

03;05.3;11

©1993

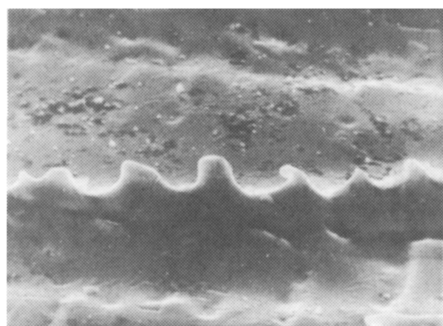
## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ РАСПЛАВА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

*В.В.Владимиров, В.Я.Порицкий, П.В.Порицкий*

1. В работе исследовано возбуждение коротковолновых периодических структур на поверхности расплава нержавеющей стали (марка 1X18H9T), полученного при электронной и ионной бомбардировках. Эта сталь (инкомель), содержащая в качестве основных примесей хром (18%) и никель (9%) при различном содержании углерода (в наших образцах 0.1%) используется при изготовлении первой стенки термоядерных реакторов-токамаков. Локальные следы оплавления, обусловленные зажиганием дуг, и периодически расположенные кратеры на поверхности остывшего оплава первой стенки и лимитеров наблюдались в различных токамаках [1].

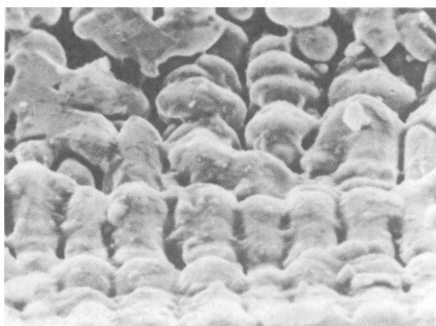
Ниже мы покажем, что возбуждение таких структур на поверхности расплава нержавеющей стали обусловлено аperiodической неустойчивостью фронта затвердевания в процессе остывания (после выключения мощности). Механизм неустойчивости связан с наличием указанных примесей и обусловлен концентрационным переохлаждением жидкой фазы (ЖФ) в процессе затвердевания [2,3]. Переохлаждение ЖФ вызвано явлением сегрегации примесей, когда в процессе затвердевания примеси вытесняются в ЖФ, а их пространственное распределение круто спадает к свободной поверхности расплава. Подробное исследование указанного выше механизма было проведено в работах [4,5] для случаев титановой и медной мишеней, содержащих различные примеси.

2. Оплавление мишеней из нержавеющей стали толщиной  $d = 0.3$  см проводилось как электронным, так и ионным ( $H^+$ ) пучком с одинаковой удельной мощностью  $\sim 6 \text{ кВт/см}^2$ . При плавлении электронным пучком мишень находилась на массивной стальной платформе и тыльная поверхность мишени не разогревалась (глубина проплавления  $h \approx 0.05$  см). В случае ионного пучка мишень была теплоизолирована (подвешивалась на тонких вольфрамовых проволочках) и тыльная часть мишени была разогрета вплоть до конца процесса затвердевания ( $t_d \approx 1700-1750$  К), при этом  $h \approx 0.1$  см. При затвердевании расплава на его поверхности



1 мкм

а



10 мкм

б

Фрагменты панорамы затвердевшего расплава при оплавлении а — электронным пучком, б — ионным пучком.

наблюдались “замороженные” коротковолновые периодические структуры с длиной волны  $\lambda = 4$  мкм при плавлении электронным пучком (рисунок, а) и  $\lambda = 18$  мкм (рисунок, а) и  $\lambda = 18$  мкм (рисунок, б) в случае ионного пучка, при этом во втором случае амплитуда структур заметно меньше. Указанные отличия основных характеристик структур связаны с различными условиями теплоотвода с тыльной стороны мишени, которые определяют величину скорости фронта затвердевания ( $v$ ) в случае тонкого расплава ( $d \gg h$ ), когда градиент температуры в ЖФ мал ввиду ее быстрого остывания [4,5]. Именно эта скорость является одной из основных величин, определяющих характеристики периодических структур на фронте затвердевания при зонной плавке [6,7]. Подчеркнем, что роль пучков сводится лишь к оплавлению поверхности мишеней.

