

## РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ КАПЛЯМИ ВОДЫ Стеценко В.Ю.

Стеценко Владимир Юзефович – доктор технических наук,  
Институт технологии металлов НАН Беларуси, Ассоциация литейщиков и металлургов Республики Беларусь,  
г. Могилев, Республика Беларусь

**Аннотация:** в статье предложен механизм разрушения материалов каплями воды, который 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 24 молекул воды, развивают скорость, сравнимую со скоростью оружейной пули. Расчетным путем показано, что предел прочности на сжатие нанокристаллов льда воды, состоящих из 24 молекул воды, составляет в среднем 350 МПа. Капли воды могут вызывать разрушение материалов, имеющих меньший предел прочности на сжатие, чем у нанокристаллов льда воды.

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

## DESTRUCTION OF MATERIALS BY WATER DROPLETS Stetsenko V.Yu.

Stetsenko Vladimir Yuzefovich – Doctor of Technical Sciences,  
INSTITUTE OF METAL TECHNOLOGY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS, ASSOCIATION  
OF FOUNDRYMEN AND METALLURGISTS OF THE REPUBLIC OF BELARUS,  
MOGILEV, REPUBLIC OF BELARUS

**Abstract:** the article proposes a mechanism for the destruction of materials by water droplets, which 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 consisting of 24 water molecules develop a speed comparable to that of a weapon bullet. It has been calculated that the compressive strength of water ice nanocrystals consisting of 24 water molecules averages 350 MPa. Water droplets can cause destruction of materials having a lower compressive strength than water ice nanocrystals.

**Keywords:** destruction of materials, water droplets, ice nanocrystals, compressive strength.

УДК 544.2

Известно, что падающие капли воды разрушают камень (рис. 1).



Рис. 1. Разрушение камня каплями воды

Говорят, что капля камень долбит [1]. Но камень имеет большую прочность. Например, предел прочности на сжатие гранита составляет от 60 до 200 МПа [2]. Капли воды не имеют механической прочности. Она появляется в том случае, когда водяные капли летят со скоростью, превышающей скорость звука в воде, то есть более 1435 м/с [3]. Это происходит тогда, когда скорость капель воды превышает максимальную скорость молекул воды. В этом случае водяные капли будут иметь свойства твердого тела и могут разрушать камень.

Скорость падения дождевых капель не превышает 9 м/с [4]. Капли дистиллированной воды, имеющие начальный диаметр  $2,7 \cdot 10^{-3}$  м, ударяющиеся о твердую поверхность со скоростью 7 м/с, оказывают давление на эту поверхность 300 кПа [5]. При таком относительно малом давлении процесс разрушения материалов каплями воды остается тайной. Поэтому целью настоящей работы является определение механизма разрушения материалов каплями воды.

Понять процесс разрушения материалов каплями воды можно, исходя из ее наноструктурного строения. Удельная теплота плавления льда составляет 13% от удельной теплоты его молекуляризации, поэтому следует считать, что вода на 87% состоит из нанокристаллов льда и на 13% – из молекул воды [6]. При плавлении микрокристаллы льда распадаются на нанокристаллы льда и молекулы воды, которые обеспечивают ей высокие реологические свойства и упругость пара. Экспериментальным подтверждением наноструктурного строения воды является броуновское движение. Расчетным путем показано, что только 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, а молекулы воды этого сделать не могут [7].

Лед имеет гексагональную элементарную кристаллическую решетку с параметрами  $a = 7,82 \cdot 10^{-10}$  м и  $c = 7,36 \cdot 10^{-10}$  м [8]. Считаем, что нанокристалл льда в воде состоит из 24 молекул воды. Схема основания такого кристалла представлена на рис. 2.

