



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-148-151>  
УДК 502/504:631.6.02:620.193.15

Поступила 24.09.2024  
Received 24.09.2024

## ОБ ЭРОЗИИ МАТЕРИАЛОВ КАПЛЯМИ ВОДЫ

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

*Показано, что механизм эрозии материалов каплями воды заключается в ударном действии нанокристаллов льда. Вода на 87% состоит из нанокристаллов льда. Расчетным путем установлено, что при ударе капли воды, летящей со скоростью 7 м/с, о твердую поверхность нанокристаллы льда, состоящие из 26 молекул воды, развивают скорость, сравнимую со скоростью оружейной пули. Расчетным путем показано, что предел прочности на сжатие нанокристаллов льда составляет в среднем 380 МПа. Капли воды могут вызывать эрозию материалов, имеющих меньший предел прочности на сжатие, чем у нанокристаллов воды.*

**Ключевые слова.** Эрозия материалов, капли воды, нанокристаллы льда, предел прочности на сжатие.

**Для цитирования.** Стеценко, В. Ю. Об эрозии материалов каплями воды / В. Ю. Стеценко // Литье и металлургия. 2024. № 4. С. 148–151. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-148-151>.

## ABOUT THE EROSION OF MATERIALS BY WATER DROPLETS

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

*It is shown that the mechanism of erosion of materials by water droplets consists in the impact action of ice nanocrystals. 87% of the water consists of ice nanocrystals. It has been calculated that when a drop of water flying at a speed of 7 m/s hits a solid surface, ice nanocrystals in water consisting of 26 water molecules develop a speed comparable to the speed of a weapon bullet. It is shown by calculation that the compressive strength of water ice nanocrystals consisting of 26 water molecules averages 380 MPa. Water droplets can cause erosion of materials having a compressive strength less than the compressive strength of water nanocrystals.*

**Keywords.** Material erosion, water droplets, ice nanocrystals, compressive strength.

**For citation.** Stetsenko V. Yu. About the erosion of materials by water droplets. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 4, pp. 148–151. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-148-151>.

Известно, что капли воды вызывают эрозию камня (рис. 1) [1]. Говорят, что капля камень долбит [2]. Но камень имеет большую прочность. Например, предел прочности на сжатие гранита составляет от 60 до 200 МПа [3]. Капли воды не имеют прочности. Она появляется, когда водяные капли летят со скоростью, превышающей скорость звука в воде, т.е. более 1435 м/с [4]. Тогда скорость капель воды превышает максимальную скорость молекул. В этом случае водяные капли будут иметь свойства твердого тела и смогут разрушать камень.



Рис. 1. Эрозия камня каплями воды

Скорость падения дождевых капель не превышает 9 м/с [5]. Капли дистиллированной воды с начальным диаметром  $2,7 \cdot 10^{-3}$  м, ударяющиеся о твердую поверхность со скоростью 7 м/с, оказывают давление на эту поверхность 300 кПа [6]. При таком относительно малом давлении эрозия камня каплями воды остается тайной, раскрытие которой является целью настоящей работы.

Понять механизм эрозии материалов каплями воды можно, исходя из ее наноструктурного строения. Следует считать, что вода на 87% состоит из нанокристаллов льда и на 13% – из молекул воды [7]. Экспериментальным подтверждением наноструктурного строения воды является броуновское движение. Нанокристаллы льда, состоящие из 24 молекул воды, обеспечивают броуновской частице диаметром  $1 \cdot 10^{-6}$  м среднюю скорость в воде  $0,35 \cdot 10^{-6}$  м/с [8].

Лед имеет гексагональную элементарную кристаллическую решетку с параметрами  $a = 7,82 \cdot 10^{-10}$  м и  $c = 7,36 \cdot 10^{-10}$  м [9]. Поэтому можно принять, что нанокристалл льда в воде состоит из 26 молекул. Схема основания такого кристалла представлена на рис. 2.

