

Научная статья
УДК 531.39
DOI: [10.34759/trd-2022-125-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-10)

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОДОРОДНОЙ ДЕГРАДАЦИИ И КАПЛЕУДАРНОЙ ЭРОЗИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ша Мингун^{1✉}, Сунь Ин²

¹Северо-Западный политехнический университет,
Западная дорога дружбы, 127, Сиань, 710072 Китайская Народная Республика

¹Научно-исследовательский институт дельты реки Янцзы Северно-Западного политехнического университета, Новый город науки и образования, 27, Тайцан, 215400, Китайская Народная Республика

²Ханчжоуский технический колледж Сяошань, Южная дорога Тонхуэй, 448, Ханчжоу, 311200, Китайская Народная Республика

¹shamg2020@nwpu.edu.cn✉

²544974488qq.com

Аннотация. Уникальные физико-химические свойства водорода и практически неограниченные ресурсы его на нашей планете в составе воды позволяют в развитии энергетики делать ставку на водородные энергетические системы [1,2]. Промышленные изделия, узлы и агрегаты, элементы конструкций, как правило, работают в агрессивных водородсодержащих средах (коррозионных, эрозионных). Повреждение от дождевой каплеударной эрозии, вызванный повторным попаданием

капель на лопасти ветряных турбин, является серьезной причиной для беспокойства, особенно с более крупными лопастями и более высокими скоростями лопастей. Водород, проникая в металл изделия и абсорбируясь в нем, изменяет химический состав, структуру, а также перераспределяет поля внутренних напряжений. Эти процессы, обобщенные термином «деградация», подготавливают и стимулируют развитие микронесплошностей различного масштабного уровня [13-17].

На данный момент, несмотря на интенсивные исследования, водородная деградация все еще остается нерешенной проблемой физики металлов, теоретического и практического материаловедения. Известно, что максимальное разрушительное воздействие водорода наблюдается, когда водород имеет максимальную диффузионную подвижность и активность, то есть на стадии нестационарной диффузии. Причем, как отмечает автор, разрушение под влиянием диффузионно-подвижного водорода мало предсказуемо и наиболее опасно вследствие высокой диффузионной подвижности водорода и способности перераспределяться под воздействием различных физических полей, а также существует неопределенность величины критической концентрации водорода в зоне разрушения. Поскольку при электризации рабочего тела поверхность рабочих лопаток подвергается действию электрофизических явлений, появляются условия для увеличения абсорбции водорода металлом, в том числе в диффузионно-подвижной форме. Данные выводы о значительном влиянии на повреждаемость лопаток наводнения согласуются с выводами. Исходя из приведенных выше качественных оценок процесса воздействия потока влажного пара с заряженными каплями на лопаточный материал, очевидно,

что величина отрицательного влияния приходится на электрические процессы зависит главным образом от величины ионного тока в пространстве проточной части.

Ключевые слова: конструкция, эксперимент, эрозия, капли, моделирование

Финансирование: работа выполнена при поддержке следующих грантов:

-Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2021JQ 081)

-Basic Research Programs of Taicang (TC2020JC14).

Для цитирования: Ша Мингун, Сунь Ин. Теоретическое исследование процессов водородной деградации и каплеударной эрозии конструкционных материалов // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-10)

Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-10)

Original article

THEORETICAL STUDY OF HYDROGEN DEGRADATION PROCESSES OF DROP IMPACT EROSION OF STRUCTURAL MATERIALS

Mingong Sha^{1✉}, Ying Sun²

¹Northwestern Polytechnical University,

710072, 127, West Youyi Road, Beilin District, Xi'an Shaanxi, P.R.China.

¹Yangtze River Delta Research Institute of NPU.215400, 27, Zigang Road, Science and Education New Town, Taicang City, Jiangsu Province, P.R.China

²Ying Sun. Department of Mechanical Engineering, Hangzhou Xiaoshan Technician College, 448 Tonghui South Road, Hangzhou City, 311200, People's Republic of China.

¹shamg2020@nwpu.edu.cn✉

²544974488qq.com

Abstract. The unique physical and chemical properties of hydrogen and its practically unlimited resources on our planet in the composition of water make it possible to rely on

hydrogen energy systems in the development of energy. Industrial products, components and assemblies, structural elements, as a rule, operate in aggressive hydrogen-containing media (corrosive, erosive). Rain erosion damage, caused by repeated droplet impact on wind turbine blades, is a major cause for concern, even more so at offshore locations with larger blades and higher tip speeds. Hydrogen, penetrating into the metal of the product and being absorbed in it, changes the chemical composition, structure, and also redistributes the fields of internal stresses. These processes, generalized by the term “degradatio”, prepare and stimulate the development of microdiscontinuities of various scales.