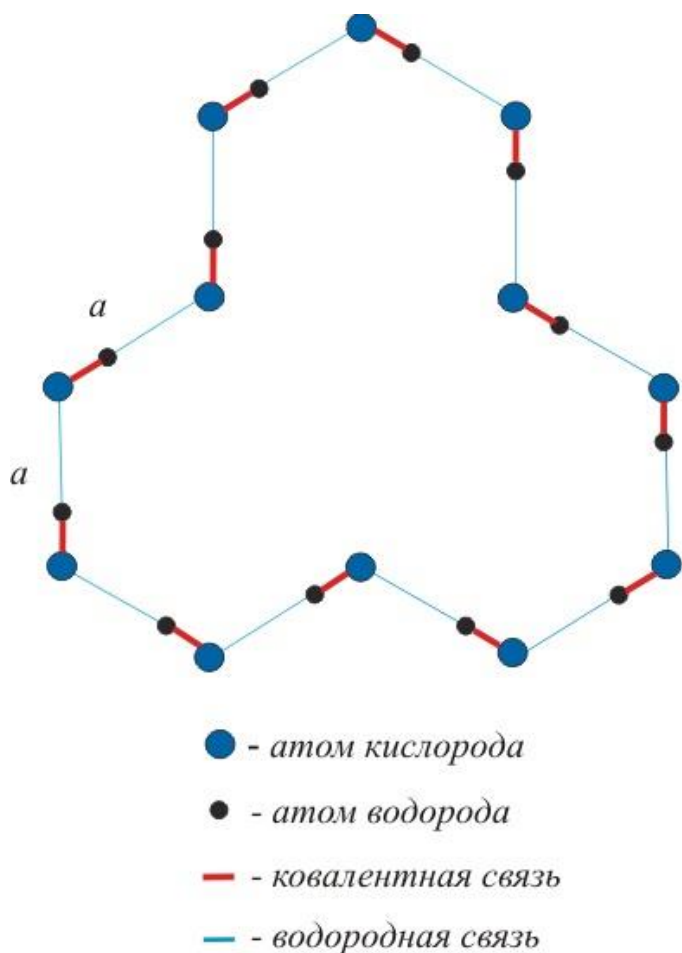


Рис. 2. Схема основания нанокристалла льда в воде

Из рис. 2 следует, что нанокристаллы льда в воде имеют относительно рыхлую структуру, в которую свободно проникает кислород. Известно, что он хорошо растворяется в воде, обеспечивая существование живущих в ней организмов. Вода имеет максимальную плотность при 277 К [9]. При этом концентрация

растворенного в воде кислорода также максимальна [10]. Это свидетельствует о том, что кислород повышает плотность воды, что можно объяснить увеличением плотности нанокристаллов льда в воде.

Известно, что при затвердевании воды ее плотность снижается, а объем увеличивается. При этом величина расширения воды при ее замерзании пропорциональна концентрации растворенного в воде кислорода [11]. Следует полагать, что аномальное поведение воды при ее затвердевании связано с удалением кислорода из нанокристаллов льда [12]. При 277 К концентрация кислорода в воде максимальна. При затвердевании воды этот кислород удаляется из нанокристаллов льда, что приводит к максимальному расширению воды. В замкнутом пространстве этот процесс значительно повышает давление на окружающую среду, что способствует ее разрушению. Но падающие капли воды разрушают материалы при температуре выше 273 К. Следует полагать, что это происходит благодаря большим скорости и прочности нанокристаллов льда в воде.

Средняя скорость нанокристаллов льда в воде ( $v_{н0}$ ) определяется следующим уравнением [7]:

$$v_{н0} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_n}}, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура воды,  $m_n$  – масса нанокристалла льда в воде.

Величина  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К [3],  $T = 300$  К,  $m_n = 72 \cdot 10^{-26}$  кг [3]. Подставляя эти значения в (1), получим  $v_{н0} = 121$  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 [13]. В полете высота водяной капли увеличивается примерно в 2 раза (рис. 1). При ударе капли о твердую поверхность нанокристаллы льда в воде будут двигаться с ускорением ( $a_n$ ), определяемым следующим кинетическим уравнением:

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

При этом, скорость нанокристаллов льда в воде увеличивается на величину  $v_{н1}$ , определяемую следующим уравнением:

$$v_{н1} = \frac{4d}{\tau}. \quad (3)$$

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

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

Подставляя величины  $v_{н0}$ ,  $v_{н1}$  и  $v$  в (4), получим  $v_{н2} = 342$  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 следующим уравнением:

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

где  $F_{сжн}$  – предельная сила сжатия нанокристалла льда,  $S_n$  – площадь основания нанокристалла льда. Значение  $S_n$  определяется следующим уравнением:

$$S_n = 4a^2. \quad (6)$$

Подставляя величину  $a$  в (6), получим  $S_n = 2,45 \cdot 10^{-18}$  м<sup>2</sup>. Значение  $F_{сжн}$  определяется следующим уравнением:

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

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

Величина  $E_{\text{вн}} = 20$  кДж/моль или  $0,33 \cdot 10^{-19}$  Дж на одну водородную связь [9]. Величина  $n = 12$ . Значение  $L_{\text{сжн}}$  определяется следующим уравнением:

$$L_{\text{сжн}} = c - L_{\text{он}} - L_{\text{но}}, \quad (8)$$

где  $L_{\text{он}}$  – длина ковалентной связи льда,  $L_{\text{но}}$  – минимальная длина водородной связи.

