

# Совместное влияние циклических нагрузок и коррозии на техническое состояние металлоконструкций эскалаторов метрополитена



Вячеслав ДЯТЛОВ



Сергей ОРЛОВ



Валерий ПОПОВ

*Вячеслав Николаевич Дятлов<sup>1</sup>, Сергей Васильевич Орлов<sup>2</sup>, Валерий Анатольевич Попов<sup>3</sup>*

*<sup>1, 2, 3</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия.*

*✉ <sup>1</sup> [w.dyatlov@gmail.com](mailto:w.dyatlov@gmail.com).*

*<sup>1</sup> SPIN-код: 2978-6706, ORCID 0000-0002-4864-7554.*

*<sup>2</sup> SPIN-код: 2776-2605, ORCID 0009-0003-4651-3987.*

*<sup>3</sup> SPIN-код: 2418-7152, ORCID 0000-0003-2635-5427.*

## АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается влияние нагрузок, условно разделяемых на статические и циклические, и коррозии, действующих совместно на конструктивные элементы металлоконструкций эскалаторов метрополитена. Динамика коррозионных процессов определяется средой, степень воздействия которой в зависимости от географического положения и исходя из сезонности может варьироваться от неагрессивной до сильноагрессивной. Это при одновременном возникновении деформаций (создается напряженное состояние в конструкции) может привести к усталостным отказам. Состояние металлоконструкции эскалатора в данном случае является важнейшим звеном, так как выход из строя практически любого её конструктивного элемента означает полную остановку эскалатора.

**Ключевые слова:** метрополитен, эскалатор, металлоконструкция, коррозия, усталость, статические и циклические нагрузки, математическое моделирование.

Рассмотрены также предпосылки, обозначающие коррозионную усталость для низкоуглеродистых сталей как основного материала при изготовлении металлоконструкций эскалаторов метрополитена.

Основной целью данной работы является поиск критериев для создания экспериментально-расчётного метода по определению остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов метрополитена с высокой степенью достоверности. Выделение и анализ критериев оценки состояния металлоконструкций осуществлялся авторами с использованием методов экспериментальных исследований и обследований, в результате чего сделан вывод, что уровень деградации основных характеристик и свойства элементов металлоконструкции определяется не только количеством циклов нагружения, но и продолжительностью воздействия на них агрессивной среды.

*Для цитирования:* Дятлов В. Н., Орлов С. В., Попов В. А. Совместное влияние циклических нагрузок и коррозии на техническое состояние металлоконструкций эскалаторов метрополитена // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 4 (107). С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-3>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.  
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**



## ВВЕДЕНИЕ

Подъёмно-транспортные машины, в том числе эскалаторы метрополитена, проектируются исходя из предположения, что их металлоконструкции будут эксплуатироваться в пределах упругих деформаций, то есть в области таких нагрузок, где связь между возникающими напряжениями и возникающими деформациями однозначна. Однако на практике достаточно часто на элементах металлоконструкций обнаруживаются зоны локальных перегрузок, где возникают усталостные отказы, которые могут сопровождаться нелинейным упругопластическим и пластическим деформированием.

Современные технологии, основанные на реализации конечно-элементного моделирования на базе различных пакетных программных комплексов, позволяют с достаточной точностью определять напряженно-деформированное состояние узлов и элементов металлоконструкций эскалаторов [1].

Неразрушающий метод магнитного контроля, основанный на взаимосвязанности магнитных и физико-механических свойств ферромагнитных материалов, позволяет фактически уточнить расположение наиболее нагруженных зон элементов несущих металлоконструкций эскалаторов метрополитена, функционирующих в условиях длительного циклического нагружения, оценивать напряженно-деформированное состояние металла, а также определять уровень пластической деформации и усталостных повреждений [2].

Своеобразным уникальным датчиком пикового значения силы в данном случае выступает структура ферромагнитного материала, а ряд иных контролируемых магнитных параметров, связанных с целостностью структуры металла, наглядно отображает силовые характеристики режимов работы несущей металлоконструкции.

