

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ (ДУО) СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВА

*Б.В. Борц, А.Ф. Ванжа, И.М. Короткова, В.И. Сытин, В.И. Ткаченко*  
 Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
 Харьков, Украина  
 E-mail: borts@kipt.kharkov.ua; тел./факс +38(057)335-17-03

Рассмотрена возможность получения дисперсно-упрочненной наноструктурными оксидами циркония стали 08X18H10T методом вакуумно-дугового переплава. Теоретическими и экспериментальными методами исследовано влияние режимов выплавки и размера легирующих частиц на распределение оксидов циркония в слитке стали 08X18H10T. Исследованы влияния легирования оксидами циркония на размеры зерен и неметаллических включений, микротвёрдость и механические свойства стали 08X18H10T. Показано, что уменьшение размера частиц оксидов циркония приводит к более равномерному распределению их в объеме расплава.

## 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ И СВОЙСТВАМ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В последнее время активно проводятся исследования по созданию конструкционных материалов активной зоны атомных реакторов нового поколения, обладающих высокой радиационной стойкостью, жаропрочностью, низкой активацией при эксплуатации.

Одним из методов решения поставленной задачи является разработка конструкционных материалов на основе дисперсно-упрочненной оксидами (ДУО) стали [1, 2]. ДУО стали содержат частицы оксида нанометрового размера высокой плотности, обогащенные иттрием, кислородом, марганцем, хромом и кремнием. Эти частицы играют решающую роль в увеличении прочности материала и улучшении радиационной стойкости – закреплении дислокаций. Однако существующая порошковая технология изготовления ДУО сталей является трудоемкой и дорогостоящей. Поэтому в данной работе изучена возможность получения ДУО сталей с равномерным распределением частиц по всему объёму альтернативным методом – вакуумно-дуговым переплавом (ВДП).

## 2. ОПИСАНИЕ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ, ЛЕГИРОВАННОЙ ОКСИДНЫМИ НАНОПОРОШКАМИ

Использованная схема получения ДУО сталей с помощью дугового переплава в объеме жидкого металла с распределенными в нём нано- или микро-дисперсными частицами  $ZrO_2$  приведена на рис. 1. По этой схеме кристаллизатор изготовлен из медного сплава и представляет собой стакан диаметром 0,06 м. Кристаллизатор, охлаждаемый водой и помещенный в нержавеющий корпус, является анодом. В него вводится стальной цилиндрический катод диаметром 0,03 м, в котором перпендикулярно его оси, равномерно по азимуту и по длине просверлены

цилиндрические отверстия диаметром 0,003...0,005 м, плотно заполненные дисперсными частицами оксида и закупоренные изготовленными из такой же стали пробками. Между анодом и катодом зажигается и поддерживается электрическая дуга. Поддержание горения дуги осуществляется за счет плавления катода, а также медленного перемещения его вверх вдоль оси стакана.

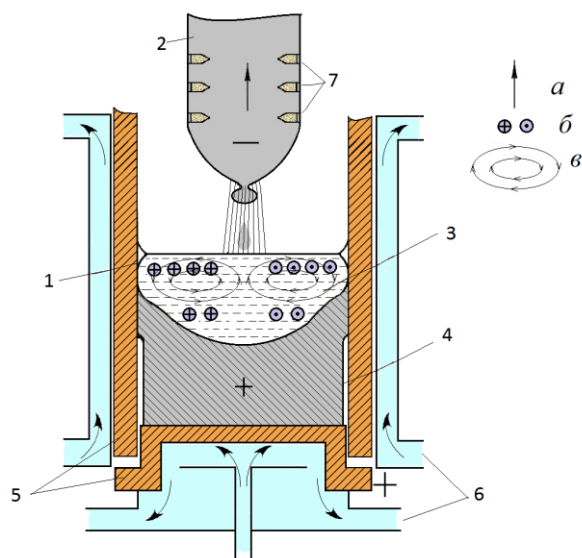


Рис. 1. Движение жидкого металла при наплавлении слитка в вакуумной дуговой печи (а – направление электрического тока; б – круговое движение металла в горизонтальной плоскости; в – движение металла в вертикальной плоскости):

- 1 – корона; 2 – расплавляемый электрод (катод);  
 3 – жидкий металл; 4 – слиток; 5 – медный кристаллизатор (анод); 6 – охладитель (вода);  
 7 – полости с легирующей добавкой

Стекающий по поверхности электрода расплав стали захватывает частицы оксидов, которые вымываются на поверхность капли, удерживаемой на торце электрода силами поверхностного натяжения. При превышении критической массы капли происходит её отрыв и падение на поверхность расплава с

образованием горизонтального цилиндрического слоя расплавленного металлического композита в виде жидкой ванны. Плавка ведется в вакууме около  $10^{-3}$  Па; при этом дно и внутренняя стенка медного водоохлаждаемого кристаллизатора способствуют быстрой кристаллизации расплава.

Рассмотрим процессы, протекающие в зоне жидкого расплава металла.

