



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-95-97>  
УДК 543.39: 665.081

Поступила 18.06.2024  
Received 18.06.2024

## ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ

В. Ю. СТЕЦЕНКО, г. Могилев, Беларусь. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

Вода в основном состоит из нанокристаллов льда. Особенности кристаллизации воды можно объяснить на основе ее наноструктурного строения и наноструктурной кристаллизации. Молекулы атмосферного воздуха хорошо растворяются в воде и адсорбируются ее нанокристаллами. Показано, что величина расширения льда при затвердевании воды пропорциональна концентрации растворенного в ней воздуха. Концентрация воздуха, растворенного в воде, с повышением ее температуры существенно снижается. Горячая вода затвердевает быстрее холодной, потому что в горячей воде меньше концентрация воздуха. Его пузырьки, выделяющиеся на кристаллах льда, уменьшают скорость кристаллизации воды. Большое переохлаждение воды происходит в результате блокирующего действия адсорбированного воздуха, который препятствует объединению нанокристаллов льда в центры кристаллизации. Встряхивание бутылки с переохлажденной водой приводит к десорбции воздуха и ускоренной кристаллизации воды. Пузырьки воздуха, выделяющиеся на дендритных кристаллах льда, снижают степень разветвленности этих кристаллов. Показано, что музыка повышает интенсивность удаления пузырьков газа и способна влиять на форму дендритных кристаллов льда при кристаллизации воды. Увеличение громкости звука и (или) снижение его частоты повышают интенсивность удаления пузырьков воздуха с дендритных кристаллов льда и увеличивают разветвленность этих кристаллов.

**Ключевые слова.** Кристаллизация воды, нанокристаллы, воздух, переохлаждение, дендритные кристаллы, лед, адсорбция.  
**Для цитирования.** Стеценко, В. Ю. Особенности кристаллизации воды / В. Ю. Стеценко // *Литье и металлургия*. 2024. № 3. С. 95–97. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-95-97>.

## FEATURES OF WATER CRYSTALLIZATION

V. Yu. STETSENKO, Mogilev, Belarus. E-mail: stetsenko.52@bk.ru

Water is mainly composed of ice nanocrystals. The peculiarities of water crystallization can be explained on the basis of its nanostructural structure and nanostructural crystallization. Atmospheric air molecules dissolve well in water and are adsorbed by its nanocrystals. It is shown that the amount of expansion of ice, when water solidifies, is proportional to the concentration of air dissolved in it. The concentration of air dissolved in water decreases significantly with an increase in its temperature. Hot water solidifies faster than cold water because there is less air concentration in hot water. Its bubbles, released on ice crystals, reduce the rate of crystallization of water. A large supercooling of water occurs as a result of the blocking action of adsorbed air, which prevents the unification of ice nanocrystals into crystallization centers. Shaking a bottle of supercooled water leads to desorption of air and accelerated crystallization of water. Air bubbles released on dendritic ice crystals reduce the degree of branching of these crystals. It has been shown that music increases the intensity of removal of gas bubbles and is able to influence the shape of dendritic ice crystals during water crystallization. It has been shown that an increase in the volume of sound and (or) a decrease in its frequency increase the intensity of removal of air bubbles from dendritic ice crystals and increase the branching of these crystals.

**Keywords.** Crystallization of water, nanocrystals, air, supercooling, dendritic crystals, ice, adsorption.

**For citation.** Stetsenko V. Yu. Features of water crystallization. *Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 3, pp. 95–97. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-95-97>.

Кристаллизация воды имеет следующие особенности: вода замерзает с увеличением объема; при одинаковых условиях охлаждения горячая вода затвердевает быстрее холодной [1]; вода может переохлаждаться более чем на 40 К и быстро кристаллизоваться после встряхивания бутылки с переохлажденной водой или удара по этой бутылке [2, 3]; при кристаллизации воды музыка влияет на форму кристаллов льда таким образом, что с увеличением громкости и (или) снижением частоты звука дендритные кристаллы льда становятся более разветвленными [4].

Объяснить особенности кристаллизации воды можно исходя из ее наноструктурного строения: вода на 87% состоит из нанокристаллов льда и только на 13% – из молекул воды [5]. Лед имеет достаточно рыхлую гексагональную кристаллическую решетку ( $a=0,782$  нм,  $c=0,736$  нм), в узлах которой находятся молекулы воды с максимальным размером 0,264 нм [6, 7]. В поры кристаллической решетки льда свободно проникают молекулы кислорода и азота атмосферного воздуха (воздуха), имеющие максимальные

размеры 0,264 и 0,248 нм соответственно [6]. Поэтому растворимость воздуха в воде относительно велика, благодаря чему в водной среде живут многие живые организмы.