Состояние металлоконструкции в данном случае является важнейшим звеном, так как выход её из строя означает полную остановку эскалатора. Исходя из этого, основной целью данного исследования является установление взаимосвязи между коррозионным состоянием металлоконструкций эскалаторов метрополитена, отработавших нормативный срок эксплуатации, и их техническими характеристиками, что определяет возможность вычисления величины остаточного ресурса и продления срока для сверхнорма-

тивной эксплуатации [3]. Объект исследования – металлоконструкция эскалаторов метрополитенов – выступает в данном случае как плохо организованная система с недостаточно изученной причинностью связей и отсутствием детерминированности в протекании многих явлений и процессов. Основные методы исследования: практические методики определения и оценки технического состояния металлических конструкций эскалаторов метрополитенов, регрессионный анализ и статистическое моделирование, основы механики разрушения твёрдых тел.

В данной работе не рассматривается возможное нагружение опорных металлоконструкций эскалаторов, которое может возникнуть при нарушении целостности строительных конструкций по разного рода геологическим и техногенным причинам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Определение особенностей влияния циклических нагрузок и коррозии

Эксплуатация металлоконструкций эскалаторов метрополитена осуществляется в среде, степень воздействия которой в зависимости от географического положения и исходя из сезонности может варьироваться от неагрессивной до сильноагрессивной, с одновременным формированием деформаций (создаётся напряженное состояние в конструкции). Нагрузки, возникающие при этом, в сочетании с процессами коррозионного растрескивания и коррозионной усталости можно условно разделить на две группы: статические и циклические [4, 5].

Механизм коррозионно-усталостного разрушения уникален и одновременно опасен тем, что он запускается практически в любых коррозионных средах, от слабоагрессивных до сильноагрессивных, и может привести к резкому, иногда катастрофическому снижению предела выносливости металла.

Наличие коррозионной среды вносит значительные коррективы в процесс усталостного разрушения элементов металлоконструкций, изготовленных из низкоуглеродистых сталей, в сравнении с сухим воздухом или химически малоактивными средами. Коррозионная усталость в таких случаях может проявляться в виде следующих особенностей:

- *Отсутствие истинного предела выносливости.* На рис. 1 в координатных осях «напряжение – число циклов нагружения»

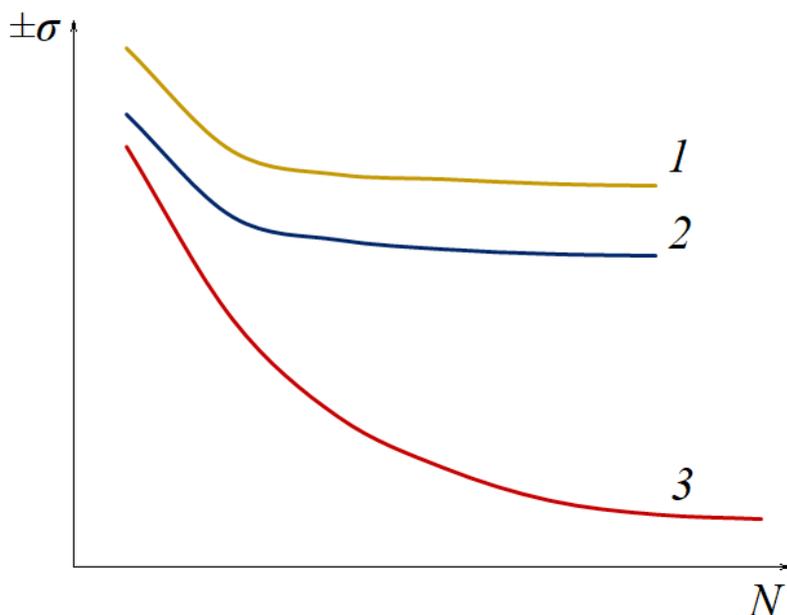


Рис. 1. Типовые кривые выносливости сталей [выполнено авторами].

изображены кривые выносливости сталей: линии 1 соответствует чистая усталость, линии 2 – адсорбционная усталость и линии 3 – коррозийная усталость.

На всех линиях отсутствуют ярко выраженные горизонтальные участки. Значение разрушающего переменного напряжения определяется в зависимости от числа циклов нагружения, однако в то же время очевидна связь между интенсивностью снижения значения разрушающего напряжения и относительной коррозионной активностью среды. Поэтому для характеристики коррозионной усталости используется такое понятие, как условный предел выносливости.