В описанных экспериментальных условиях число Рэлея отрицательно и, казалось бы, не может формироваться конвективная ячейка, так как все возмущения должны затухать [3]. Однако, как следует из экспериментальных [4-5] и теоретических данных [6], образование конвективных ячеек инвариантно от способа подогрева слоя жидкости: процесс наблюдается как при подогреве снизу ( $R > 0$ ), так и при подогреве сверху ( $R < 0$ ).

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что в цилиндрическом стакане созданы условия для формирования цилиндрической конвективной ячейки в виде жидкой ванны [7]. Как показано [7], вязкая несжимаемая жидкость в такой ячейке (жидкой ванне) осуществляет конвективное движение, при котором жидкость движется вверх вблизи оси ячейки и вниз на ее внешней границе. Это конвективное движение наиболее эффективно (равномерно) перемешивает частицы оксида, так как охватывает всю внутреннюю область ячейки.

Установлено, что в результате хемосорбции воды из окружающего пространства в наночастицах диоксида циркония в тонком граничном слое также обнаружены химические соединения  $Zr_xO_yH_z$  [8]. Наличие связанной воды на поверхности наночастиц диоксида циркония может приводить к образованию тонкой пленки оксида железа, что делает возможным выделение второй фазы в жидком расплаве железа. Образование этой пленки препятствует возникновению конгломератов. Это обстоятельство также способствует равномерному распределению диоксида циркония в расплаве.

### 3. КОНВЕКТИВНАЯ ЯЧЕЙКА В ЖИДКОЙ ВАННЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ В НЕЙ

Для определения влияния конвективных потоков на механическое перемешивание ультрадисперсных частиц опишем их распределение внутри ячейки жидкой ванны.

Согласно [7] распределение по координатам  $r, z$  возмущений вертикальной  $v_z(r, z)$  и горизонтальной  $v_r(r, z)$  скоростей в аксиально-симметричной цилиндрической ячейке имеет вид:

$$\begin{aligned} v_z(r, z) &= A \cdot \sin(\pi z) \cdot J_0(k_r r), \\ v_r(r, z) &= -A\pi k_r^{-1} \cdot \cos(\pi z) \cdot J_1(k_r r), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $r$  и  $z$  – безразмерные на глубину слоя поперечная и продольная координаты ячейки соответственно;  $J_n(x)$  – функции Бесселя первого рода  $n$ -го порядка от аргумента  $x$ ;  $k_r = \sigma_{1,i} R_c^{-1}$  – радиальное волновое число, характеризующее зависимость воз-

мущений от координаты  $r$ ,  $R_c$  – радиус конвективной ячейки,  $\sigma_{1,i}$  –  $i$ -й нуль функции Бесселя первого рода первого порядка ( $J_1(\sigma_{1,i}) = 0$ ),  $i=1,2,3, \dots$ . Для справки приведем значения первых пяти нулей функции Бесселя  $J_1(x)$ :  $\sigma_{1,1} = 3,832$ ;  $\sigma_{1,2} = 7,016$ ;  $\sigma_{1,3} = 10,173$ ;  $\sigma_{1,4} = 13,324$ ;  $\sigma_{1,5} = 16,471$  [9].

На рис. 2 изображены изолинии проекций скоростей (в относительных единицах) в конвективной ячейке, описываемые решениями (1). Из рисунка следует, что в отличие от ячейки прямоугольной геометрии [3] максимальное значение модуля вертикальной скорости цилиндрической ячейки  $|v_z/A|$  на оси больше его значения на внешней границе при  $r = R_c$ , а максимумы радиальной скорости  $|v_r/A|$  на нижней и верхней границах ячейки равны и одинаково смещены к ее оси.

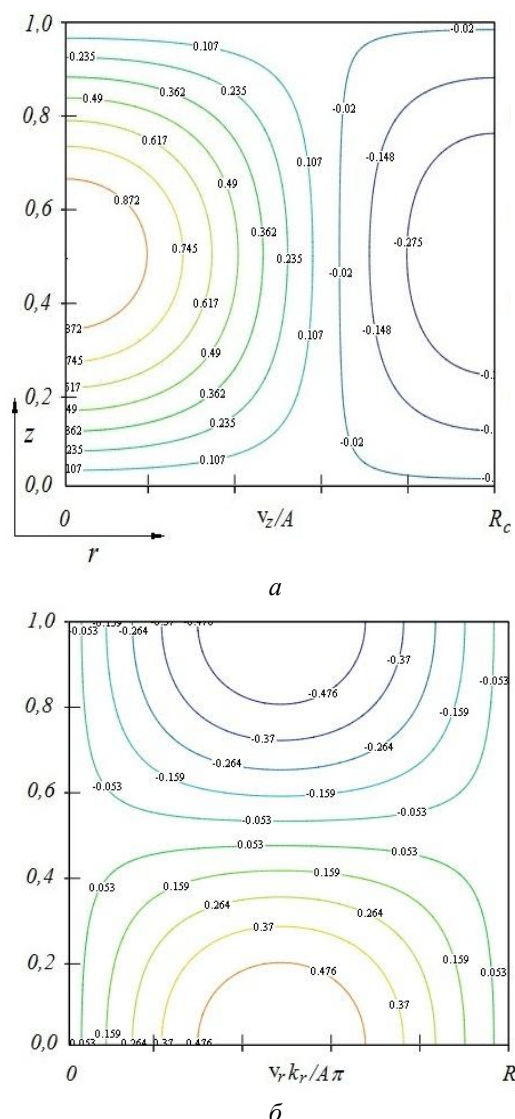


Рис. 2. Изолинии относительных проекций скоростей в конвективной ячейке (обозначены на линиях цифрами): а – вертикальной  $v_z/A$  и б – радиальной  $v_r/A$

