



ISSN 1819-432X print / ISSN 1993-3495 online

СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО
СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION

ТОМ 6, N3, 2010, 169-176

УДК 624.014 + 624.011.1 + 678.01

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОМИ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ ВАНТАЖЕННІ

В. В. Стоянов

*Одеська державна академія будівництва і архітектури,
вул. Дидрихсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029.*

E-mail: list@ogasa.org.ua

Отримана 26 серпня 2010; прийнята 24 вересня 2010.

Анотація. У роботі розглядається рівняння довговічності С. Н. Журкова стосовно металевих конструкцій для прогнозування граничних циклів вантаження. У роботі показана прогнозована залежність величини, напруження σ і рівень циклів вантаження N . Частота циклів вантаження вибрана – 4 цикли в секунду, а характер вантажень визначається коефіцієнтом асиметрії ρ . Графік співвідношення σ - ϵ для металу і вуглепластика вказує на те, що до моменту переходу металу в пластичну стадію спостерігається спільна робота металу з вуглепластиком. Порівняльний аналіз результатів експерименту і чисельного розрахунку зразків металевих елементів, посилені вуглепластиком при циклічному вантаженні; пропонується розглядати атомно-молекулярну модель тріщини і процес її розвитку на базі квантової механіки, де електрони є хмарою з електронною щільністю, що міняється. Квантова модель тріщини відповідає сучасним фізичним основам мікросвіту і відкрита для подальшої деталізації.

Ключові слова: рівняння довговічності металевих конструкцій, квантова модель мікротріщини, вуглепластик.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАЛОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В. В. Стоянов

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,
ул. Дидрихсона, 4, г. Одесса, Украина, 65029.*

E-mail: list@ogasa.org.ua

Получена 26 августа 2010; принята 24 сентября 2010.

Аннотация. В работе рассматривается уравнение долговечности С.Н. Журкова применительно к металлическим конструкциям для прогнозирования предельных циклов нагружения. В работе показана прогнозируемая зависимость величины, напряжения σ и уровень циклов нагружения N . Частота циклов нагружения выбрана – 4 цикла в секунду, а характер нагружений определяется коэффициентом асимметрии ρ . График соотношения σ - ϵ для металла и углепластика указывает на то, что до момента перехода металла в пластическую стадию наблюдается совместная работа металла с углепластиком. Сравнительный анализ результатов эксперимента и численного расчета образцов металлических элементов, усиленных углепластиком при циклическом нагружении; предлагается рассматривать атомно-молекулярную модель трещины и процесс ее развития на базе квантовой механики, где электроны представляют собой облако с меняющейся электронной плотностью. Квантовая модель трещины соответствует современным физическим основам микромира и открыта для дальнейшей детализации.

Ключевые слова: уравнение долговечности металлических конструкций, квантовая модель микротрещины, углепластик.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF FATIGUE OF METALWORKS ELEMENTS AT CYCLIC LOADING

V. V. Stoyanov

*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture,
4, Didrikhsona Str., Odessa, Ukraine, 65029.*

E-mail: list@ogasa.org.ua

Received on August 29, 2010; accepted on September 24, 2010.

Abstract. The paper considers the Zhurkov longevity equation as applied to metalworks to forecast of limiting loading cycles. The predicted dependence of quantity, stress σ and level of cycles of loading of N has been given in the paper. The frequency of loading cycles has been chosen as 4 cycles per second, and the loading pattern has been determined by an asymmetry coefficient ρ . A diagram of proportion σ - ε for metal and carbon plastics points out that up to the period of transition of metal to the plastic stage there is metal and carbon plastics collaboration. The comparative analysis of the experimental results and calculations of samples of metal elements strengthen with carbon plastics at cyclic loading has been made. The atomic and molecular model of the crack and its development has been recommended to consider on the basis of quantum mechanics where the electrons can be represented in a form of a cloud with changing electronic density. The quantum pattern of the crack corresponds to the contemporary physical foundations of microcosm and open for further detailing.

Keywords: longevity equation of metalworks, quantum pattern of microcrack, carbon plastics.

Введение

В последние годы в мировой строительной индустрии заметно проявляется тенденция к использованию высокомодульных материалов для улучшения эксплуатационных характеристик традиционных материалов строительства, в том числе и металла [1, 2]. Экспериментальные исследования указывают, например, на возможность значительного повышения вибрационной прочности (выносливости) металлических элементов, усиленных в проблемных местах углепластиком. В составных двутавровых балках – это стыки поясов и стенки, в металлических резервуарах – это стык стенки с днищем, места присоединения патрубков и др. [3, 4]. По мере накопления результатов экспериментальных исследований, несомненно, потребуются корректировка гл. 3 СНиП II-23-81* «Металлические конструкции» [5]. Теоретическая база, позволяющая прогнозировать динамическую усталость таких комбинированных металлических конструкций, невелика. Стандартные программы, широко известные в Украине («Liga, SKAD»), не обеспечивают возможности численного решения таких динамических задач.

