

ную точность измерения ключевого параметра  $SM$  квадрата синуса угла Вайнберга.

### Литература

1. Babich, A. A. New physics signatures at a linear collider: Model independent analysis from conventional polarized observables/ A. A. Babich, P. Osland, A. A. Pankov, N. Paver // Phys. Lett. B. – 2001. – 518. – PP.128–136.

2. Pankov, A. A. High-precision limits on  $W$ – $W'$  and  $Z$ – $Z'$  mixing from diboson production using the full LHC Run 2 ATLAS data set / A. A. Pankov, P. Osland, I. A. Serenkova, V. A. Bednyakov // Eur. Phys. J. C. – 2020. – 80, no.6, – PP. 503–525.

**Н. А. Селиверстов**

(ГГТУ имени П. О. Сухого, Гомель)

Науч. рук. **Д. Г. Кроль**, канд. физ.-мат. наук, доцент

### СТРУКТУРА ИЗОЛИНИЙ ПАРАМЕТРОВ НАЧАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ НОСИКА ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ

Важное место в изучении роста кристалла из переохлажденного расплава чистого вещества занимает изучение морфологических свойств фронта кристаллизации и возникновение боковых ветвей дендрита. Современное состояние теоретических и экспериментальных исследований этой проблемы представлено в работах [1, 2]. В данной работе рассматривается класс поверхностей роста, скорость перемещения которых зависит только от локальной формы этой поверхности. Предвестниками неустойчивости макроскопических форм поверхности роста служат изломы, изгибы, складки, генерирующие возмущение кривизны исходной поверхности. Цель работы: проанализировать устойчивость / неустойчивость начального состояния дендрита.

Рассмотрим двухмерный плоский случай. Фазовую границу кристаллизации (ФГК) моделируем плоской линией сильного разрыва  $x - F(y, t) = 0$ . Средняя кривизна этой границы равна  $K = (\partial^2 F / \partial y^2) / G^3$ ,  $G = (1 + (\partial F / \partial y)^2)^{1/2}$ . Направление оси  $x$  совпа-

дает с осью симметрии и направлена в сторону твердой фазы;  $y$  – поперечная декартова ось. Важную роль имеет угол  $\theta$ , образованный нормалью  $\mathbf{n}$  границы с осью  $X$ :  $\cos\theta = 1/G$ . На вершине ФГК  $\partial F/\partial y = 0$ ,  $\cos\theta = 1$ . По мере удаления от вершины  $\cos\theta$  монотонно убывает:  $\cos\theta \rightarrow 0$ ,  $\theta \rightarrow \pi/2$ . На фазовой границе кристаллизации имеем следующие три условия: баланс энергии, являющийся следствием интегрального закона сохранения энергии; кинетическая связь  $|N| = \mu(T_e - T_j)$ ,  $T_e = T_c[1 - (UK/L)]$ , определяющая нормальный механизм роста из расплава. Здесь  $T_e$  – температура равновесия между твердой и жидкой фазами. Связь между равновесным значением температуры  $T_c$  и отклонением температуры кристалла  $T_j$  запишем в следующей форме:  $(T_c - T_j) = (\cos\theta)^\delta B$ ,  $\delta > 0$ , где  $B \equiv \text{const}$  либо  $B = B(t)$ ,  $t \geq 0$ . Параметр  $\delta$  характеризует неоднородность переохлаждения на ФГК. Далее берем  $\delta = 3$ . Уравнение роста  $N \equiv (\partial F/\partial t)/G = -\mu(T_e - T_j)$  с учетом записанных выше соотношений принимает вид:

$$\partial^2 F/\partial y^2 = \alpha B + \varphi(\partial F/\partial t)[1 + (\partial F/\partial y)^2], \quad \alpha = L/(UT_c), \quad \varphi = \alpha/\mu. \quad (1)$$

Для уравнения (1) в работе [3] построен плоский стационарный контур, скорость перемещения которого не зависит от времени:

$$F(y,t) = A_1 t + A_2(y), \quad A_1 \equiv \text{const} < 0, \quad (2)$$

Линеаризация на этом решении  $F(y,t) = A_1 t + A_2(y) + f(y,t)$  дает уравнение для малого возмущения стационарного контура. Его решение строим в виде

$$f(y,t) = [B_2(y)\sin kt + D_2(y)\cos kt]\exp(rt), \quad t \geq 0; \quad r < 0, \quad k \geq 0, \quad y \geq 0, \quad (3)$$

$$B_2(y) = (C_1 \cos Z_2 y + C_3 \sin Z_2 y)\exp(yn_1) + (C_2 \cos Z_2 y + C_4 \sin Z_2 y)\exp(-yn_1);$$