At the moment, despite intensive research, hydrogen degradation is still an unsolved problem of metal physics, theoretical and practical materials science. It is known that the maximum destructive effect of hydrogen is observed when hydrogen has maximum diffusion mobility and activity, that is, at the stage of unsteady diffusion. Moreover, as the author notes, destruction under the influence of diffusion-mobile hydrogen is little predictable and most dangerous due to the high diffusion mobility of hydrogen and the ability to redistribute under the influence of various physical fields, and there is also uncertainty about the magnitude of the critical concentration of hydrogen in the destruction zone. Since during the electrification of the working fluid, the surface of the working blades is exposed to electrophysical phenomena, conditions appear for increasing the absorption of hydrogen by metal, including in a diffusion-mobile form. These conclusions about the significant impact on the damage to the blades of the flood are consistent with the conclusions. Based on the above qualitative assessments of the process of the impact of a stream of wet steam with charged droplets on the blade material, it is obvious that the

magnitude of the negative effect on electrical processes depends mainly on the magnitude of the ion current in the space of the flow part.

Keywords: Construction, experiment, erosion, drops, modeling

Funding: the work was supported by:

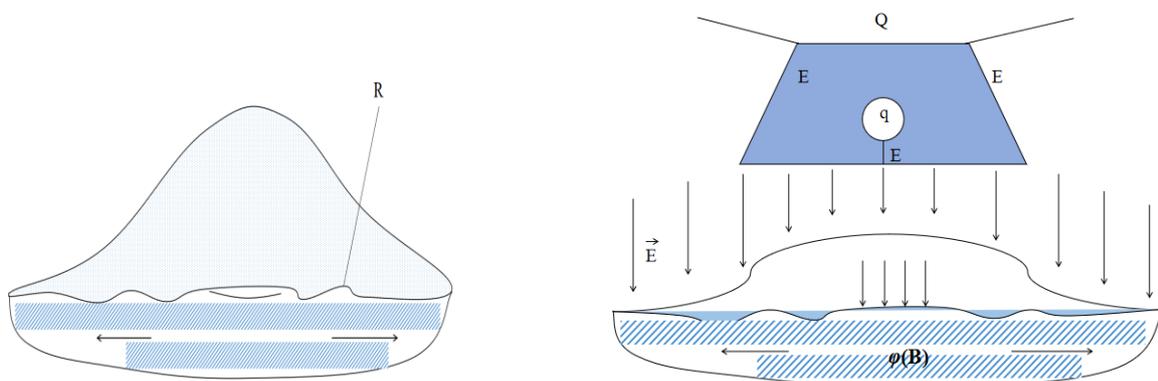
-Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2021JQ 081)

-Basic Research Programs of Taicang (TC2020JC14).

For citation: Mingong Sha, Ying Sun. Theoretical Study of Hydrogen Degradation Processes of Drop Impact Erosion of Structural Materials. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. DOI:

[10.34759/trd-2022-125-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-10)

В результате электризации рабочего тела турбины качественно меняется процесс ударного взаимодействия капель и металлических поверхностей, за счет электрического заряда на каплях и электрического поля в проточной части центрально напряженной деформации (ЦНД). Механическое действие преобразуется в механо-электрофизическое, схему которого можно иллюстрировать следующим образом (рисунок 1) [8].



(а) Механическое взаимодействие

(б) Механо-электрофизическое
взаимодействие

Рисунок 1. Схема взаимодействия капль и поверхности

До удара капли поверхность металла находится под воздействием электрического полуобъемного заряда потока рабочего тела \vec{E} , кроме того, металлическая поверхность имеет электрический потенциал φ , величина которого может составлять несколько вольт. Контакт капли с поверхностью сопровождается электрическим разрядом (ионы, образующие заряд капли q , разряжаются на поверхность металла). Следующим этапом является растекание и разрушение капли с механическим воздействием на поверхность и одновременным прохождением сопутствующих электрохимических реакций. В следствие этих процессов на поверхности рабочей лопатки образуются продукты реакции, выносимые потоком рабочего тела, а также поглощаемые металлом лопатки. Наиболее важным продуктом электрохимических реакций на поверхности лопаток является водород в ионном и атомарном состоянии. В результате накопления атомарного водорода в поверхностном слое металла может происходить образование молекулярного водорода по границам зерен, химические превращения с образованием гидроксида металла, реакции обезуглероживания и т.д. что означает уменьшение сплошности Ψ и увеличение повреждения ω , то есть ухудшение прочностных свойств. Для поверхности рабочей лопатки накопившаяся поврежденность ω будет функцией ионного тока I_j , времени воздействия t и площади поверхности S_l , на которую попадают заряженные капли, а также будет зависеть от интенсивности электрохимических процессов, обусловленных гальванопарами, влиянием ЦНД и

потенциала поверхности φ . Данный вид повреждения является составляющей общей поврежденности ω и его можно условно назвать электрофизическим и подать в виде $\omega_{\text{цнд}}=f(Ij, t, Sl, E, \varphi)$ [4].

В результате механо-электрического действия заряженных капель, в поверхностном слое лопаток более интенсивно развивается структурная и химическая неоднородность (гетерогенность), сравнимо с действием нейтральных капель, которая является предвестником появления трещин и пустот в матрице. С этой точки зрения гетерогенность поверхностного слоя можно оценивать как косвенную меру сплошности Ψ . Количественной косвенной оценке гетерогенности может быть статистический коэффициент вариации микротвердости поверхностного слоя металла Cv на некоторой выбранной площадке поверхности.