1. Уравнение долговечности С. Н. Журкова

Для решения вопроса о выборе теоретического подхода к поставленной проблеме обратимся к анализу известных критериев прочности. Благо их великое множество. Например, изданная еще в 60-х годах прошлого века работа И. И. Гольденבלата [6], посвященная короткому знакомству с известными критериями прочности, содержит около 200 стр. К настоящему времени количество критериев прочности, понятно, возросло многократно. Из этого многообразия критериев прочности мы остановимся на законе долговечности, разработанном в 50-х годах прошлого века академиком Серафимом Николаевичем Журковым [7]. В отмеченном выше обзоре [6] этому закону посвящено всего неполных две страницы. В 60-х годах этот закон получил развитие в работах Г. М. Бартенева, Ю. В. Зеленева [8], В. Е. Гуля [9] и др. Стержнем этого критерия прочности разрушения является фундаментальная база атомно-молекулярного процесса разрушения, т.е. заложенная здесь физическая теория прочности открыта для совершенства по мере развития физики. И это главное в нашем выборе. Основой подхода является учет термофлук-

туационного характера разрыва и восстановления химических связей. Причем напряжения здесь способствуют разрыву связей или препятствуют их восстановлению. В тех случаях, когда величина напряжений в материале ниже предела прочности и слишком мала для разрыва химических связей, вероятность разрыва возможна из-за тепловых флуктуаций. Это происходит в многочисленных местах дислокаций у вершин микротрещин и других мест концентраций напряжений. Термофлуктуационный механизм разрушения состоит в совместном действии на связи в молекулах тепловых колебаний и напряжения.

Количественное выражение закона долговечности С. Н. Журкова имеет вид:

$$\tau_d = \tau_0 \cdot e^{(u_0 - \gamma \cdot \sigma) / R \cdot T}, \quad (1)$$

где τ_d – долговечность при заданном напряжении (с);

τ_0 – период тепловых колебаний атомов (с);

u_0 – энергия активации разрушения (кДж/моль);

γ – структурно-чувствительный коэффициент (см³/моль);

σ – напряжение (МПа);

R – газовая постоянная (кДж/моль · град. К°);

T – температура (град К°).

Закон долговечности (1) в виде различных экспонент, преимущественно, физических величин

(постоянных – R, τ_0 , u_0 , и переменных – T и σ) остается востребованным и ныне. Возможно, требуется улучшить физическую базу единственного коэффициента в (1) γ , (структурно-чувствительного).

За прошедшие несколько десятилетий установились новые физические понятия микромира, которые не нашли отражение при рассмотрении термофлуктуационных процессов разрушения с использованием коэффициента γ . Рассмотрим только принципиальную сторону этого вопроса, не затрагивая количественную, так как это совершенно другая тема.

Коротко остановимся на термофлуктуационной теории разрушения. Она достаточно подробно представлена в работе Бартенева Г. М. [7] как молекулярная модель процесса разрушения, согласно которой происходит последовательный разрыв или восстановление химических связей (рис. 1).

Здесь атомы рассматриваются как частицы сплошности (находящиеся в объеме тела 1–6 и на свободных поверхностях 7–11 и далее). На очереди разрыв связи по атомам 6–6 (рис. 1).

Несмотря на это очень упрощенное представление оно получило довольно широкое представление. Например, на рис. 2 изображена упрощенная схема микротрещины – это фрагмент рис. 1.3 из работы [13]*, где связи типа 6–6 (рис. 1) называются перегруженными.