• *Отсутствие возможности установления взаимосвязи между условным пределом коррозионной выносливости и механическими свойствами металла, полученными при приложении статических и циклических нагрузок, при нахождении его в воздушной среде.*

• *Многоплоскостной характер разрушения, чётко выраженный у низкоуглеродистых сталей в нейтральных коррозионных средах.*

### Условия проведения и результаты практических испытаний

Практические испытания образцов из Ст3сп проводились с использованием сервогидравлической испытательной установки BISS Nano UT-01–0025 и металлографического цифрового микроскопа Альтами МЕТ 3Т. Многоцикловые испытания на усталость осуществлялись с изменением деформации 0,4–0,6 % с амплитудами напряжений цикла 250–280 МПа. Образцы перед началом испытаний проходили предварительное металлографическое исследование, для чего их поверхность была механически отшлифована и протравлена 5 %-м раствором азотной кислоты с целью выявления межзёренных границ. Далее делались

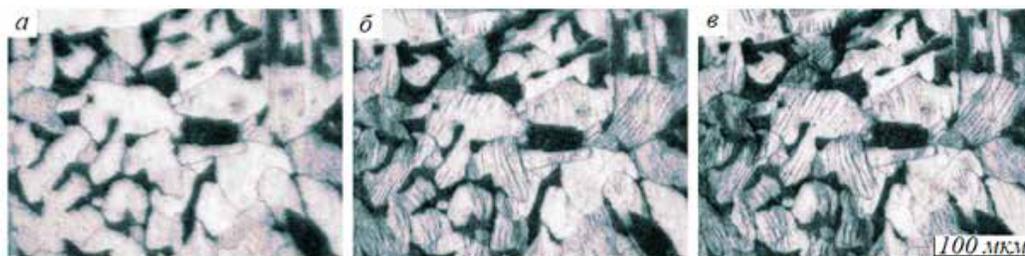


Рис. 2. Металлическая поверхность образца: а – до испытаний, б – после  $10^3$  циклов нагружения, в – после  $2 \times 10^3$  циклов нагружения [выполнено авторами].



снимки одной и той же области после каждого этапа нагружений.

Как видно из рис. 2, для стали СтЗсп типична однородная микроструктура, состоящая из зёрен феррита и перлита. Уже на первых этапах усталостных испытаний в зёрнах феррита появляются устойчивые полосы скольжения, которые при последующем нагружении сливаются, возникают также и новые полосы скольжения, причём их количество сообразно увеличивается. Ориентированы устойчивые полосы скольжения преимущественно поперёк оси нагружения.

Межзёрненное разрушение является наиболее предпочтительным местом для возникновения коррозионных процессов, в результате чего окружающая коррозионная среда, воздействуя и изменяя микрорельеф поверхности разрушения, может значительно увеличить количество элементов хрупкого разрушения, скола и других структурных дефектов:

- увеличение сечения у испытуемых образцов приводит к снижению предела выносливости при усталости низкоуглеродистых сталей. Это явление называют масштабным эффектом. Однако в коррозионной среде у гладких образцов может наблюдаться инверсия масштабного эффекта;

- снижение чувствительности изделий из низкоуглеродистой стали, находящихся в коррозионной среде, к микрогеометрии поверхности и концентрации механических напряжений вследствие их анодного растворения.

Эксплуатация большинства металлоконструкций эскалаторов метрополитена осуществляется в условиях коррозионной усталости при воздействии различных по степени агрессивности коррозионных сред, однако случаи, характерные именно для коррозионно-механического разрушения в конкретных условиях, на практике встречаются достаточно редко или не наблюдаются вовсе, исходя из чего вышеизложенные теоретические положения нуждаются в уточнении.