В жидких средах конвективное движение направлено вверх в центре ячейки и вниз на периферии (см. рис. 2).

Экспериментально установлено, что отношение диаметра конвективной ячейки к глубине слоя жидкости оказывается порядка 3 [10, 11].

#### 4. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ $ZrO_2$ НА РАВНОМЕРНОСТЬ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЪЕМЕ ОБРАЗЦА

Рассмотрим процесс выплавки ДУО стали на примере распределения в объеме переведенной в жидкое состояние нержавеющей стали 08X18H10T нано- или микродисперсных включений из диоксида циркония ( $ZrO_2$ ). Нержавеющая сталь 08X18H10T выбрана в качестве модельного материала для отработки технологии получения ДУО стали, но при соблюдении определенных требований к металлу может быть использована для получения твэльных труб активной зоны реактора.

При рассмотрении считаем, что:

1 – вводимые наночастицы не растворяются в нержавеющей стали;

2 – образуется поверхностная пленка вокруг частиц или их конгломератов;

3 – так как сталь 08X18H10T +  $ZrO_2$  образует новую фазу в чистом расплаве металла, будем считать граничные условия для конвективной ячейки свободными, т. е. на границах ячейки отсутствуют касательные напряжения  $\tau$ .

В жидком состоянии при температуре 1450...1600 °C плотность стали порядка  $\rho_l = 7,27 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а ее кинематическая вязкость порядка  $\nu = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с [12]. В указанном диапазоне температур нано- или микродисперсные включения  $ZrO_2$  в жидком металле будут находиться в твердой фазе, так как температура их плавления составляет величину порядка (0,75...1)·2700 °C [13, 14], что заведомо превышает температуру плавления нержавеющей стали. Плотность нано- или микродисперсных частиц  $ZrO_2$  изменяется в диапазоне  $\rho_p = (5,7...5,4) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> с увеличением температуры: от комнатной до температуры плавления, что меньше плотности жидкой стали.

По нашим предположениям, твердые нанодисперсные частицы  $ZrO_2$  образуют дисперсный раствор в жидкой стали. Это означает, что вокруг этих частиц образуется смачивающая поверхностная пленка жидкого металла.

Поскольку вес частицы  $ZrO_2$  легче веса вытесненного ею жидкого металла, в отсутствие конвективного движения они будут выталкиваться вверх архимедовой силой  $F_A = \rho_l g V_p$  из объема жидкого металла, где  $V_p$  – объем частицы,  $g$  – ускорение свободного падения. Для упрощения оценки скорости перемещения нано- или микрочастиц  $ZrO_2$  в жидком металле полагаем, что они имеют сферическую форму. Кроме выталкивающей силы на частицу будут действовать силы тяжести  $F_g = -\rho_p V_p g$  и трения (сила Стокса)  $F_S = -6\pi r_p \eta \bar{v}_p$ , направленные вниз. Здесь  $r_p$  – радиус сферической частицы;  $\eta = \rho_l \nu$  – динамическая вязкость жидкости

( $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости);  $\bar{v}_p$  – результирующая скорость частицы. Из баланса действующих на частицу сил следует выражение для определения скорости движения частицы  $ZrO_2$  в покоящемся жидком металле:

$$\bar{v}_p = \frac{2}{9} \frac{r_p^2 g}{\nu} \left( \frac{\rho_l - \rho_p}{\rho_l} \right). \quad (2)$$

Из (2) следует, что скорость всплытия пропорциональна квадрату радиуса частицы. В движущейся со скоростью  $\bar{v}_l$  жидкости скорость перемещения частицы будет определяться суммой векторов скоростей:  $\bar{v}_p \cdot \bar{e}_z + \bar{v}_l$ . В частном случае, когда  $\bar{v}_l = -\bar{v}_p \cdot \bar{e}_z$ , частица будет находиться в состоянии покоя.

Если такую частицу поместить в конвективную ячейку (1) со скоростью движения жидкости  $\bar{v}(r, z) = \bar{e}_z \cdot v_z(r, z) + \bar{e}_r \cdot v_r(r, z)$  (значения проекций скорости изображены на рис. 2), то результирующее расположение частиц в ячейке будет зависеть от их размера.

Обоснуем это утверждение.