Этот подход к определению понятия целостности и повреждения отличается от современных моделей повреждения. Однако, в современных моделях учет факторов различной природы, влияющих на поврежденность, может иметь место в неявной форме (в виде коэффициентов эрозионного повреждения, или коэффициентов незнания). Так в универсальной математической модели эрозии эрозионная поврежденность в данной точке поверхности за время экспозиции t_3 определяется как:

$$\int_0^{\omega} (1 - \omega) = -\frac{1}{(k+1)} \int_1^{\Psi} \Psi^k d\Psi = 2\pi n t_3 \int_{r_k}^{\infty} r dr \int_0^{t_D} C[\sigma(r, t)]^k dt,$$

где n – капельная нагрузка (количество капель, выпадающее в единицу времени на единицу площади поверхности); r - расстояние от центра пятна контакта; r_R –

внутренний радиус зоны нагрузки; $\Psi=1-\omega$ – параметр сплошности; ω – параметр эрозионного повреждения; C, k – константы эрозионного повреждения; σ – самая растяжимая напряжение в данной точке; t_d – время действия нагрузки от удара одной капли. Временная зависимость $\sigma(r, t)$ определяется условием внутри интервала $0 \leq t \leq t_d$, а пространственная - законом затухания напряжений вдоль оси r . При $t = t_{инк}$ происходит разрушение, то есть $\omega = 1, \Psi = 0$.

Инкубационный период определяется в виде

$$t_{инк} = \frac{1}{2\pi(k+1)C} \left[\sum_{i=1}^{i_{max}} n_i \frac{\sigma_{Ri}^k d_{ki}^3 w_{Hi}^3}{C_R^4} \left(\frac{A_R(k-1)(k-2)(2k-3) + A_{cti}(k+1)(k-4)}{(k-1)(k-2)(2k-3)(k-4)} \right) \right]^{-1}$$

где d_k – диаметр i -й капли; w_{Hi} , – скорость нормального столкновения i -й капли; σ_{Ri} – максимальное растяжимое усилие в волне Релея от действия i -й группы капель в зависимости от усредненного давления на пятне контакта; A_R – динамическая константа; A_{cti} – статический комплекс для i -й группы капель;

Как пример работоспособности приведенной универсальной математической модели, можно привести данные удовлетворительного совпадения теоретической оценки и результатов обработки экспериментальных данных по развитию зон эрозионных повреждений последней ступени в двух сечениях 0,784 и 0,588 длины рабочей лопатки последней ступени [18-20]. На рисунке 2 показаны кинетические кривые, полученные по данным натурных испытаний и расчета.

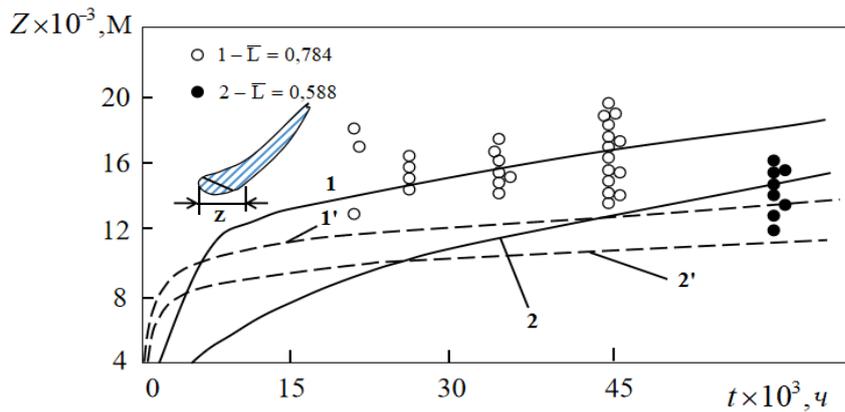


Рисунок 2. Ширина зоны эрозионных повреждений входной кромки рабочей лопатки турбины 200 МВт: 1 и 2 - кривые по данным натуральных испытаний; 1' и 2' – кривые верификации

Как видно на рисунке, кривая 1 существенно отличается от кривой 1', а кривая 2 отличается от 2' в меньшей степени. Эта особенность кинетических кривых с учетом ЦНД интерпретируется следующим образом. Из натуральных экспериментов на турбинах известно, что степень электризации парового потока и соответственно электрофизического воздействия на лопатку наибольшая в периферийной области. Поскольку электризация влажного пара и интенсивность ЦНД для длины 0,784 лопатки, существенно большая, чем для длины 0,588, отклонение кривой 1' от кривой 1 (кривая 1' полученная в расчете без использования соответствующих ЦНД коэффициентов) почти в два раза больше разницы между кривыми 2 и 2'. В среднем сечении лопатки электризация потока незначительна и в данном случае расхождение кривых 2 и 2' значительно меньше. Представленные данные позволяют сделать вывод, что в случае нейтрализации парового потока и нейтрализации, эрозионная поврежденность может быть снижена примерно в 2 раза.