При кристаллизации воды выделяющийся воздух оказывает давление на лед, заставляя его расширяться. Экспериментальным путем установлено, что величина расширения льда при затвердевании воды пропорциональна концентрации растворенного в ней воздуха [8]. Концентрация воздуха, растворенного в воде, с повышением ее температуры существенно снижается. При 283 К растворимость кислорода в воде составляет 11,3 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, а при 353 К – 2,9 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> [9]. Пузырьки воздуха тормозят процесс кристаллизации воды. Нагревание воды приводит к ее дегазации, которая снижает интенсивность выделения на фронте затвердевания пузырьков воздуха. Поэтому при одинаковых условиях охлаждения горячая вода затвердевает быстрее холодной, в которой выше концентрация воздуха.

При плавлении льда его кристаллы ( $L_k$ ) распадаются на нанокристаллы льда ( $L_n$ ) и свободные молекулы воды ( $(H_2O)_m$ ) [5]. Процесс кристаллизации воды является наноструктурным и происходит аналогично наноструктурной кристаллизации металлов [10]. Сначала формируются структурообразующие нанокристаллы льда ( $L_{сн}$ ) согласно следующей реакции:



Затем образуются центры кристаллизации ( $L_{цк}$ ) кристаллов льда:



Заканчивается процесс кристаллизации воды формированием  $L_k$  по реакции:



Молекулы воздуха хорошо растворяются в воде, а значит, хорошо адсорбируются нанокристаллами льда [11]. Воздух, адсорбированный нанокристаллами льда, препятствует их объединению в  $L_{цк}$ . Это основная причина большого переохлаждения воды при ее затвердевании. Если хорошо встряхнуть бутылку с переохлажденной водой или ударить по этой бутылке, то произойдет интенсивная десорбция молекул воздуха с нанокристаллов льда. Об этом свидетельствуют пузырьки воздуха, появляющиеся при встряхивании или ударе бутылки с переохлажденной водой. Освободившиеся от адсорбционной блокировки нанокристаллы льда, согласно реакции (2), интенсивно объединяются в  $L_{цк}$ , что приводит к быстрой кристаллизации воды.

Согласно реакции (3), на процесс формирования кристаллов льда большое влияние будут оказывать пузырьки воздуха, выделяющиеся при кристаллизации воды. Кристаллы льда имеют дендритную форму. Пузырьки воздуха, выделяющиеся на дендритных кристаллах льда, определяют степень их разветвленности. Чем выше концентрация воздуха в воде (холодная, чистая вода), тем менее разветвленными формируются дендритные кристаллы льда. При этом они имеют, как правило, симметричную форму [4]. И, наоборот, чем меньше концентрация воздуха в воде (теплая, грязная вода), тем более разветвленными формируются дендритные кристаллы льда. При этом они имеют, как правило, несимметричную форму [4].

Пузырьки воздуха, формирующиеся на дендритных кристаллах льда, могут интенсивно удаляться при внешнем воздействии на процесс кристаллизации воды. Таким воздействием являются акустические волны (звук): слова, музыка и т. п. Для определения влияния музыки на процесс удаления формирующихся пузырьков газа, растворенного в воде, был проведен следующий эксперимент. В чашку Петри диаметром 0,09 м наливали газированную чистую воду. Толщина слоя воды в чашке составляла 0,012 м. Пузырьки газа образовывались на внутренней поверхности чашки Петри и удалялись, всплывая на поверхность воды. Интенсивность удаления пузырьков газа определяли по количеству всплывших пузырьков за 30 с. Было установлено, что музыка средней громкости (50 дБ) в зависимости от времени выдержки газированной воды в чашке Петри повышала интенсивность удаления пузырьков газа на 50–20% по сравнению с процессом дегазации без музыки. Поэтому в результате эксперимента установлено, что музыка влияет на форму дендритных кристаллов льда при кристаллизации воды.

Влияние звука на кристаллизацию воды можно определить по величине звукового давления ( $P$ ) [12]:

$$P = P_0 \cdot 10^{\frac{L}{20}}, \quad (4)$$

где  $L$  – громкость звука, дБ;  $P_0$  – стандартный порог слышимости.

При частоте звука 1000 Гц  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па, а при частоте звука 160 Гц –  $2 \cdot 10^{-4}$  Па [12]. Поэтому с увеличением громкости звука и (или) снижением его частоты величина звукового давления акустической волны будет увеличиваться. Это приведет к повышению интенсивности удаления пузырьков

воздуха с формирующихся дендритных кристаллов льда и увеличению их разветвленности при кристаллизации воды. Увеличение громкости звука и (или) снижение его частоты будут уменьшать время затвердевания воды.