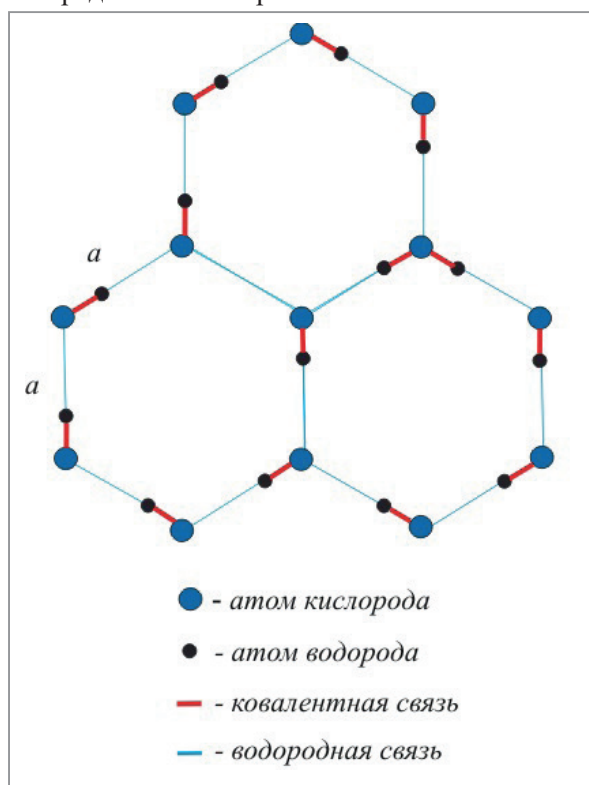


Рис. 2. Схема основания нанокристалла льда в воде

Средняя скорость нанокристаллов льда в воде ( $v_{H0}$ ) определяется уравнением [8]:

$$v_{H0} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_H}}, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура воды;  $m_H$  – масса нанокристалла льда в воде.

Величина  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К [4],  $T = 300$  К,  $m_H = 78 \cdot 10^{-26}$  кг [4]. Подставляя эти значения в (1), получаем  $v_{H0} = 116$  м/с.

Капля дистиллированной воды, имеющая начальный диаметр  $d = 3 \cdot 10^{-3}$  м, ударяясь о твердую поверхность со скоростью 7 м/с, сжимается практически до нуля за время  $\tau = 5,6 \cdot 10^{-5}$  с [10]. В полете высота водяной капли увеличивается примерно в 2 раза (см. рис. 1). При ударе капли о твердую поверхность нанокристаллы льда в воде будут двигаться с ускорением ( $a_H$ ), определяемым кинетическим уравнением:

$$a_H = \frac{4d}{\tau^2}. \quad (2)$$

При этом скорость нанокристаллов льда в воде увеличивается на величину  $v_{H1}$ :

$$v_{H1} = \frac{4d}{\tau}. \quad (3)$$

Подставляя  $d$  и  $\tau$  в (3), получаем  $v_{н1}=214$  м/с. Суммарная скорость нанокристаллов льда в воде ( $v_{н2}$ ) при ударе капли о твердую поверхность определяется уравнением:

$$v_{н2} = v_{н0} + v_{н1} + v. \quad (4)$$

Подставляя  $v_{н0}$ ,  $v_{н1}$  и  $v$  в (4), получаем  $v_{н2}=337$  м/с. Это означает, что при ударе капли дистиллированной воды с  $d=3 \cdot 10^{-3}$  м и  $v=7$  м/с о твердую поверхность нанокристаллы льда в воде развивают скорость, сравнимую со скоростью оружейной пули.

Нанокристаллы льда в воде могут разрушать материалы, если предел прочности на сжатие этих нанокристаллов ( $\sigma_{сжн}$ ) превосходит предел прочности на сжатие материалов ( $\sigma_{сжм}$ ). Значение  $\sigma_{сжн}$  определяется как:

$$\sigma_{сжн} = \frac{F_{сжн}}{S_{н}}, \quad (5)$$

где  $F_{сжн}$  – предельная сила сжатия нанокристалла льда;  $S_{н}$  – площадь основания нанокристалла льда.