### **Учёт временного фактора при оценке состояния металлоконструкций эскалаторов метрополитена**

Степень влияния временного фактора на состояние реальной металлоконструкции эскалатора метрополитена не может быть доподлинно определена при помощи диаграмм с типовыми усталостными кривыми, так как их получение осуществляется в лабо-

раторных условиях во время испытания стандартных образцов при высокой интенсивности циклических нагрузок при  $N > \tau_3$ , где  $\tau_3$  – время эксплуатации. Очевидно, что эксплуатация металлоконструкций в реальных условиях осуществляется при  $\tau_3 \gg N$ , например, нормативный срок эксплуатации эскалаторов метрополитена варьируется от 30 до 50 лет. Также очевидно, что в реальности эскалатор работает не все 24 часа в сутки, а лишь определённое количество смен с перенаправлением движения и перерывами в работе. Выработка же 100 %-го ресурса у испытуемых образцов осуществляется в рамках нескольких часов-дней, чего явно недостаточно для проявления действительного характера коррозионно-механического разрушения. То есть результаты, полученные лабораторным путём, для случаев, когда  $\tau_3 \gg N$ , не могут полноценно отображать исследуемый физико-химический процесс.

В рамках ранее проведённых исследований [6, 7] на базе ГУП «Петербургский метрополитен» с использованием различных методик определения технического состояния металлических конструкций эскалаторов были определены первичные факторы, определяющие агрессивное воздействие среды: влияние износа отдельных конструктивных элементов на динамику изменения несущей способности металлоконструкции в целом; возникновение и развитие локальных видов коррозионных повреждений, в том числе питтинговой коррозии; явление адсорбционного понижения механических характеристик материала.

Под коррозией в данном случае, прежде всего, понимался не процесс разрушения материала, а энтропийность, направленная на восстановление баланса в природе. В состав любых сталей входит железо, что делает их термодинамически неустойчивыми соединениями, которые в ходе окислительно-восстановительных реакций преобразуются в термодинамически выгодную ржавчину – аналог рудного железа.

Одновременное воздействие постоянных и переменных нагрузок приводит к коррозионной усталости материала. Оценка фактического коррозионного состояния металлоконструкции, а также наличие возможности прогнозировать динамику этого состояния (то есть определить остаточный технический ресурс), способствует своевременному принятию мер по предотвращению отказов в ра-