Первоначально введенные с каплями жидкого металла частицы диоксида циркония будут распределяться вблизи оси ячейки и переноситься конвективным потоком вверх со скоростью  $v_z(0, z) + \bar{v}_p$ , затем – от центра ячейки к стенке кристаллизатора со скоростью  $v_r(r, 1 - \Delta h < z < 1)$ , а вблизи стенки кристаллизатора – вниз со скоростью  $v_z(R_c - \Delta R < r < R_c, z) - \bar{v}_p$ , где  $\Delta R \ll R_c$  и  $\Delta h \ll 1$ . Из выражения для вертикальной скорости в конвективной ячейке (1) следует, что вблизи радиуса  $r = r_0 = R_c \sigma_{0,i} \sigma_{1,i}^{-1}$  вертикальная скорость равна нулю, и воздействие выталкивающей силы Архимеда максимально. Поэтому для определения перемещения частицы диоксида циркония в окрестности этой точки в поле скоростей  $v_z(r, z)$  и  $v_r(r, z)$  сравним скорость ее всплытия с горизонтальной скоростью. Такое сравнение в соответствии с выражением (2) позволит определить размеры микро- и наночастиц, при которых возможно их равномерное распределение в объеме ячейки. Критерий равномерного распределения частичек диоксида циркония в объеме ячейки имеет вид:

$$r_p < 10^{-2} \sqrt{v_c \frac{9\nu \Delta l}{2g R_c} \frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_p}}, \text{ м}, \quad (3)$$

где  $v_c \approx 10^{-2}$  м/с – экспериментально измеренная максимальная скорость перемещения жидкого металла на верхней горизонтальной поверхности ячейки;  $\Delta l$  – среднее расстояние между микро- и наночастицами. Расчеты показывают, что величина  $\Delta l$  для частиц размером менее 17...20 нм определяется величиной порядка  $10^{-8}$  м.

Из выражения (3) следует, что сферические частички с радиусом  $r_p$ , удовлетворяющим неравен-

ству, будут равномерно распределены по объему конвективной ячейки.

В условиях эксперимента все нано- или микро-частицы  $ZrO_2$  вместе с жидким материалом катода будут поступать (впрыскиваться) в объем ячейки, условно отмеченный серым прямоугольником в верхнем левом углу ячейки (рис. 3). Затем попавшие в жидкий металл ячейки частицы будут перемещаться с линиями тока внутрь ячейки (линии *II*) или к стенке кристаллизатора (линии *I*).

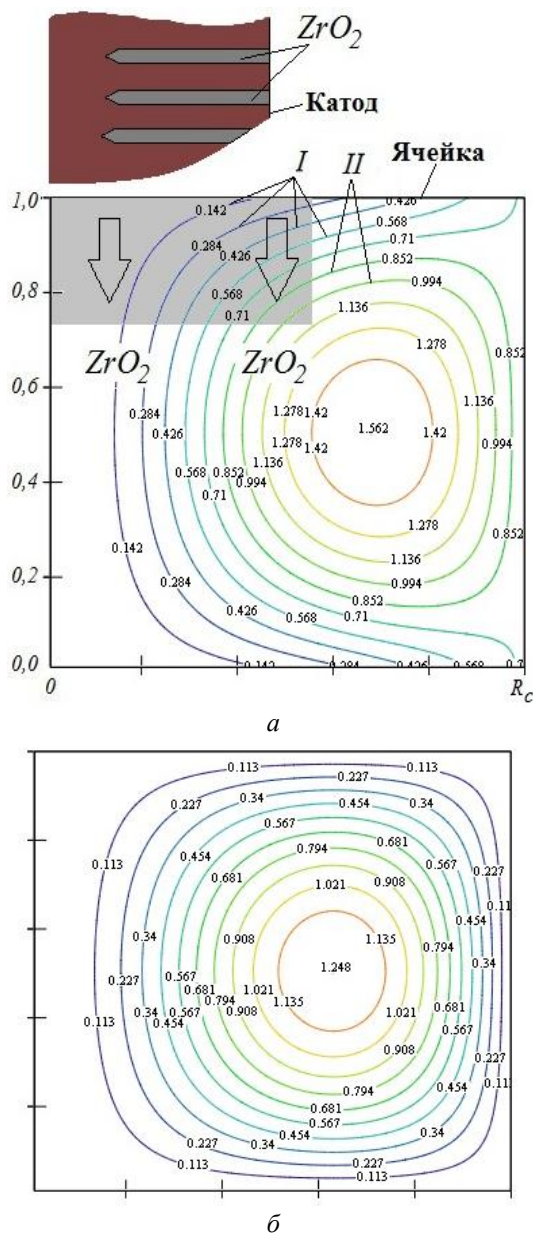


Рис. 3. Линии тока внутри конвективной ячейки:  
а – с добавлением  
и б – без добавления частиц  $ZrO_2$

В экспериментальных условиях частицы  $ZrO_2$  вместе с расплавленным в электрической дуге металлическим катодом после капельного стекания в ячейку, вблизи ее оси, будут подхвачены конвективным потоком и двигаться к ее верхней границе. Затем вблизи верхней границы ячейки частицы на линиях тока *I* будут переноситься горизонтальным конвективным потоком к стенке кристаллизатора, а

частицы на линиях тока *II* также будут сноситься этим потоком в направлении стенки кристаллизатора и далее по этим же линиям тока будут распределяться внутри ячейки (см. рис. 3,а).