Значение  $S_{н}$  определяется уравнением:

$$S_{н} = 4a^2. \quad (6)$$

Подставляя величину  $a$  в (6), получаем  $S_{н}=2,45 \cdot 10^{-18}$  м<sup>2</sup>. Значение  $F_{сжн}$  определяется как:

$$F_{сжн} = \frac{E_{вн}n}{L_{сжн}}, \quad (7)$$

где  $E_{вн}$  – энергия водородной связи льда;  $n$  – количество сжимаемых водородных связей в нанокристалле льда в воде;  $L_{сжн}$  – длина прецельного сжатия водородной связи в нанокристалле льда в воде.

Величина  $E_{вн}=20$  кДж/моль, или  $0,33 \cdot 10^{-19}$  Дж на одну водородную связь [11]. Величина  $n=13$ . Значение  $L_{сжн}$  определяется уравнением:

$$L_{сжн} = c - L_{0н} - L_{н0}, \quad (8)$$

где  $L_{0н}$  – длина ковалентной связи льда;  $L_{н0}$  – минимальная длина водородной связи.

Величина  $L_{0н}=1 \cdot 10^{-10}$  м,  $L_{н0}=1,76 \cdot 10^{-10}$  м [11]. Подставляя  $c$ ,  $L_{0н}$  и  $L_{н0}$  в (8), получим  $L_{сжн}=4,6 \cdot 10^{-10}$  м. Тогда, согласно (7),  $F_{сжн}=0,93 \cdot 10^{-9}$  Н. Подставляя  $S_{н}$  и  $F_{сжн}$  в (5), получаем  $\sigma_{сжн}=380$  МПа. Это означает, что капли воды, летящие со скоростью 7 м/с, будут производить эрозию материалов, имеющих предел прочности на сжатие менее 380 МПа. Таковыми являются гранит и кварц ( $\text{SiO}_2$ ) с  $\sigma_{сж}=176$  МПа [9]. Относительно высокие скорость и прочность нанокристаллов капель воды – причина эрозии многих материалов.

Известно, что сталь со временем ржавеет на открытом воздухе под действием дождя, несмотря на то что оксидная пленка  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  очень плотная. Для этой пленки критерий сплошности Пиллинга и Бедворса равен 2,09 [12]. Но под ударным действием капель дождя оксидная пленка  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  со временем разрушается, что усиливает коррозию стали. Этот процесс является циклическим, приводит к возрастанию толщины слоя ржавчины на поверхности стали. Для предотвращения этого процесса изделия из стали подвергают окраске. Высыхая на воздухе, краски формируют плотные слои, исключаящие контакт стали с воздушной атмосферой. Но со временем капли дождя разрушают слои краски, что приводит к процессу ржавления стальных изделий. Поэтому их окраска является временной, недолговечной защитой от атмосферной коррозии. Для предотвращения ржавления изделий из стали на их поверхности необходимо наносить защитные слои, обладающие пределом прочности на сжатие большим, чем у нанокристаллов льда в воде.

Алюминий не подвержен атмосферной коррозии под действием дождя, потому что на его поверхности формируется плотная оксидная пленка. Для нее критерий сплошности Пиллинга и Бедворса равен 1,31 [12]. Этот критерий меньше, чем у оксидной пленки на поверхности стали. Но оксидная пленка на поверхности алюминия имеет предел прочности на сжатие, равный 2940 МПа [9]. Эта величина значительно больше, чем аналогичная для нанокристаллов льда в воде. Поэтому дождевые капли не могут разрушить оксидную пленку на поверхности алюминия, что защищает его от атмосферной коррозии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Капля камень точит [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://stih.ru/pics/2016/05/29/7126.jpg>.– Дата доступа: 01.10.2024.
2. Гегузин, Я. Е. Капля / Я. Е. Гегузин. – М.: Наука, 1973. – 160 с.