Для оценочного расчета влияния заряда капель на участке лопаточной стали в качестве исходных данных были взяты параметры, используемые в теоретическом анализе вклада в участке лопаток последней ступени тока гальванопар, возникающие на поверхности лопаток. В исследовании [12] рассматривается модель возникновения электрических токов как результат воздействия на поверхность нерасчетных водно-химических режимов, структурной и химической гетерогенности поверхности и механических повреждений поверхностного слоя металла. В результате проведенных оценочных расчетов авторы статьи пришли к выводу, о незначительном вкладе рассматриваемых явлений в эрозию лопаток вследствие низкой гетерогенности поверхности, малой интенсивности коррозионных токов от гальванопар, образующиеся на поверхности металла, и низкой концентрации абсорбированного водорода (около 11 атомов на 106 атомов стали или $2 \cdot 10^{-5}$ масс. % за время $t_c = 9 \cdot 10^5$, или 2500 ч). Для оценки опасности структурных и химических изменений в поверхностном слое лопаточного материала авторы работы использовали экспериментальные данные из источника [4] для сталей 20к и 20к. По этим данным необратимое водородное разрушение имеет место при концентрациях не менее $2 \cdot 10^{-4}$ мас. % (100 атомов водорода на 106 атомов стали, или 100 ppm), что на порядок превышает результат расчета.

Однако, в случае электризации парового потока водорода, производимом гальванопарами на поверхности лопатки, добавляется водород, образующийся при замыкании ионного тока заряженных капель на поверхность лопаток, а также водород, образующийся электрохимическими процессами при диспергировании

жира влаги с поверхности и воздействию электрического поля. В результате интенсивность и сложность электрохимических процессов существенно возрастает.

В частности, механизм образования водорода в процессах возникновения и нейтрализации положительно заряженных капель показан в [3]. Образование водорода в процессах, связанных с возникновением и нейтрализацией негативно заряженных капель, можно представить таким образом:

отрицательная капля

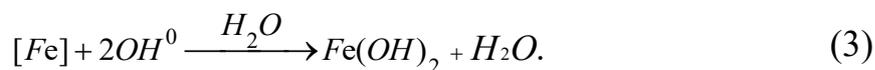


где Z – количество ионов, захваченных каплей.

При соприкосновении отрицательно заряженной частицы с заземленной поверхностью (анодом по отношению к капле) происходит переход электрона на анод с образованием нейтральной гидроксогруппы (сильного окислителя)



Гидроксогруппа на поверхности анода может вступить во взаимодействие с атомом железа в присутствии пленки воды с образованием гидроксида железа и воды



Атомарный водород, попадающий на поверхность образца, может рекомбинировать в молекулярный



Или вступать во взаимодействие с атомами железа на поверхности металла



В результате приведенных реакций на поверхности металла образуется водород в ионной и атомарной форме, являющийся химически активным веществом.

Количество водорода образуется, согласно закону Фарадея [6], определяется величиной ионного тока, время протекания тока и электрохимической константой транспортировки ионов

$$m = \frac{M}{nF} It, \quad (6)$$

где m – масса образующегося вещества, г; n – количество электронов, которые переносятся в электродном процессе; F – число Фарадея ($F = 96485$ Кл/моль); I – сила тока, А; t – время, с; M – молярная масса образующегося вещества г / моль.

Учитывая данные, приведенные в статье [7], о величине заряда индивидуальной мелкой капли, который может составлять от 8 до 10 элементарных зарядов, а большая капля несет еще больший заряд, можно сделать предположение, что в среднем одна капля независимо от размера несет 10 ионов водорода. С учетом данного допущения можно построить оценочные диаграммы образования водорода на единичной площадке поверхности металла. Для проведения предварительного расчета воспользуемся параметрами капле-ударной нагрузки [6]: модальные капли в зоне последнего степени 50 мкм; время импульсной нагрузки ($t_{и}$) $10^{-6} \div 10^{-8}$ с; пауза между актами нагрузки ($t_{п}$) $10^{-3} \div 10^{-5}$ сек. Временная диаграмма капле-ударной нагрузки приведена на рисунке 3.

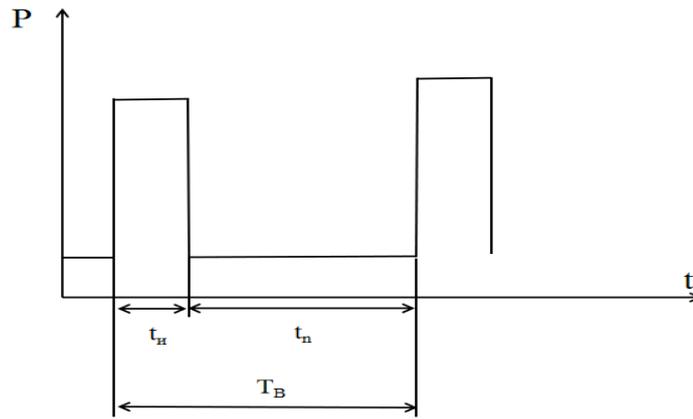


Рисунок 3. Временная диаграмма каплеударной нагрузки; t_y – время ударной нагрузки, t_n – время паузы между ударами соответственно суммарной удара и паузы (период действия, T_B): Время $T_B = t_y + t_n$ можно приближенно оценивать в диапазоне $10^{-3} \div 10^{-5}$ с, поскольку $t_n \ll t_y$. Частота ударов (количество капель) будет $10^3 \div 10^5$ в секунду.