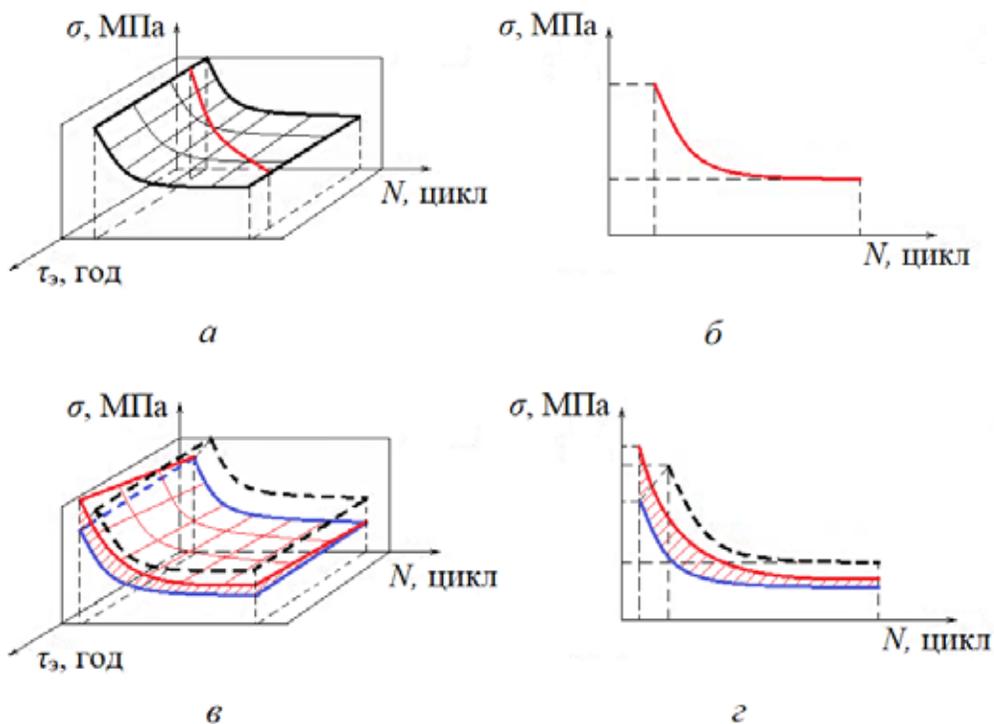


Рис. 3. Типовые усталостные кривые: а, б – чистая усталость, полученная в нейтральных средах; в, г – усталость с учётом влияния первичных факторов коррозионного воздействия среды (--- чистая усталость (в цветном изображении – чёрный пунктир); – с учётом влияния коррозионного износа (красная линия); -- с учётом влияния адсорбционной усталости (синяя линия)) [выполнено авторами].

боте при эксплуатации эскалаторов метрополитенов.

Для реализации этой цели был выбран метод математического моделирования. К основным критериям, на которые необходимо было обратить внимание при создании модели – выделение свойств или показателей в исследуемом процессе, определение явлений и иных составляющих, характеризующих выделенные свойства или показатели, их описание.

С целью повышения адекватности моделирования проведено численное моделирование, которое заключается в объединении программных пакетов MathCad и SigmaPlot (MathCad – программный комплекс компьютерной алгебры, относящийся к классу систем автоматического проектирования; SigmaPlot – программный пакет, предназначенный для анализа и визуализации научных и статистических данных с возможностью 2D и 3D визуализации результатов).

В результате были получены математические выражения, описывающие развитие и воздействие данных факторов с учётом влияния временного фактора.

Для обеспечения наглядности представления взаимосвязанности влияния основных факторов коррозии и степени накопления коррозионной усталости в металлоконструкциях эскалаторов метрополитена возникает необходимость изображать все коррозионно-усталостные кривые в трёхмерных координатах «напряжение (нагрузка) – число циклов нагружения – время».

На рис. 3 видно, что схемы коренным образом отличаются друг от друга, и можно заметить, что при одинаковом числе циклов нагружения  $N$  главное отличие состоит именно во временном факторе.

На протяжении всего своего жизненного цикла конструктивные элементы металлоконструкций эскалаторов метрополитена, как и любых других подъёмно-транспортных машин, подвергаются коррозионному износу, степень накопления которого с течением времени определяет динамику снижения несущей способности металлоконструкции и увеличения напряжений при постоянной во времени нагрузке (рис. 3). В результате возникает необходимость в фактическом определении величины остаточного ресурса



и организации постоянного контроля уровня приложенных нагрузок с целью сохранения работоспособности конструкции в течение определённого количества циклов нагружения [8, 9].

Адсорбирующиеся поверхностно-активные компоненты среды также являются причиной изменения усталостной прочности материала, что объясняется эффектом Ребиндера, особенно при действии циклических напряжений. Кривые адсорбционной усталости и чистой усталости, полученной в нейтральных средах, подобны (рис. 1). Здесь, как было сказано выше, также наблюдается отсутствие ярко выраженного горизонтального участка, однако в отличие от коррозионной усталости предел адсорбционной усталости не является условной величиной и может быть достаточно точно определён. Подобность же кривых позволяет сделать вывод, что адсорбционная усталость просто приводит к снижению предела выносливости материала.

Для определения значения предела адсорбционной усталости  $\sigma_{-1к}$  можно воспользоваться формулой [6, 7]:

$$\sigma_{-1к} = \sigma_{-1o} \cdot \left(\frac{T_o}{T}\right)^\beta \cdot \gamma_d \cdot k_t, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1o}$  – предел выносливости материала при температуре  $T_o = 293\text{K}$  ( $20^\circ\text{C}$ );

$T$  – температура окружающей среды;

$\beta$  – характеристика устойчивости сечения против коррозии;

$\gamma_d$  – коэффициент адсорбционного понижения прочности;

$k_t$  – временная составляющая, характеризующая динамику изменения коэффициента адсорбционного понижения прочности с течением времени.

Необходимо отметить тот факт, что адсорбционное воздействие среды нивелируется и свойства материала могут быть восстановлены до уровня чистой усталости, если обеспечить отсутствие контакта материала с агрессивной средой, например, используя лакокрасочные материалы [10, с. 173–174].