Для сравнения на рис. 3,б показаны линии тока внутри конвективной ячейки без добавления частиц  $ZrO_2$ . Также на рисунке видно, что все линии тока замкнуты и не пересекаются со стенками ячейки.

Оценка неравенства (3) для экспериментальных условий показывает, что частицы  $ZrO_2$  с размерами  $r_p < 80...100$  нм будут равномерно распределены по объему слитка, в то время как для частиц с размером порядка и более 150 нм должен наблюдаться интенсивный вынос их на его боковую поверхность.

Исходя из вышеизложенного можно сформулировать следующие выводы:

- чем глубже проникает материал катода в ячейку (чем меньше ордината нижней стороны серого прямоугольника (см. рис. 3)), тем равномернее распределяются частицы  $ZrO_2$  в объеме ячейки;
- для частиц  $ZrO_2$  с размерами менее 80...100 нм должно наблюдаться равномерное распределение в объеме образца.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДУО СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВА

В ННЦ ХФТИ методом ВДП была получена партия слитков из стали 08X18H10T с различной концентрацией нанолегирующей добавки  $ZrO_2$ , стабилизированной оксидом иттрия  $Y_2O_3$  с размерами частиц 30...50 нм (рис. 4, 5) [15]. Вес слитков 1800...2600 г.



Рис. 4. Слитки стали 08X18H10T ВДП с концентрацией добавки  $ZrO_2+Y_2O_3$  0,02 и 0,2 вес.% и слиток без добавок

На слитках проводились анализ элементного состава, металлографические исследования структуры литого и деформированного материалов, а также изучались механические свойства чистой и легированной стали. Полученные результаты сравнивались с серией слитков, где размер легирующих частиц  $ZrO_2+Y_2O_3$  составлял 100...150 нм [16, 17]. На образцах, вырезанных из середины слитка, определялся элементный состав.



Рис. 5. Макроструктура слитка стали 08X18H10T с 0,02 вес.% ZrO<sub>2</sub>+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Приведены результаты анализа элементного состава слитков, который проводился по возбуждаемому протонами характеристическому рентгеновскому излучению на аналитическом ядерно-физическом комплексе (АЯФК) «Сокол» ННЦ ХФТИ [16] (рис. 6,а,б) и методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на лабораторном энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре ElvaX (компании «Элватех») (рис. 6,в).

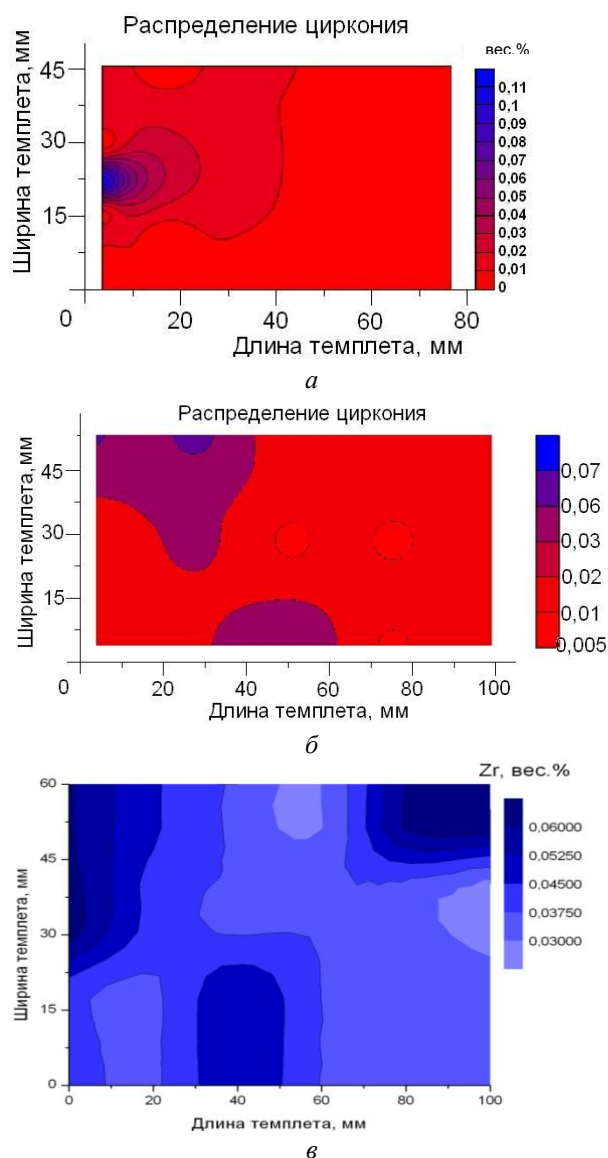


Рис. 6. Распределение циркония по сечению слитков с разными размерами легирующих частиц: а – 100...150 нм; б – 50 нм; в – 30 нм

Сравнивая с результатами выплавки с легирующими частицами размером 100...150 нм [16], где концентрация колебалась в пределах 0,01...0,11 вес.%, мы можем увидеть значительное улучшение в равномерности распределения циркония по слитку. Предполагая, что цирконий связан в оксиде, можно говорить о более равномерном распределении упрочняющих оксидных частиц по массиву слитка.

