

**Динамика неустойчивости волновых возмущений
и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве***О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль*

Изучены эволюционные свойства линии роста свободного дендрита в переохлажденном расплаве чистого вещества. Определены условия морфологической устойчивости / неустойчивости фазовой границы кристаллизации на конечном удалении от вершины дендрита. Для обработки известных в литературе экспериментальных данных о росте кристалла из однокомпонентного переохлажденного расплава предложен параметр роста, который несет информацию о кинетических свойствах фазовой границы кристаллизации и о теплофизических свойствах расплава. Для никеля и меди получены аппроксимирующие функции, определяющие зависимость параметра роста от переохлаждения расплава. Изучены пять вариантов возмущения линии роста, вычислены скорости волн возмущения, распространяющихся по пространственно-неоднородному фону. Указаны ситуации, для которых устойчивость / неустойчивость роста зависит от направления движения волны (к вершине либо от вершины); вычислено пороговое значение ширины зоны неоднородности фона. Определены частоты возбуждающих колебаний и параметр затухания возмущения во времени. Выполнены подробные числовые расчеты, позволившие сопоставить друг с другом свойств дендритного роста для никеля и меди. Дана приближенная аналитическая оценка скорости роста основания боковой ветви.

Ключевые слова: дендритный рост, эволюция фазовой границы, морфологическая устойчивость, боковая ветвь.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-2-189-202

Шабловский Олег Никифорович, д.ф.-м.н., профессор.
E-mail: shablovsky-on@yandex.ru

Кроль Дмитрий Григорьевич, к.ф.-м.н., доцент.
Гомельский государственный технический университет
им. П. О. Сухого.
Республика Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2022 г.

© Шабловский О. Н., Кроль Д. Г., 2022

ЛИТЕРАТУРА

1. Herlach D. M., Galenko P., Holland-Moritz D. *Metastable Solids from Undercooled Melts.* – Oxford: Pergamon, 2007.
2. Dragnevski K., Cochrane R. F., Mullis A. M. // *Phys. Rev. Let.* 2002. Vol. 89. № 21. P. 215502-1.
3. Gonzalez-Cinca R. // *Physica A.* 2002. Vol. 314. P. 284.
4. Bassler B. T., Hofmeister W. H., Bayuzick R. J. // *Materials Science and Engineering.* 2003. A. Vol. 342. P. 80.
5. Mullis A. M. // *Acta Materialia.* 2003. Vol. 51. № 7. P. 1959.
6. Brener E. A., Mel'nikov V. I. // *Advances in Physics.* 1991. Vol. 40. № 1. P. 53.
7. Losert W., Shi B., Cummins H., Warren J. A. // *Phys. Rev. Let.* 1996. Vol. 77. P. 889.
8. Gurtin M. E., Jabbour M. E. // *Arch. Rational Mech. Anal.* 2002. Vol. 163. P. 171.
9. Шубков А. А., Леонов А. А., Казаков А. А., Стобенников С. С. // *Материаловедение.* 2005. № 7. С. 2.
10. Mullis A. M. // *IOP Conf. Series: Materials Science*

and Engineering. 2015. Vol. 84. P. 012071-1.

11. Glicksman M. E. // Journal of Crystal Growth. 2016. Vol. 450. P. 119.

12. Шабловский О. Н., Кроль Д. Г. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 316.

13. Kurz W., Rappaz M., Trivedi R. // Int. Mater. Rev. 2020. P. 1. doi.org/10.1080/09506608.2020.1757894

14. Strickland J., Nenchev B., Dong H. // Crystals. 2020. Vol. 10. P. 627.

15. Жоу Д., Касас-Баскес Х., Лебон Дж. Расширенная необратимая термодинамика. – Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006.

16. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1. – М.: Наука, 1973.

17. Шабловский О. Н. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 40.

18. Herlach D. M. // Materials Science and Engineering. 1994. Vol. A179/A180. P. 147.

19. Battersby S. E., Cochrane R. F., Mullis A. M. // J. Materials Science. 2000. Vol. 35. P. 1365.

20. Шабловский О. Н., Кроль Д. Г. // Расплавы. 2005. № 4. С. 69.

21. Шабловский О. Н., Кроль Д. Г. // Материалы, технологии, инструменты. 2007. Т. 12. № 1. С. 5.

22. Полянин А. Д., Вязьмин А. В., Журов А. И., Казенин Д. А. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса. – М.: Факториал, 1998.

23. Самарский А. А., Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Михайлов А. П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. – М.: Наука, 1987.