Питтингообразование в материале проявляется в виде возникновения концентраторов напряжений, представляющих собой локальные дефекты, из которых могут развиваться усталостные трещины [11].

Рассмотрим модель, описывающую этап зарождения усталостных трещин в низкоуг-

леродистых и низколегированных сталях на стадии рассеянной повреждаемости [12]:

$$N_T = -\frac{1}{C_N} \int_{\omega_o}^1 \frac{(1-\omega_{nT})^{m_c}}{\Delta\sigma_n^{m_c}} d(1-\omega_{nT}), \quad (2)$$

где  $N_T$  – число циклов на стадии рассеянной повреждаемости;

$C_N$  и  $m_c$  – коэффициенты, определяемые физико-механическими свойствами материала;

$\omega_o$  – количественная доля структурных повреждений до нагружения;

$\omega_{nT}$  – количественная доля накапливаемых при нагружении усталостных повреждений;

$\Delta\sigma_n$  – значение повреждающих напряжений.

Значение повреждающих напряжений можно определить, воспользовавшись формулой [13, 14]

$$\Delta\sigma_n = \sigma_{\max n} - \sigma_{RK}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{RK}$  – предел выносливости.

Анализ формулы (3) позволяет ещё на предварительном этапе сделать следующие предположения и выводы: на рост уровня повреждающих напряжений влияет, во-первых, наличие агрессивной среды, являющейся причиной усиления коррозионного износа, что приводит к увеличению  $\sigma_{\max n}$ ; во-вторых, адсорбционное воздействие среды, которое обуславливает снижение  $\sigma_{RK}$ . Не исключается вариант, когда может происходить одновременное изменение соответствующих величин, что приводит к общему росту уровня повреждающих напряжений.

Так как в процессе исследования возникает сложность в определении отдельных реальных характеристик, сделаем допущение, что при наличии микротрещины длиной 0,1 мм критический объём повреждений  $V_{ny}$  будет равен 0,001 мм<sup>3</sup>.

Очевидно, что увеличение скорости образования усталостных трещин является следствием воздействия первичных факторов, определяющих агрессивное воздействие среды, тогда, исходя из предположений и выводов, полученных при анализе формулы (3), и принятого значения объёма  $V_{ny}$ , можно оценить их влияние на динамику развития усталостной трещины.

Значения максимально допустимых напряжений, определяемые приложенной внешней нагрузкой, согласно модели (2), могут достигать уровня предела текучести  $\sigma_T$ . В то же время на механических характеристиках

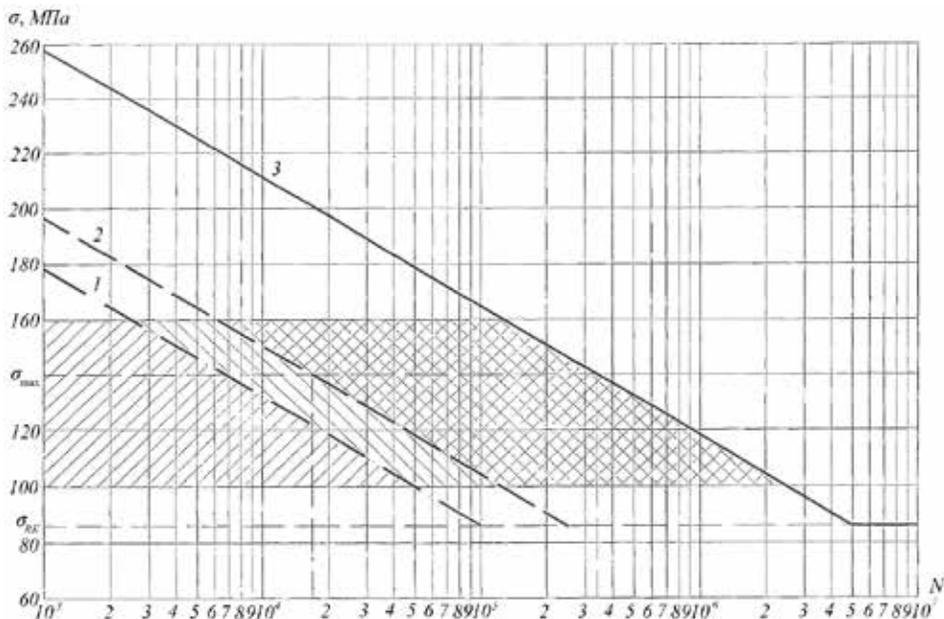


Рис. 4. Диаграмма усталостных повреждений 1 – линия окончания инкубационного периода усталости; 2 – линия окончания периода зарождения и развития субмикроскопических трещин до микроскопических размеров (линия Френча); 3 – кривая окончания периода развития микротрещин до макротрещин критического размера [15].