На литой и деформированной структуре проводили металлографические исследования. Твердость, замеренная на темплетах из чистой нержавеющей стали и на легированном материале, существенно не отличается и составляет  $HV \approx 170$  кгс/мм<sup>2</sup>.

На образцах из стали 08X18H10T с добавкой ZrO<sub>2</sub> в виде проката толщиной 0,5 мм провели микроструктурный анализ. Образцы дополнительно отжигали при 1050 °С в течение 1 ч с охлаждением на воздухе. Результаты анализа показаны в таблице.

Номер образца	ZrO <sub>2</sub> , вес.%	Балл нв	Балл зерна	$d_{cp}$ , мкм	Hц, кг/мм <sup>2</sup>
0	0	1	5	63	180
1	0,02	1	6	49	200
2	0,2	1,5	8	21	206

Для подготовки шлифов использовался металлографический комплекс оборудования компании ЛЕСО. Микротвердость Hц измерялась на цифровом микротвердометре марки LM-700AT при нагрузке 25 г. Средний размер зерен ( $d_{cp}$ ) определялся по ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна». Балл неметаллических включений (Балл нв) определялся по ДСТУ 3295-95 «Труби сталеві. Металографічний метод визначення забрудненості металу неметалевими включеннями». Элементный анализ проводился на деформированных образцах методом РФА на спектрометре ElvaX.

Образцы имеют однородную микроструктуру с множественными двойниками, типичную для аустенитных сталей. С внесением диоксида циркония микротвердость повышается на 10% по сравнению с исходным материалом. При этом с увеличением концентрации добавок значительно уменьшается средний размер зерен. Так в образцах с 0,2 вес.% ZrO<sub>2</sub> размер зерен в три раза меньше, чем в чистой стали 08X18H10T (рис. 7).

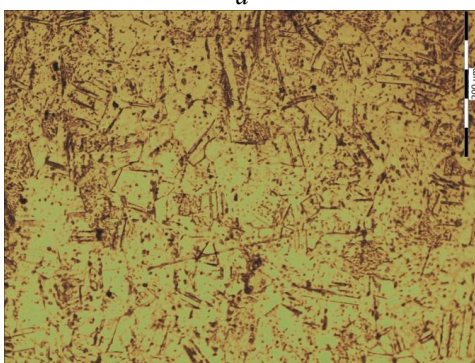
Полученные результаты согласуются с высказанным в разд. 4 предположением о влиянии величины нанолегирующих оксидов. При легировании ZrO<sub>2</sub> с размерами частиц 30...50 нм возможно получить равномерное распределение добавки, которая влияет на однородность структуры материала, что неосуществимо при размере частиц 100...150 нм.

В слитках с добавкой частичек оксидов размером 100...150 нм наблюдалась значительная разнородность структуры стали с размерами зерен 20...150 мкм. К тому же проведенные на деформированных образцах механические испытания пока-

зали, что при увеличении концентрации легирующей добавки прочностные характеристики оставались на уровне нелегированной стали. При этом отмечалась тенденция к снижению значений пределов прочности и текучести легированной добавками  $ZrO_2$  стали при 20 °С по сравнению с исходной [17].



*a*



*б*

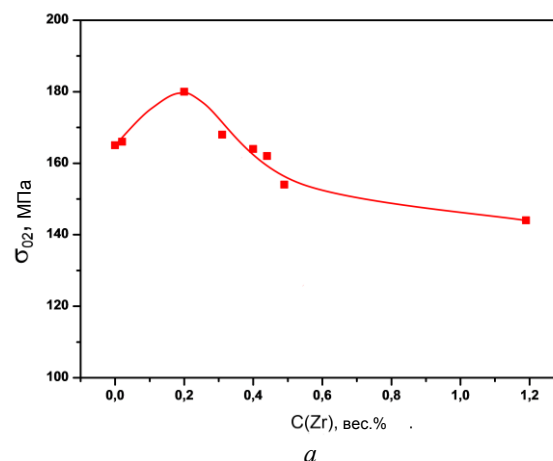
*Рис. 7. Микроструктура стали 08X18H10T без добавок (а) и с добавкой 0,2 вес.%  $ZrO_2$  (б)*

На рис. 8 приведены результаты исследований механических свойств стали 08X18H10T с различной концентрацией добавки  $ZrO_2$  с размерами частиц 50 нм на холоднокатаных образцах, предварительно отожженных в вакууме при  $T = 1050$  °С 60 мин, с остыванием на воздухе. Испытания проводились на сервогидравлической испытательной системе NANO при 20 °С со скоростью деформирования 2 мм/мин в соответствии с ГОСТ 1497-84.

