/подвижный кристаллизатор или заготовка;
 - встречное движение электрода и кристаллизатора;
 - универсальный кристаллизатор для получения сплошных и полых заготовок;
- Два источника питания, включающих трехфазные трансформаторы и преобразователи частоты (0,1-10 Гц).

Технико-экономические показатели производства:

- снижение удельного расхода электроэнергии на 25-30% по сравнению с традиционным ЭШП (расход электроэнергии при выплавке слитков составил $1100 \div 1200$ кВт*ч/т, а при выплавке полых заготовок $1400 \div 1500$ кВт*ч/т; $\cos\varphi$ при выплавке слитков составил $0,8 \div 0,9$, а при выплавке полых заготовок составил $0,88 \div 0,92$);
- повышение на 15% коэффициента использования металла ЭШП;
- исключение электрических помех во внешней сети;
- снижение тепловых потерь в короткой сети и электроде -20%. 8





Государственный
научный центр РФ
ЦНИИТМАШ



атомэнергомаш
ГРУППА КОМПАНИЙ РОСАТОМА

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**