Для заряженных капель такого размера заряд составляет ~ 10 элементарных зарядов. Площадь поверхности, на которую будет разряжаться капля существенно меньше сечения капли по миделю, поскольку заряженная капля деформируется при приближении к поверхности и ионы концентрируются в вытянутой к поверхности лопатки части. С учетом этого примем вид единичной площадки разряда капли на поверхность лопатки в виде квадрата со стороной равной $l = 10$ мкм.

Минимальный и максимальный ионный ток в секунду (для минимальной и максимальной частоты ударов капель) [9-11]:

$$I_{jmin} = 10 \times e \times 10^3$$

$$I_{jmax} = 10 \times e \times 10^5$$

где e – элементарный заряд (равен заряду одного иона водорода).

Соответственно количество атомов водорода N_H , образующееся на поверхности площадки в единицу времени, примем равным количеству ионов, принесенных каплями N_j . Для минимального тока количество ионов в функции от времени (в часах)

$$N_{jmin}(t) = t \times 3,6 \times 10^7$$

а для максимального тока

$$N_{jmax}(t) = t \times 3,6 \times 10^9$$

Количество атомов одного слоя металла N_{me} на поверхности выбранной площадки, принимая период решетки равным 0,4 нм

$$N_{me} = \left(\frac{10 \times 10^{-6}}{0,4 \times 10^{-9}} \right) \approx 6,25 \times 10^8$$

Оценку увеличения содержания водорода проведем для тонкого поверхностного слоя около 4 мкм. Для участка поверхностного слоя с размерами $10 \times 10 \times 4$ мкм количество атомов металла

$$N_{me} = 6,25 \times 10^8 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{0,4 \times 10^{-9}} \approx 6,25 \times 10^{12}$$

Предполагая, что весь водород образуется поглощается в данном участке поверхностного слоя, получим кинетику увеличения содержания водорода в атомных процентах для минимального и максимального тока

$$C_{Hmin}(t) = \frac{N_{jmin}(t) \times 100}{6,25 \times 10^{12}}$$

$$C_{Hmax}(t) = \frac{N_{jmax}(t) \times 100}{6,25 \times 10^{12}}$$

Графический вид процесса продолжительностью до 10 часов приведен на рисунке 4.