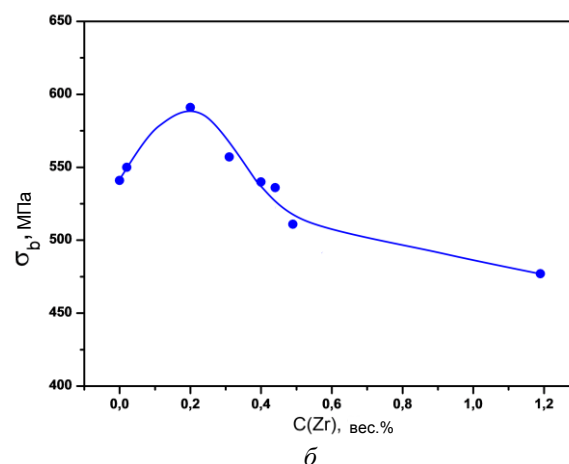
Из этого рисунка следует, что в области концентраций добавки  $ZrO_2$  в стали до 0,3 вес.% наблюдается повышение значений предела прочности по сравнению с исходной 08X18H10T.

Для нелегированной стали предел прочности составляет 540 МПа, а при концентрации  $ZrO_2$  0,2 вес.% прочность стали увеличивается до 590 МПа. Также наблюдается увеличение значений предела текучести в этой области. С дальнейшим ростом концентрации добавки  $ZrO_2$  до 1,2 вес.% значения пределов прочности и текучести снижаются. Значения относительного удлинения уменьшаются с ростом концентрации легирующей добавки. При достижении концентрации 1,2 вес.%  $ZrO_2$  относительное удлинение снижается на 18% по сравнению с исходной сталью. Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что при концентрации добавок  $ZrO_2$  выше 0,4 вес.% происходит ухудшение механических свойств легированной

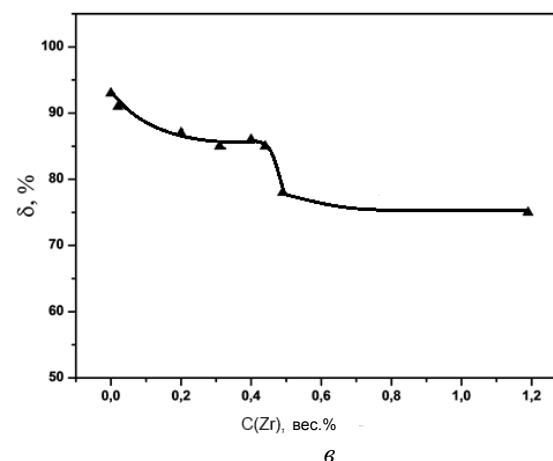
стали, что, по-видимому, связано с укрупнением конгломератов оксидных частиц на границах зерен [18].



*a*



*б*



*в*

*Рис. 8. Механические свойства стали 08X18H10T с различной концентрацией добавки  $ZrO_2$  при 20 °С: а – предел прочности; б – предел текучести; в – относительное удлинение*

## ВЫВОДЫ

1. Методом ВДП получена аустенитная сталь 08X18H10T, легированная наноструктурным оксидом циркония.

2. Оптимизированы температурные и токовые параметры дугового переплава получения дисперсно-упрочненного сплава на основе нано- или микро-дисперсных частиц  $ZrO_2$ .

3. Теоретически исследовано влияние режимов выплавки и размера легирующих частиц на распределение диоксидов циркония в слитке стали 08X18H10T. Показано, что наноразмерные частицы  $ZrO_2$  более равномерно распределяются в объеме расплава, чем конгломераты  $ZrO_2$  микронных размеров.

4. Исследованы влияния легирования оксидом циркония на размеры зерен и неметаллических включений, микротвёрдость и механические свойства стали 08X18H10T.