металла сказывается адсорбционное воздействие среды, что проявляется в виде снижения  $\sigma_{RK}$  и  $\sigma_T$  на максимальные 15 % (в условиях сильноагрессивной среды).

Для определения скорости накопления усталостной повреждаемости воспользуемся формулой

$$v_{pn} = \frac{V_{n1}}{N \cdot \Delta\sigma_n} \quad (5)$$

На рис. 4 представлена диаграмма усталостных повреждений исследуемых образцов из стали СтЗсп в условиях циклического растяжения с асимметричностью цикла  $R = 0,3$ .

Использование диаграммы и формулы (4) позволяет определить динамику изменение скорости накопления усталостной повреждаемости в рассматриваемом случае чистой усталости (см. таблицу 1). При этом значение максимальных напряжений  $\sigma_{max}$  выбирается согласно линии Френча.

Для случая, учитывающего адсорбционное воздействие среды на процесс усталости (в условиях сильноагрессивной среды), все показатели уменьшаются на 15 % (см. таблицу 2).

Анализируя полученные данные в таблицах 1 и 2, можно сделать следующие выводы: общий уровень повреждающих напряжений

**Таблица 1**  
Скорость накопления усталостной повреждаемости при чистой усталости ( $\sigma_{RK} = 85$  МПа) [выполнено авторами]

$\sigma_{max}$ , МПа	197	165	150	118	104
$N$ , $10^3$ цикл	1	5	10	50	100
$\Delta\sigma_n$ , МПа	112	80	65	33	19
$v_{pn}$ , $10^{-6}$ мм <sup>3</sup> /(МПа·цикл)	0,00893	0,00250	0,00154	0,00061	0,00053

**Таблица 2**  
Скорость накопления усталостной повреждаемости с учётом адсорбционного воздействия среды ( $\sigma_{RK} = 72,3$  МПа) [выполнено авторами]

$\sigma_{max}$ , МПа	167,5	140,3	127,5	100,3	88,4
$N$ , $10^3$ цикл	1	5	10	50	100
$\Delta\sigma_n$ , МПа	95,2	68	55,2	28	16,1
$v_{pn}$ , $10^{-6}$ мм <sup>3</sup> /(МПа·цикл)	0,01050	0,00294	0,00181	0,00071	0,00062





для СтЗсп в условиях сильноагрессивной среды (при равенстве ресурсов конструкций для двух рассматриваемых случаев) уменьшается; скорость накопления усталостной повреждаемости различна и при эксплуатации в условиях сильноагрессивной среды увеличивается в среднем на 17,2 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение значения скорости образования усталостных трещин определяется наличием первичных факторов коррозионного воздействия на элементы металлоконструкции, причём это увеличение постепенное и определяется сроком эксплуатации, что позволяет квалифицировать фактор времени как определяющий фактор.

Уровень деградации основных характеристик и свойств элементов металлоконструкции наряду с количеством циклов нагружения определяется также и продолжительностью воздействия на них агрессивной среды, однозначно определяющей скорость накопления усталостной повреждаемости.

Включение в модель [5, 6] представленной модели (5) для определения скорости накопления усталостной повреждаемости с учётом модели (1) для определения предела адсорбционной усталости с учётом временной составляющей, позволит более полно отражать процесс совместного воздействия коррозии и циклических нагрузок на металлоконструкции эскалаторов метрополитена.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ватулин Я. С., Попов В. А., Дятлов В. Н. Техническое диагностирование складных элементов крановых путей грузоподъёмного оборудования в машинных залах тоннельных эскалаторов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2022. – Т. 16. – № 3. – С. 241–250. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106323>.
2. Попов Б. Е., Котельников В. С., Зарудный В. В. [и др.]. Магнитная диагностика и остаточный ресурс подъёмных сооружений // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 2 – С. 44–49. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11691124&ysclid=ln4bswtztc251027582>. Доступ 07.07.2023.