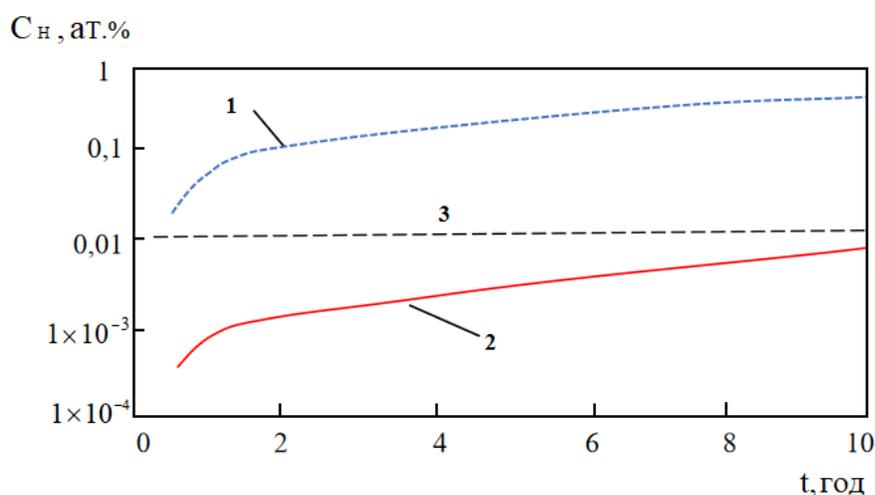


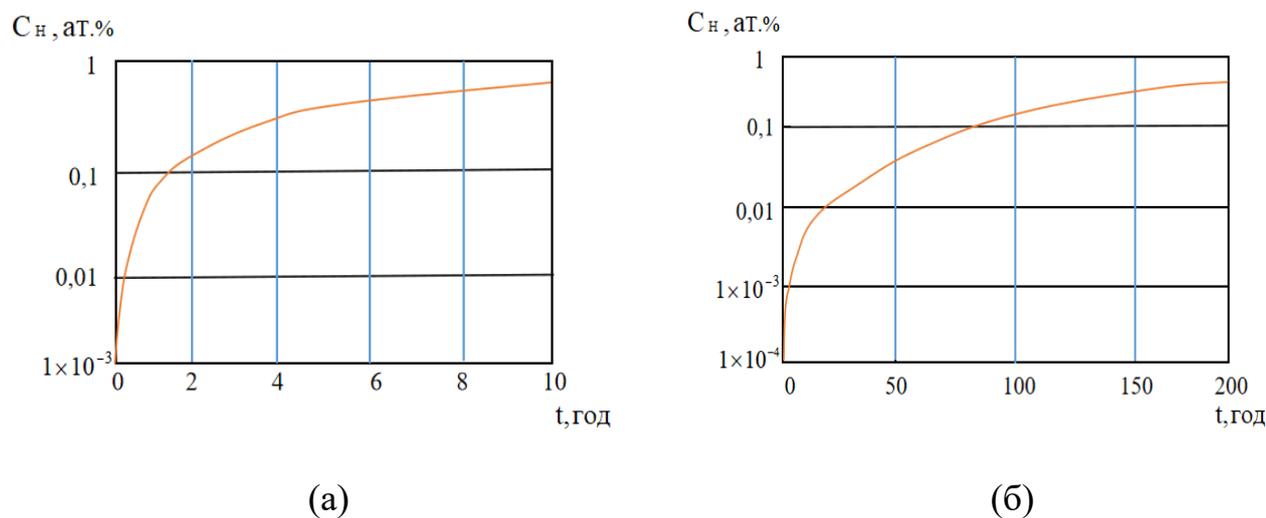
Рисунок 4. Кинетика насыщения водородом в течение 10 ч:

1 – максимальный ток (106 ионов / с); 2 – минимальный ток (104 ионов / с); 3 – концентрация необратимой водородной хрупкости

На рисунке 4 видно, что пороговая концентрация необратимой водородной хрупкости 0,01 ат. % (100 ppm) будет достигнута при максимальной интенсивности ионного тока примерно за 1 час, а за минимального тока примерно за 10 часов. Полученный результат существенно отличается от наводнения током гальванопара, которое за время 2500 часов не достигает концентрации 0,01 ат. % (100 ppm).

Верификацию критической концентрации водорода в 100 ppm. Так для бандажной проволоки X18H9T такая концентрация приводила к его хрупкому разрушению. Однако учитывая отличие лопаточной стали от стали X18H9T по устойчивости к водородному разрушению, примем пороговое значение неразворотной водородной хрупкости в поверхностном слое лопаточной стали в 10 раз больше 103 ppm (0,1 ат. %). В таком случае концентрацию водорода в 103 ppm

(0,1 ат. %) условно можно считать конечной концентрацией инкубационного периода. Достигается такая концентрация в данном случае при максимальном ионном токе за время около двух часов, а для минимального тока время составит около 200 часов. Кинетические кривые накопления водорода приведены на рисунке 5.



Реальная концентрация абсорбированного водорода естественно может отличаться плюс-минус на порядок от полученных оценочных величин, но тем не менее проведенная оценка позволяет сделать качественные выводы о влиянии заряженных капель на капельно-ударной эрозии. Полученные в данном расчете величины времени можно считать качественной оценкой величины инкубационного периода, обусловленной электрофизической компонентой повреждения $\omega_{цнд}$, не зависящей от кинетической энергии капель.

Чем меньше ионный ток, тем меньше электрохимическая компонента повреждения и инкубационный период близок к размеру обусловленной чисто механической ударно-капельной действием. Время, полученное для минимального ионного тока, по порядку близко ко времени инкубационного периода, реально наблюдаемого на турбинах.

Сравним полученные оценки времени с результатами первого эксперимента. За время 1,5 часа на площадку размерами 18x56 мм стекал положительный ионный ток порядка 1мкА, перенесенный потоком капель со средним диаметром 60 мкм, при низкой скорости обдува, который исключает механическое повреждение оксидных пленок. При этих условиях отрицательное действие имеет преимущественно электрохимический компонент.

Оценим количество ионов водорода, принесенных на всю поверхность за секунду при токе 1 мкА (10^{-6} А)

$$N_j = 6,25 \times 10^{18} \times 10^{-6} = 6,25 \times 10^{12}$$

Общая площадь поверхности в мкм²

$$18 \times 10^{13} \times 56 \times 10^3 = 1,008 \times 10^9$$

Найдем удельную количество ионов, что приходит на элементарную площадку 1x1 мкм за секунду

$$N_{js} = 6,2 \times 10^3$$

Для площадки 10x10 мкм – $6,2 \times 10^5$ шт. Это количество ионов соответствует потоку ионов из проведенного выше расчета для случая максимальной частоты ударов капель (10^5 за секунду), то есть с максимальным ионным током I_{jmax} . За 1,5 часа на элементарной площадке образуется 0,1 атомных процентов ионов водорода от количества атомов в площадке толщиной 4 мкм, рассмотренной выше. Это количество водорода обеспечило существенное снижение микротвердости (в 2 раза) и увеличение коэффициента вариации поверхностного слоя на глубину около 3мкм.