PACS: 64.70 Dv

Dynamics of instable wave perturbations and lateral dendrite branching in an undercooled melt

O. N. Shablovsky and D. G. Kroll

Educational Institution «Sukhoi State Technical University of Gomel»
48 Prospect Octiabria, Gomel, 246746, Republic of Belarus

Received February 16, 2022

The evolutional properties of the growth line of a free dendrite in an undercooled melt of a pure substance are studied. The conditions of morphological stability / instability of the phase boundary of crystallization are determined for the finite distance from the dendrite tip. To process the available experimental data on crystals growing from unicomponent undercooled melts we propose a growth parameter that contains the data about the kinetic properties of the phase boundary of crystallization and about the thermophysical properties of the melt. Approximation function for the dependence of the growth parameter of the melt undercooling are obtained for nickel and copper. Five variants of the growth line perturbations are studied with calculating the velocities of perturbation waves that propagate on spatially nonuniform background. Attention is paid to cases when stability / instability of the growth depends on the direction of the wave movement (to the tip or away from it). The limiting width of the background nonuniformity zone is calculated. The frequencies of exciting oscillations and the decrement of the excitation are determined. The numerical calculations enabled to compare the peculiarities of the dendrite growth for nickel and copper. An approximate analytical estimation for the growth velocity of the lateral branch base is given.

Keywords: dendritic growth, interface evolution, morphological stability, side branch.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-2-189-202

REFERENCES

1. D. M. Herlach, P. Galenko, and D. Holland-Moritz, *Metastable Solids from Undercooled Melts* (Oxford: Pergamon, 2007).

2. K. Dragnevski, R. F. Cochrane, and A. M. Mullis, *Phys. Rev. Let.* **89** (21), 215502-1 (2002).

3. R. Gonzalez-Cinca, *Physica A* **314**, 284 (2002).

4. B. T. Bassler, W. H. Hofmeister, and R. J. Bayuzick, *Materials Science and Engineering A* **342**, 80 (2003).

5. A. M. Mullis, *Acta Materialia* **51** (7), 1959 (2003).

6. E. A. Brener and V. I. Mel'nikov, *Advances in*

Physics **40** (1), 53 (1991).

7. W. Losert, B. Shi, H. Cummins, and J. A. Warren, *Phys. Rev. Let.* **77**, 889 (1996).

8. M. E. Gurtin and M. E. Jabbour, *Arch. Rational Mech. Anal.* **163**, 171 (2002).

9. A. A. Shibkov, A. A. Leonov, A. A. Kazakov, and S. S. Stolbennikov, *Materialovedeniye*, No. 7, 2 (2005).

10. A. M. Mullis, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **84**, 012071-1(2015).

11. M. E. Glicksman, *Journal of Crystal Growth* **450**,

119 (2016).

12. O. N. Shablovsky and D. G. Kroll, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (4), 316 (2018).

13. W. Kurz, M. Rappaz, and R. Trivedi, *Int. Mater. Rev.* **1** (2020). doi.org/10.1080/09506608.2020.1757894

14. J. Strickland, B. Nenchev, and H. Dong H, *Crystals* **10**, 627 (2020).

15. D. Jou, J. Casas-Vazquez, and G. Lebon, *Extended Irreversible Thermodynamics* (Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2001; Moscow-Izhevsk, SRC «Regular and chaotic dynamics», 2006).

16. L. I. Sedov, *Mekhanika sploshnoy sredy. Vol. 1* (Nauka, Moscow, 1973) [in Russian].

17. O. N. Shablovskiy, *Applied Physics*, No. 4, 40 (2012) [in Russian].

18. D. M. Herlach, *Materials Science and Engineering*

A179/A180, 147 (1994).

19. S. E. Battersby, R. F. Cochrane, and A. M. Mullis, *J. Materials Science* **35**, 1365 (2000).

20. O. N. Shablovsky and D. G. Kroll, *Russian Metallurgy*, No. 4, 69 (2005).

21. O. N. Shablovsky and D. G. Kroll, *Materialy, tekhnologii, instrumenty* **12** (1), 5 (2007).

22. A. D. Polyinin, A. V. Vyaz'min, A. I. Zhurov, and D. A. Kazenin, *Spravochnik po tochnym resheniyam uravneniy teplo- i massoperenosa* (Faktorial, Moscow, 1998) [in Russian].

23. A. A. Samarskiy, V. A. Galaktionov, S. P. Kurdyumov, and A. P. Mikhaylov, *Rezhimy s obostreniyem v zadachakh dlya kvazilineynykh parabolicheskikh uravneniy* (Nauka, Moscow, 1987) [in Russian].