3. Харлов М. В., Попов В. А. Методика оценки технического состояния эскалатора // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9 – № 4. [Электронный ресурс]: <http://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf>. Доступ 15.05.2023.

4. Tawancy, H. M., Ul-Hamid, A., Abbas, N. M. Practical engineering failure analysis. New York: Marcel Dekker, 2004, 616 p. ISBN 978-0203026298.

5. Стеклов О. И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с. ISBN 978-5217005009.

6. Дятлов В. Н. Моделирование процесса коррозии несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. – 2022. – № 1 (68). – С. 29–35. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48283752&ysclid=ln4dgtk2rj605841534>. Доступ 16.07.2023.

7. Дятлов В. Н. Уточнение модели развития коррозионных дефектов несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. – 2022. – № 3 (70). – С. 46–50. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/vgxvvc?ysclid=ln4djsx281v972174148>. Доступ 16.07.2023.

8. Kazarinov, N., Smirnov, A., Petrov, Y., Gruzdokov, A. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system. E3S Web of Conferences, 2020, Vol. 157, Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019), art. 01020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015701020>.

9. Бардышев О. А., Попов В. А., Филин А. Н., Харлов М. В. Обеспечение безопасности тоннельных эскалаторов. – СПб.: Безопасность, 2020. – 128 с. ISBN 978-5898090715.

10. Герасименко А. А., Александров Я. И., Андреев И. Н. [и др.]. Защита от коррозии, старения и биоповреждения машин, оборудования и сооружений: Справочник: В 2 т. Т. 1. / под общ. ред. А. А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987. – 688 с.

11. Schweitzer, P. A. Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals. Boca Raton, CRC Press, 2006, 752 p. ISBN 978-0429127137.

12. Селиверстов Г. В., Данилов А. С. Исследование коррозионной усталости металлоконструкций грузоподъёмных машин // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – 2009. – № 2–1. – С. 248–253. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14615398&ysclid=ln4ftgq29u157526384>. Доступ 16.07.2023.

13. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчёт элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.

14. Розенфельд И. Л. Коррозия и защита металлов. – М.: Металлургия, 1969. – 448 с.

15. Мыльников В. В., Кондрашкин О. Б., Шетулов Д. И. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: Монография. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. – 177 с. ISBN 978-5528002897 [Электронный ресурс] <http://www.bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/physics/870594.pdf>. Доступ 16.07.2023. ●

### Информация об авторах:

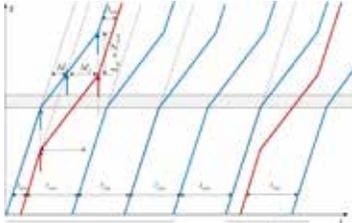
**Дятлов Вячеслав Николаевич** – аспирант кафедры наземных транспортно-технологических комплексов Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербурге, Россия, [w.dyatlov@gmail.com](mailto:w.dyatlov@gmail.com).

**Орлов Сергей Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических комплексов Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербурге, Россия, [orlov@srbtmuseum.ru](mailto:orlov@srbtmuseum.ru).

**Попов Валерий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических комплексов Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербурге, Россия, [vrpovov\\_58@mail.ru](mailto:vrpovov_58@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 07.07.2023, дополнена 12.08.2023, одобрена после рецензирования 29.09.2023, принята к публикации 02.10.2023.

# Т



## ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ 30

*Виртуальная сцепка как перспективное решение для повышения пропускной способности.*



## ГРАЖДАНСКАЯ АВИАЦИЯ 40

*Сокращение критических зон радиомаяков и повышение эффективности аэродромов.*



## ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ 53

*Организация плано-предупредительного ремонта двухэтажных вагонов.*



## ОРГАНИЗАЦИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ 62

*Цифровая инфраструктура и телематика для горных дорог.*

## ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ 72

*Законодательство о военно-транспортной обязанности.*

### УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