Очень шумный звук имеет громкость 80 дБ. При частоте 160 Гц такой звук создает давление, согласно уравнению (4), равное всего 2 Па. Это очень малая величина, которая не может оказывать разрушающее воздействие на кристаллы льда, но будет значительно повышать интенсивность удаления пузырьков воздуха с формирующихся дендритных кристаллов льда при кристаллизации воды.

Таким образом, особенности кристаллизации воды можно объяснить на основе наноструктурной кристаллизации, на которую большое влияние оказывают растворенные и адсорбированные молекулы атмосферного воздуха и его пузырьки, выделяющиеся на формирующихся дендритных кристаллах льда.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kell G.S. The Freezing of Hot and Cold Water // *American Journal of Physics*. AIP Scatation. – 1969. – Vol. 37. – No. 5. – pp. 564–565.
2. Захаров, С.Д. Кластерная структура воды (обзор) / С.Д. Захаров, И.В. Мосягина.– М.: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 2011.– 24 с.
3. Амелюшкин, И. Сверххолодная вода / И. Амелюшкин // *Квант*. – 2013. – № 4. – С. 27–28.
4. Ловлин, Н.М. Свойства воды. Информационная память воды / Н.М. Ловлин // *Старт в науке*. – 2017. – № 6. – С. 88–99.
5. Марукович, Е.И. О броуновском движении в жидкостях / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2020. – № 4. – С. 75–77.
6. Свойства элементов: справ. Ч. 1 / Под ред. Г.В. Самсонова.– М.: Металлургия, 1976.– 660 с.
7. Физико-химические свойства окислов: справ. / Под ред. Г.В. Самсонова.– М.: Металлургия, 1978.– 472 с.
8. Марукович, Е.И. Методика физического моделирования макропроцессов затвердевания отливок на прозрачных моделях и жидкостях / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 1. – С. 53–55.
9. Толстой, М.Ю. Исследование растворимости кислорода / М.Ю. Толстой, Т.И. Шишелова, Р.А. Шестов // *Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология*. – 2015. – № 1. – С. 86–90.
10. Марукович, Е.И. Наноструктурная кристаллизация металлов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.В. Стеценко // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 2. – С. 23–26.
11. Жуховицкий, А.А. Физическая химия / А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман.– М.: Металлургия, 2001.– 688 с.
12. Аксенович, Л.А. Физика в средней школе / Л.А. Аксенович, В.И. Зенькович, К.С. Фарино.– Минск: Аверсэв, 2010.– 1102 с.

## REFERENCES

1. Kell G.S. The Freezing of Hot and Cold Water. *American Journal of Physics*. AIP Scatation, 1969, vol. 37, no. 5, pp. 564–565.
2. Zaharov S.D., Mosyagina I.V. *Klaster'naya struktura vody (obzor)* [The cluster structure of water (review)]. Moscow, Fizicheskij institut im. P.N. Lebedeva RAN Publ., 2011, 24 p.
3. Amelyushkin I. *Sverkhkholodnaya voda* [Ultra-cold water]. *Kvant = Quantum*, 2013, no. 4, pp. 27–28.
4. Lovlin N.M. *Svoystva vody. Informacionnaya pamyat' vody* [Water properties. Water information memory]. *Start v nauke = Start in science*, 2017, no. 6, pp. 88–99.
5. Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *O brounovskom dvizhenii v zhidkostyah* [On brownian motion in liquids]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 75–77.
6. *Svoystva elementov: spravochnik. Ch. 1* [Properties of elements. Part 1]. Pod red. G. V. Samsonova. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 660 p.
7. *Fiziko-himicheskie svoystva okislov: spravochnik* [Physicochemical properties of oxides]. Pod red. G. V. Samsonova. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
8. Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *Metodika fizicheskogo modelirovaniya makroprocessov zatverdevaniya otlivok na prozrachnyh modelyah i zhidkostyah* [Methodology for physical research of macro-processes of solidification of castings on transparent models and liquids]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 1, pp. 53–55.
9. Tolstoj M. Yu., Shishelova T.I., Shestov R.A. *Issledovanie rastvorimosti kisloroda* [Investigation of oxygen solubility]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 2015, no. 1, pp. 86–90.
10. Marukovich E.I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *Nanostrukturnaya kristallizaciya metallov* [Nanostructural crystallization of metals]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 2, pp. 23–26.
11. Zhuhovickij A.A., Shvarcman L.A. *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. Moscow, Metallurgiya Publ., 2001, 688 p.
12. Aksenovich L.A., Zen'kovich V. I., Farino K. S. *Fizika v srednej shkole* [Physics in high school]. Minsk, Aversev Publ., 2010, 1102 p.