3. Султаналиева, Р.М. Определение прочностных показателей горных пород при одноосном сжатии и растяжении / Р.М. Султаналиева, А.Т. Конушбаева, Ч.Б. Турдубаева // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 5. – С. 61–66.
4. Аксенович, Л.А. Физика в средней школе / Л.А. Аксенович, В.И. Зенькович, К.С. Фарино. – Минск: Аверсэв, 2010. – 1102 с.
5. Окаменевшие капли дождя расскажут о древней атмосфере [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.bbc.com/russian/science/2012/12/121204\\_ancient\\_rain\\_drops#:~:text=,дата\\_доступа:01.10.2024](https://www.bbc.com/russian/science/2012/12/121204_ancient_rain_drops#:~:text=,дата_доступа:01.10.2024).
6. Брыль, С.В. Вертикальное эффективное давление удара капли о почву / С.В. Брыль, М.С. Зверьков // Природоустройство. – 2016. – № 2. – С. 62–67.
7. Стеценко, В.Ю. О структуре воды / Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2024. – № 3. – С. 98–99.
8. 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.
9. Физико-химические свойства окислов: справочник / под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
10. Зверьков, М.С. Численные исследования удара капли о твердую поверхность / М.С. Зверьков // Природообустройство. – 2016. – № 2. – С. 17–20.
11. Полинг, Л. Общая химия / Л. Полинг. – М.: Мир, 1974. – 846 с.
12. Жук, Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. – М.: Металлургия, 1976. – 474 с.

## REFERENCES

1. *Kaplya kamen' tochtit* [A drop sharpens a stone]. Available at: <https://stihi.ru/pics/2016/05/29/7126.jpg> (accessed 1 October 2024).
2. Geguzin Ya. E. *Kaplya* [A drop]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 160 p.
3. Sultanalieva R. M., Konushbaeva A. T., Turdubaeva Ch. B. *Opređenje prochnostnyh pokazatelej gornyh porod pri odnoosnom szhatii i rastyazhenii* [Determination of the strength parameters of rocks under uniaxial compression and tension]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij = International Journal of Applied and Basic Research*, 2021, no. 5, pp. 61–66.
4. Aksenovich L. A., Zen'kovich V. I., Farino K. S. *Fizika v srednej shkole* [Physics in high school]. Minsk, Aversev Publ., 2010, 1102 p.
5. *Okamenevshie kapli dozhdyia rasskazhut o drevnej atmosphere* [Petrified raindrops will tell you about the ancient atmosphere]. Available at: [https://www.bbc.com/russian/science/2012/12/121204\\_ancient\\_rain\\_drops#:~:text=,дата\\_доступа:01.10.2024](https://www.bbc.com/russian/science/2012/12/121204_ancient_rain_drops#:~:text=,дата_доступа:01.10.2024).
6. Bryl' S. V., Zver'kov M. S. *Vertikal'noe effektivnoe davlenie udara kapli o pochvu* [Vertical effective pressure of impact of a drop on the soil]. *Prirodoobustrojstvo = Environmental Engineering*, 2016, no. 2, pp. 62–67.
7. Stetsenko V. Yu. *O strukture vody* [About the structure of water]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 3, pp. 98–99.
8. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu., Stetsenko A. V. *O brounovskom dvizhenii v zhidkostyah* [About brownian movement in liquids]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 4, pp. 75–77.
9. Samsonov G. V. (ed.) *Fiziko-himicheskie svojstva okislov: spravochnik* [Physicochemical properties of oxides: reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 472 p.
10. Zver'kov M. S. *Chislennye issledovaniya udara kapli o tverduyu poverhnost'* [Numerical studies of the impact of a drop on a solid surface]. *Prirodoobustrojstvo = Environmental Engineering*, 2016, no. 2, pp. 17–20.
11. Poling L. *Obshchaya himiya* [General Chemistry]. Moscow, Mir Publ., 1974, 846 p.
12. Zhuk N. P. *Kurs teorii korrozii i zashchity metallov* [The course of the theory of corrosion and protection of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, 474 p.