Подробные формулы расчета здесь не приводятся. Были изучены следующие параметры начального состояния возмущенного носика дендрита: возмущение угла заострения  $\delta\theta_1 = D_2^1$ ; этот термин мы применяем для краткости: строго говоря, здесь вычисляется возмуще-

ние  $\text{ctg}\theta_1$ ; возмущение кривизны  $\delta K = \varphi(kB_2^0 + rD_2^0)$ ; возмущение угловой скорости касательной к линии роста  $\delta\omega = kB_2^1 + rD_2^1$ ; возмущение углового ускорения касательной к линии роста  $\delta\varepsilon = 2krB_2^1 + (r^2 - k^2)D_2^1$ .

Расчеты выполняли для трех значений переохлаждения расплава  $\Delta T$  при различающихся друг от друга начальных состояниях носика (параметр  $D_2^0$ ). На рисунках 1, 2 для никеля на плоскости  $(r, k)$  построены типичные изолинии перечисленных четырех возмущений.

Получены соотношения устойчивости начального состояния вершины дендрита, характеризующие взаимосвязь между режимом эволюции во времени линии роста и морфологическими свойствами возмущенной вершины. Представлена структура изолиний параметров начального состояния носика дендрита.

Данная работа выполнена в рамках НИР «Кинетика неравновесных фазовых границ и неклассические тепловые структуры при высокоскоростной кристаллизации чистых веществ» ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии». Научный руководитель проекта профессор О. Н. Шабловский.

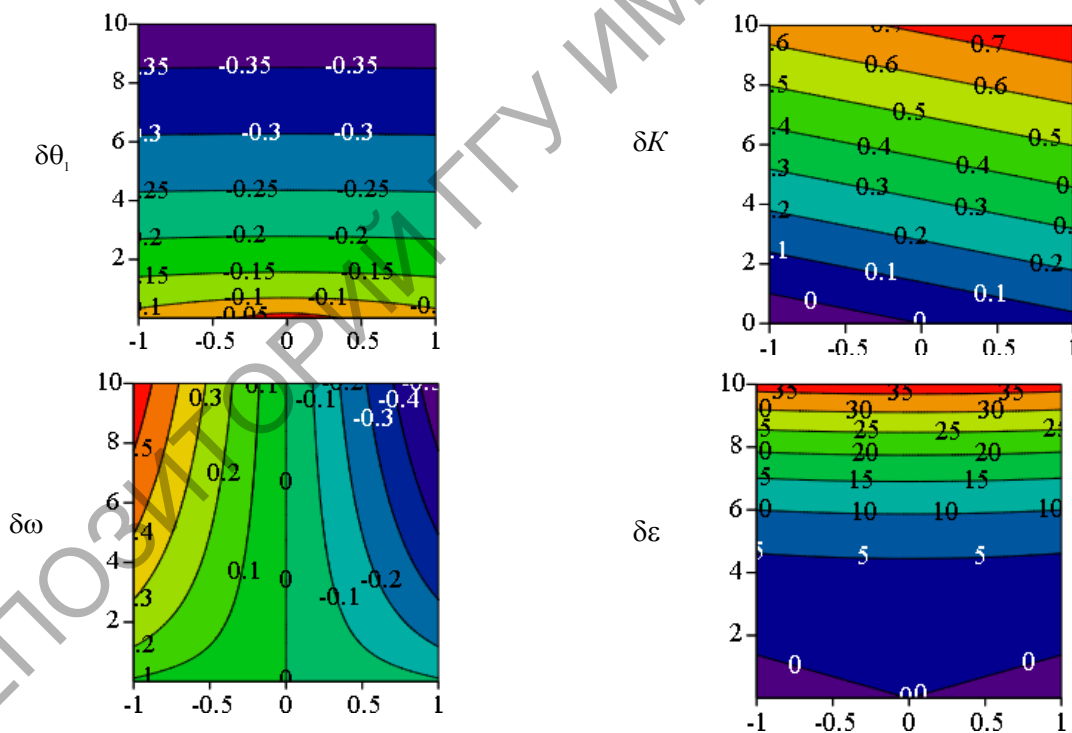


Рисунок 1 – Никель. Изолинии – на плоскости  $(r, k)$  – параметров начального состояния носика дендрита. Входные параметры:  $\mu = 9,53 \text{ м/(К} \cdot \text{с)}$ ,  $N = 5,3 \text{ м/с}$ ,  $\alpha = 6,842 \cdot 10^5 \text{ (К} \cdot \text{м)}^{-1}$ ,  $\varphi = 7,18 \cdot 10^4 \text{ с/(м}^2\text{)}$ ,  $\Delta T = 166 \text{ К}$ ,  $D_2^0 = 0,1$ ,  $B_2^0 = 0,1$