Выводы

Полученный результат можно интерпретировать как достижение концентрации необратимой хрупкости поверхностного слоя образца с соответствующим проявлением деградации механических свойств. Результат первого эксперимента можно считать обоснованием выбора в качестве минимальной предельной концентрации абсорбированного водорода для необратимой водородной хрупкости лопаточной стали величины 1000 ppm (0,1 ат. %). С позиции оценки инкубационного процесса это этап его окончания и накопления структурных и химических изменений поверхностного слоя металла, которые приведут к его разрушению при механической нагрузке.

Список источников

1. Огорокова Н.С., Пушкин К.В. Управляемый генератор водорода на базе гидронного химического источника тока // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29175>
2. Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Влияние состава алюминиевого анода гидронного источника тока на эффективность его работы в режиме генератора водорода // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 3. С. 65-73.
3. Beczek M., Ryżak M., Mazur R., Sochan A., Polakowski C., Bieganowski A. Influence of slope incline on the ejection of two-phase soi splashed material // PLoS ONE, 2022, vol. 17(1). URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262203>

4. Beczek M., Ryżak M., Sochan A., Mazur R., Polakowski C., Bieganowski A. A new approach to kinetic energy calculation of two-phase soil splashed material // *Geoderma*, 2021, vol. 396. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115087>
5. Domenech L., García-Peñas V., Šakalyte A., Francis D. P., Skoglund E., Sánchez F. Top coating anti-erosion performance analysis in wind turbine blades depending on relative acoustic impedance. Part 2: Material characterization and rain erosion testing evaluation // *Coatings*, 2020, vol. 10(8). URL: <https://doi.org/10.3390/COATINGS10080709>
6. Germoso C., Sánchez F., Domenech L., Cortés E., Falcó A., Chinesta, F. Analysis of liquid impact phenomena affecting rain erosion failure in wind turbine blades. A viscoelastic parametric study // In *ECCM 2018 - 18th European Conference on Composite Materials*, 2020. URL: <https://pimm.artsetmetiers.fr/index.php/en/node/324>
7. Hussain A., Singh G., Gill, H. S. Explicit dynamic modeling of epoxy resin against the water drop impact // In *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 48, pp. 1460–1467. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.229>
8. Kaore A.N., Kale U.B., Yerramalli C.S., Raval H.K. Fatigue life prediction of epoxy coating on composites subjected to waterdrop impact // In *ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2019.
9. Kyriazis N., Koukouvinis P., Gavaises M. Modelling cavitation during drop impact on solid surfaces // *Advances in Colloid and Interface Science*, 2018, vol. 260, pp. 46–64. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.08.004>

10. Lardier N., Roudier P., Clothier B., Willmott G. R. High-speed photography of water drop impacts on sand and soil // European Journal of Soil Science, 2019, vol. 70 (2), pp. 245–256. URL: <https://doi.org/10.1111/ejss.12737>
11. Lv D., Lian Z., Liang L., Zhang Q., Zhang T. Study on dynamic erosion behavior of 20# steel of natural gas gathering pipeline // Advances in Materials Science and Engineering, 2019. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/6030734>
12. Slot H., Matthews D., Schipper D., van der Heide E. Fatigue-based model for the droplet impingement erosion incubation period of metallic surfaces // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2021, vol. 44(1), pp. 199–211. URL: <https://doi.org/10.1111/ffe.13352>
13. Блантер М.С., Головин И.С., Головин С.А. и др. Механическая спектроскопия металлических материалов. - М.: МИА, 1994. - 256 с.
14. Левин Д.М., Чуканов А.Н., Муравлева Л.В. Исследование повреждаемости трубных сталей по эффектам неупругой релаксации // Вестник Тамбовского университета. 1998. Т. 3. № 3. С. 315-318.
15. Муравлева Л.В. Механизмы влияния пластической деформации и наводороживания на релаксационные явления в Fe-C сплавах: Дисс. канд. техн. наук. – Тула, ТПИ, 1998. – 168 с.
16. Извольский В. В, Сергеев Н. Н. Коррозионное растрескивание и водородное охрупчивание арматурных сталей железобетона повышенной и высок--ой прочности. - Тула: Изд-во Тульского педагогического университета, 2001. - 163 с.

17. Чуканов А.Н. Физико-механические закономерности формирования предельного состояния и развития локального разрушения в металлических материалах: автореферат диссертации... докт. техн. наук. - Тула: ТулГУ, 2001. 39 с.
18. Неуймин В.М. Анализ предложений по снижению абразивного износа элементов конструкций проточной части ЦСД (ЦСД-1) и ЦВД турбин СКД // Энергетик. 2021. № 10. С. 8-12.
19. Татарина Н.В. Математическое моделирование теплофикационных турбоустановок для решения задач повышения энергетической эффективности работы ТЭЦ: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2014. 24 с.
20. Татарина Н.В. Суворов Д.М. Математическое моделирование влияния эксплуатационных факторов на уровень влажности пара в ЧНД теплофикационных турбин // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 4 (31). С. 53-56.