В случае тонкого расплава величина  $v$  определяется градиентом температуры в твердой фазе ( $g_s$ ) [4,5]:  $V = \frac{\kappa g_s}{L}$ , где  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности,  $L$  — удельная теплота плавления,  $g_s = \frac{T_0 - T_d}{d - h}$ ,  $T_0$  — температура межфазной границы. Опеним значение  $v$ , учитывая, что  $\kappa = 0.35$  Дж/см·с·К,  $L = 1.9 \cdot 10^3$  Дж/см<sup>3</sup>,  $T_0 = 1811$  К. В случае а (электронный пучок,  $T_d = 300$  К)  $v = 1.1$  см/с, а в случае б

$$v = 0.06 - 0.1 \text{ см/с.}$$

Выражения для длины волны ( $\lambda_m$ ) волн затвердевания, соответствующей максимальному инкременту неустойчивости ( $\gamma_m$ ) и величины  $\gamma_m$  были получены [4,5] для случая бинарного расплава. При наличии нескольких примесей соот-

ветствующие выражения имеют вид

$$\lambda_m = 2\pi\sqrt{3} \left[ \frac{\sigma}{K_B T_0 v \sum_i C_{0i} \frac{(1-K_i)^2}{K_i D_i}} \right]^{1/2}, \quad \gamma_m = \frac{4\pi}{3\lambda_m} v, \quad (1)$$

где  $K_B$  — константа Больцмана,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $C_{0i}$  — исходная концентрация примеси в мишени,  $K_i$  — коэффициент сегрегации, определяющий степень вытеснения примеси в ЖФ при затвердевании,  $D_i$  — коэффициент диффузии примеси. Полагая [8]  $\sigma = 1.8 \cdot 10^3$  эрг/см<sup>2</sup>,  $D_i = 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с и значения  $K_i = 0.95$  (хром), 0.8 (никель), 0.18 (углерод), получим, что в случае а  $\lambda_m = 3.2$  мкм,  $\gamma_m = 10^4$  с<sup>-1</sup>, а в случае б  $\lambda_m = 15$  мкм ( $v = 0.06$  см/с), при этом  $\gamma_m$  более чем на порядок меньше, что и обуславливает малость амплитуды в этом случае.

Хорошее согласие рассчитанных и наблюдаемых значений периода структур позволяет нам считать, что механизм неустойчивости определен правильно. Нетрудно показать, что основной вклад в рассчитанное значение  $\lambda_m$  вносят примеси никеля и углерода ввиду малости значения  $K_i$ . При увеличении содержания углерода до 1.2% период структур должен уменьшиться втрое.

Работа поддерживалась фондом фундаментальных исследований ГКНТ Украины.

### Список литературы

- [1] *Hantzsche E.* // Proc. of the XV Int. Conf. on phenomena in ionized gases. Invited papers. Minsk, 1981. Pt 3. P. 184–193.
- [2] *Иванцов Г.П.* // ДАН СССР. 1951. Т. 81. В. 2. С. 179–182.
- [3] *Rutter J.W., Chalmers B.* // Canad. J. Phys. 1953. V. 31. N 1. P. 15–39.
- [4] *Владимиров В.В., Замков В.Н., Порицкий В.Я. и др.* // ДАН СССР. 1990. Т. 315. В. 2. С. 378–382.
- [5] *Vladimirov V.V., Gabovich M.D., Soloshenko I.A. et al.* // J. Vac. Sci. & Technol. 1991. V. 9. N 5. P. 2588–2592.
- [6] *Mullins W.W., Sekerka R.F.* // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 2. P. 323–329; 1964. V. 35. N 2. P. 444–451.
- [7] *Воронков В.В.* // ФТТ. 1964. Т. 6. N 10. С. 2984–2988.
- [8] *Кристаллизация из расплавов. Справочник* / Под ред. К. Хайна, Э. Бурига. М.: Металлургия, 1987. 319 с.

Институт физики  
АН Украины  
Киев

Поступило в Редакцию  
23 сентября 1993 г.