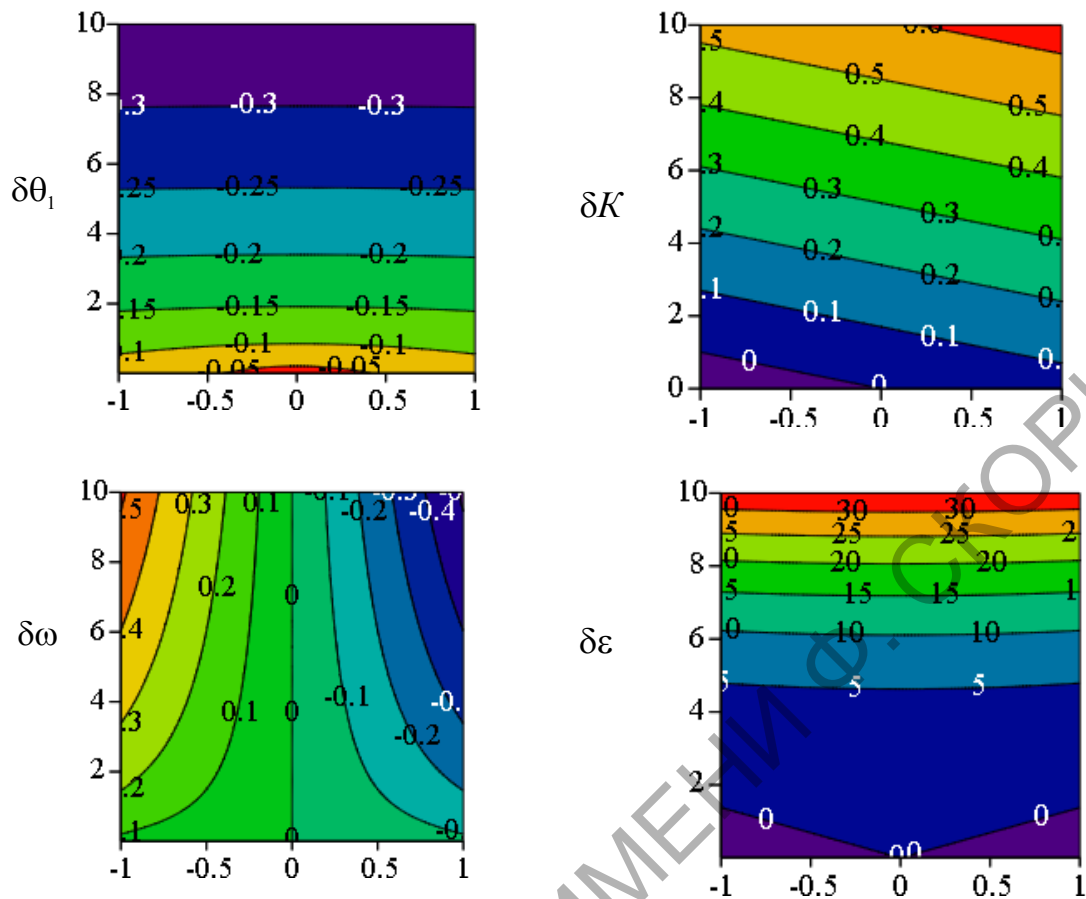


Рисунок 2 – Никель. Изолинии – на плоскости  $(r, k)$  – параметров начального состояния носика дендрита. Входные параметры:  $\Delta T = 198,2 \text{ К}$ ,  $\mu = 11,638 \text{ м/(К} \cdot \text{с)}$ ,  $N = 6,0 \text{ м/с}$ ,  $\alpha = 6,842 \cdot 10^5 \text{ (К} \cdot \text{м)}^{-1}$ ,  $\phi = 5,88 \cdot 10^4 \text{ с/(м}^2\text{)}$ ,  $D_2^0 = 0,1$ ,  $B_2^0 = 0,1$

## Литература

1. Strickland, J. On Directional Dendritic Growth and Primary Spacing – A Review / J. Strickland, B. Nanchev // Crystals. – 2020. – 10(7). – P. 627.
2. Шабловский, О. Н. Форма поверхности роста и предвестники ветвления дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль // Успехи прикладной физики. – 2018. – №4. – С. 316–324.
3. Шабловский, О. Н. Морфологические свойства линии роста двумерного дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский // Прикладная физика. – 2012. – №4. – С. 40–46.