Величина  $L_{\text{он}} = 1 \cdot 10^{-10}$  м, а величина  $L_{\text{но}} = 1,76 \cdot 10^{-10}$  м [9]. Подставляя величины  $c$ ,  $L_{\text{он}}$  и  $L_{\text{но}}$  в (8), получим  $L_{\text{сжн}} = 4,6 \cdot 10^{-10}$  м. Тогда согласно (7),  $F_{\text{сжн}} = 0,86 \cdot 10^{-9}$  Н. Подставляя величины  $S_{\text{н}}$  и  $F_{\text{сжн}}$  в (5), получим  $\sigma_{\text{сжн}} = 350$  МПа. Это означает, что капли воды, летящие со скоростью 7 м/с, будут производить разрушение материалов, имеющих предел прочности на сжатие менее 350 МПа. Такими материалами являются гранит и кварц ( $\text{SiO}_2$ ), который имеет  $\sigma_{\text{сжн}} = 176$  МПа [8]. Относительно высокие скорость и прочность нанокристаллов льда капель воды являются причиной разрушения 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 [14]. Но под ударным действием капля дождя оксидная пленка  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  со временем разрушается, что усиливает коррозию стали. Этот процесс является циклическим. Он приводит к возрастанию толщины слоя ржавчины на поверхности стали. Для предотвращения этого процесса изделия из стали подвергаются окраске. Высыхая на воздухе, краски формируют плотные слои, предотвращающие 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.

Известно, что алюминий не подвержен атмосферной коррозии под действием капель дождя, потому, что на поверхности изделий из алюминия формируется плотная оксидная пленка. Для нее критерий сплошности Пиллинга и Бедворса равен 1,31 [14]. Этот критерий меньше, чем у оксидной пленки на поверхности стали. Но оксидная пленка на поверхности алюминия имеет предел прочности на сжатие, равный 2940 МПа [8]. Эта величина значительно больше, чем аналогичная для нанокристаллов льда в воде. Поэтому дождевые капли не могут разрушить оксидную пленку на поверхности алюминия, что предотвращает его от атмосферной коррозии.

Таким образом, для определения механизма разрушения материалов каплями воды следует исходить из того, что вода является наноструктурной системой, состоящей в основном (на 87%) из нанокристаллов льда. Каждый из них состоит из 24 молекул воды, соединенных водородными связями. При падении капля со скоростью 7 м/с нанокристаллы льда ударяют по твердой поверхности со скоростью оружейной пули (340 м/с). При этом предел прочности на сжатие нанокристаллов льда в среднем составляет 350 МПа. Высокие скорость и прочность нанокристаллов льда в каплях воды позволяют разрушать многие материалы, даже такие прочные, как гранит и кварц. Разрушение материалов каплями воды является одной из основных причин коррозии стальных изделий, даже защищенных слоями краски.

#### Список литературы / References

1. Гегузин Я.Е. Капля. М.: Наука, 1973. 160 с.
2. Султаналиева Р.М., Коңуибаева А.Т., Турдубаева Ч.Б. Определение прочностных показателей горных пород при одноосном сжатии и растяжении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 5. С. 61–66.
3. Аксенович Л.А., Зенькович В.И., Фарино К.С. Физика в средней школе. Минск: Аверсэв, 2010. 1102 с.
4. Окаменевшие капли дождя расскажут о древней атмосфере [Электронный ресурс]. 5 декабря 2012. URL: [https://www.bbc.com/russian/science/2012/12/121204\\_ancient\\_rain\\_drops#:~:text=20.01.2025](https://www.bbc.com/russian/science/2012/12/121204_ancient_rain_drops#:~:text=20.01.2025).
5. Брыль С.В., Зверьков М.С. Вертикальное эффективное давление удара капли о почву // Природообустройство. 2016. № 2. С. 62–67.
6. Стеценко В.Ю. О структуре воды // Литье и металлургия. 2024. № 3. С. 98–99.
7. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. О броуновском движении в жидкостях // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 75–77.
8. Физико-химические свойства окислов: справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
9. Полинг Л. Общая химия. М.: Мир, 1974. 848 с.

10. Толстой М.Ю., Шишелова Т.И., Шестов Р.А. Исследование растворимости кислорода // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2015. № 1. С. 86–90.
11. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю., Стеценко А.В. Методика физического моделирования макропроцессов затвердевания отливок на прозрачных моделях и жидкостях // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 53–55.
12. Стеценко В.Ю. Особенности кристаллизации воды // Литье и металлургия. 2024. № 3. С. 95–97
13. Зверьков М.С. Численные исследования удара капли о твердую поверхность // Природообустройство. 2016. № 2. С. 17–20 .
14. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976. 472 с.