5. Исследования механических свойств легированной оксидом циркония стали 08X18H10T показали, что в области концентраций частиц  $ZrO_2$  до 0,3 вес.% наблюдается повышение значений пределов прочности и текучести по сравнению с исходной сталью. При концентрациях легирующих частиц  $ZrO_2$  выше 0,4 вес.% происходит снижение механических свойств стали. Дальнейшие исследования и определение оптимальной концентрации легирующих частиц  $ZrO_2$  в стали 08X18H10T следует проводить в области концентраций 0,1...0,2 вес.%.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. S.V. Rogozhkin, A.A. Aleev, A.G. Zaluzhnyi, A.A. Nikitin, N.A. Iskandarov, P. Vladimirov, R. Lindau, A. Moeslang. Atom probe characterization of nano-scaled features in irradiated ODS Eurofer steel // *Journal of Nuclear Materials*. 2011, v. 409, p. 94-99.
2. S.V. Rogozhkin, A.A. Nikitin, A.A. Aleev, A.B. Germanov, A.G. Zaluzhnyi. Atom probe study of radiation induced precipitates in Eurofer 97 Ferritic-Martensitic steel irradiated in BOR-60 reactor // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2013, v. 4, Issue 2, p. 112-118.
3. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. *Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости*. М: «Наука», 1972, с. 393.
4. S. Leibovich. The Form and Dynamics of Langmuir Circulations // *Ann. Rev. Fluid Mech*. 1983, v. 15, p. 391-427.
5. С.В. Рянжин, Н.В. Кочков, Л.Н. Карлин. Загадочные циркуляции // *Природа*. 2008, №4, с. 16-23.
6. И.М. Неклюдов, Б.В. Борц, В.И. Ткаченко. Описание ленгмюровских циркуляций упорядоченным набором конвективных кубических ячеек // *Прикладная гидромеханика*. 2012, т. 14(86), №2, с. 29-40.
7. Л.С. Бозбей. Элементарная конвективная ячейка в слое несжимаемой, вязкой жидкости // *Конференция молодых ученых и специалистов, ИПМаш НАН Украины*. Харьков, 2013, с. 29.
8. В.А. Кутовой, Ю.Г. Казаринов, А.С. Луценко, А.А. Николаенко, В.И. Ткаченко. Термовакuumный метод получения нанодисперсных материалов // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2014, №2, с. 153-157.
9. Royal Society Mathematical Tables: V. 7. Bessel functions, P. III. Zeros and associated values. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1960. Русский перевод: *Таблицы нулей функций Бесселя*. М.: «ВЦ АН СССР», 1967 (БМТ, в. 44).
10. М. Ван-Дайк. *Атлас течения жидкости и газов*. М.: «Мир», 1986, с. 184.
11. Е.Д. Эйдельман. Влияние толщины слоя жидкости на соотношение размеров ячейки конвекции // *Журнал технической физики*. 1996, т. 68, №11, с. 7-11.
12. *Таблицы физических величин* / Ред. И.К. Кикоин. М.: «Атомиздат», 1976, 1008 с.
13. Ю.Е. Шелудяк, Л.Я. Кашпоров и др. *Термофизические свойства компонентов горючих систем*. М.: «Москва», 1992, 184 с.
14. Э.Л. Нагаев. Малые металлические частицы // *УФН*. 1992, т. 162, №9, с. 49-124.
15. В.М. Ажажа, Б.В. Борц, А.Ф. Ванжа, Э.П. Шевякова, Н.Д. Рыбальченко. Возможности применения редкоземельных материалов при создании конструкционных материалов для атомной промышленности Украины // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2008, №1, с. 195-201.
16. И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин, Б.В. Борц, В.В. Левенец, А.Ф. Ванжа, А.П. Омельник, А.А. Щур. Исследование распределения элементов в экспериментальных слитках ДУО стали методом индуцированной протонами рентгеновской спектроскопии // *Физика и химия обработки материалов*. 2011, №4, с. 92-98.
17. В.М. Аржавитин, Б.В. Борц, А.Ф. Ванжа, И.М. Короткова, В.И. Сытин. Исследование влияния легирования наноструктурными оксидами  $ZrO_2$  на свойства стали X18H10T // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2013, №5, с. 58-62.
18. В.Н. Воеводин Ю.Б. Заславский, В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, А.В. Рабинович, Б.П. Черный. Разработка и исследование радиационно-стойких хромоникелевых сталей, легированных скандием // *Проблемы специальной электрометаллургии*. 1995, №1, с. 47-55.

Статья поступила в редакцию 25.06.2014 г.

## **ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ДИСПЕРСНО-ЗМІЦНЕНИХ ОКСИДАМИ (ДЗО) СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ПЕРЕПЛАВУ**

*Б.В. Борц, О.Ф. Ванжа, І.М. Короткова, В.І. Ситін, В.І. Ткаченко*

Розглянута можливість отримання дисперсно-зміцненої наноструктурними оксидами цирконію сталі 08X18H10T методом вакуумно-дугового переплаву. Теоретичними і експериментальними методами досліджено вплив режимів виплавки та розміру легуючих частинок на розподіл оксидів цирконію в зливку сталі 08X18H10T. Досліджено вплив легування оксидами цирконію на розміри зерен і неметалевих включень, мікротвердість і механічні властивості сталі 08X18H10T. Показано, що зменшення розміру часток оксидів цирконію призводить до більш рівномірного розподілу їх в обсязі розплаву.

## **RESEARCH OPPORTUNITIES CASTING OF OXIDE DISPERSION STRENGTHENED (ODS) STEELS BY THE METHOD OF VACUUM ARC RE-MELTING**

*B.V. Borts, A.F. Vanzha, I.M. Korotkova, V.I. Sitin, V.I. Tkachenko*

The paper considers the production of dispersion-strengthened by nanostructural zirconium oxides steel 08Cr18Ni10Ti by the method of vacuum-arc re-melting. Influence of the regimes of melting and of the size of alloying particles on distribution of zirconium oxide in the ingot of steel 08Cr18Ni10Ti is investigated by theoretical and experimental methods. Influence of alloying by zirconium oxides on the size of grains and non-metallic inclusions, microhardness and mechanical properties of steel 08Cr18Ni10Ti is investigated. It is shown, that decrease of zirconium oxide grains size results in more even distribution of particles in the melt volume.