References

1. Okorokova N.S., Pushkin K.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 51. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29175>
2. Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 65-73.
3. Beczek M., Ryżak M., Mazur R., Sochan A., Polakowski C., Bieganowski A. Influence of slope incline on the ejection of two-phase soi splashed material, *PLoS ONE*, 2022, vol. 17(1). URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262203>

4. Beczek M., Ryzak M., Sochan A., Mazur R., Polakowski C., Bieganowski A. A new approach to kinetic energy calculation of two-phase soil splashed material, *Geoderma*, 2021, vol. 396. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115087>
5. Domenech L., García-Peñas V., Šakalyte A., Francis D. P., Skoglund E., Sánchez F. Top coating anti-erosion performance analysis in wind turbine blades depending on relative acoustic impedance. Part 2: Material characterization and rain erosion testing evaluation, *Coatings*, 2020, vol. 10(8). URL: <https://doi.org/10.3390/COATINGS10080709>
6. Germoso C., Sánchez F., Domenech L., Cortés E., Falcó A., Chinesta, F. Analysis of liquid impact phenomena affecting rain erosion failure in wind turbine blades. A viscoelastic parametric study, *In ECCM 2018 - 18th European Conference on Composite Materials*, 2020. URL: <https://pimm.artsetmetiers.fr/index.php/en/node/324>
7. Hussain A., Singh G., Gill, H. S. Explicit dynamic modeling of epoxy resin against the water drop impact, *In Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 48, pp. 1460–1467. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.229>
8. Kaore A.N., Kale U.B., Yerramalli C.S., Raval H.K. Fatigue life prediction of epoxy coating on composites subjected to waterdrop impact // *In ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2019.
9. Kyriazis N., Koukouvinis P., Gavaises M. Modelling cavitation during drop impact on solid surfaces, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2018, vol. 260, pp. 46–64. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.08.004>

10. Lardier N., Roudier P., Clothier B., Willmott G. R. High-speed photography of water drop impacts on sand and soil, *European Journal of Soil Science*, 2019, vol. 70 (2), pp. 245–256. URL: <https://doi.org/10.1111/ejss.12737>
11. Lv D., Lian Z., Liang L., Zhang Q., Zhang T. Study on dynamic erosion behavior of 20# steel of natural gas gathering pipeline, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019. URL: <https://doi.org/10.1155/2019/6030734>
12. Slot H., Matthews D., Schipper D., van der Heide E. Fatigue-based model for the droplet impingement erosion incubation period of metallic surfaces, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2021, vol. 44(1), pp. 199–211. URL: <https://doi.org/10.1111/ffe.13352>
13. Blanter M.S., Golovin I.S., Golovin S.A. et al. *Mekhanicheskaya spektroskopiya metallicheskih materialov (Mechanical spectroscopy of metallic materials)*, Moscow, MIA, 1994, 256 p.
14. Levin D.M., Chukanov A.N., Muravleva L.V. *Issledovanie povrezhdaemosti trubnyh staley po effektam neuprugoy relaksacii (Study of Tube Steel Damageability by Inelastic Relaxation Effects)* *Vestnik Tambovskogo universiteta*, 1998, vol. 3, no. 3, pp. 315-318.
15. Muravleva L.V. *Mekhanizmy vliyaniya plasticheskoi deformatsii i navodorozhivaniya na relaksatsionnye yavleniya v Fe-C splavakh (Mechanisms of Influence of Plastic Deformation and Hydrogenation on Relaxation Phenomena in Fe-C Alloys)*, Doctor's thesis, Tula, TPI, 1998, 168 p.
16. Izvol'skii V. V, Sergeev N. N. *Korrozionnoe rastreskivanie i vodorodnoe okhrupchivanie armaturnykh staley zhelezobetona povyshennoi i vysok--oi prochnosti*

(Corrosion cracking and hydrogen embrittlement of reinforcing steels of reinforced concrete of high and high strength), Tula, Izd-vo Tul'skogo pedagogicheskogo universiteta, 2001, 163 p.

17. Chukanov A.N. *Fiziko-mekhanicheskie zakonomernosti formirovaniya predel'nogo sostoyaniya i razvitiya lokal'nogo razrusheniya v metallicheskih materialakh* (Physical and mechanical laws of formation of limiting state and development of local fracture in metallic materials): Doctor's thesis, Tula, TulGU, 2001, 39 p.

18. Neuimin V.M. *Energetik*, 2021, no. 10, pp. 8-12.

19. Tatarinova N.V. *Matematicheskoe modelirovanie teplofikatsionnykh turboustanovok dlya resheniya zadach povysheniya energeticheskoi effektivnosti raboty TETs* (Mathematical modeling of turbo generators for solving problems of increasing the energy efficiency of HPCs): doctor's thesis, Ekaterinburg, 2014. 24 p.

20. Tatarinova N.V. Suvorov D.M. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2015, no. 4 (31), pp. 53-56.

Статья поступила в редакцию 02.07.2022

Статья после доработки 04.07.2022

Одобрена после рецензирования 07.07.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 02.07.2022; approved after reviewing on 07.07.2022; accepted for publication on 25.08.2022