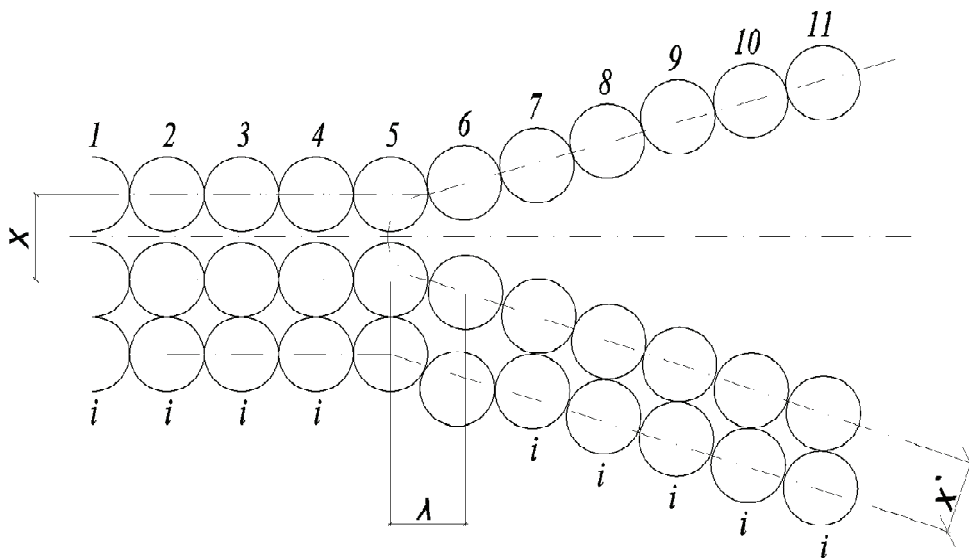


Рисунок 1. Молекулярная модель микротрещин в хрупком материале [7].

*Заметим, что рис. 1.3 [13] продублирован из ранней научно-популярной работы (1971 г.) известного английского ученого Дж. Гордона.

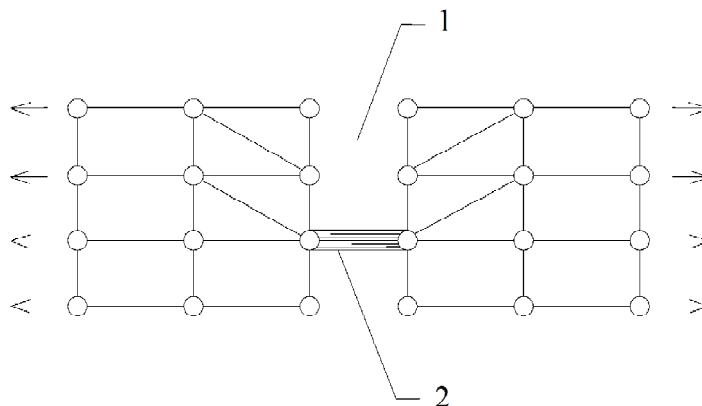


Рисунок 2. Упрощенная схема атомного строения вещества при наличии трещины (фрагмент рис. 1.3 [13])
1 – трещина; 2 – перегруженная связь.

Представленная выше молекулярная модель трещины (рис. 1 и рис. 2) носит научно-популярный характер и не отражает уже давно известных понятий об атомах, молекулах и связях между ними, и потому не может быть основой для исследований, касающихся развития микротрещин.

2. Квантовая модель микротрещин

Теперь коротко остановимся на том, о чем мы говорили выше уже с позиции квантового представления об атоме и его определении еще Н. Бором. В современном представлении электрон как волна-частица размазан по орбитам в атомах и равномерно в молекулах в виде электронных облаков или лепестков. Каждый из электронов атома располагается только в строго заданной области вблизи ядра, появились понятия «электронная орбиталь», спин и многое другое.

Обратимся к изображенной на рис. 3 молекулярной модели микротрещины с позиции квантового строения молекул и атомов.

Здесь, в отличие от модели на рис. 1 и на рис. 2, представлен процесс разделения электронного облака молекул на атомы, сопровождаемый изменениями электронной плотности, в каждой конфигурации двухатомной молекулы начиная с (h) и дальнейшего прохождения различных стадий разделения (g-b) до образования свободной поверхности между атомами (a-a). Квантовая модель трещины соответствует современным физическим основам микромира и открыта для дальнейшей детализации.

Тип связи между частицами соответствует типу вещества (молекулярно или атомно или ионно кристаллические, металлы) – это связи водородные, ванн-дервальсовы, ковалентные, ионные или металлические.

Квантовая модель образования микротрещины (рис. 3) указывает:

- в процессе развития микротрещины участвует целая группа молекул, располагающихся вдоль оси трещины, начиная от ее вершины (b-h);
- при расстоянии между атомами (a-a) около 8 \AA , когда внешний электрон, перейдя от одного атома к другому, оказывается в состоянии с меньшей энергией, равновозможно дальнейшее развитие трещины или восстановление молекулы;
- при расстоянии между атомами в 10 \AA и более микротрещина будет развиваться далее;
- необходимо учитывать особенности компоновки молекул, детали орбиталей атомов и др.

Исходя из квантовой модели микротрещины следует разработать детали определения величины коэффициента γ , учитывая при этом пространственную структуру трещины, т. е. размерность γ составляет $\text{см}^3/\text{моль}$.

3. Прогнозирование долговечности металлических конструкций при динамическом нагружении.

Закон долговечности (1) подтвержден на всех классах твердых тел [8]. Вполне естественно, что разработанный для твердых полимеров, этот за-

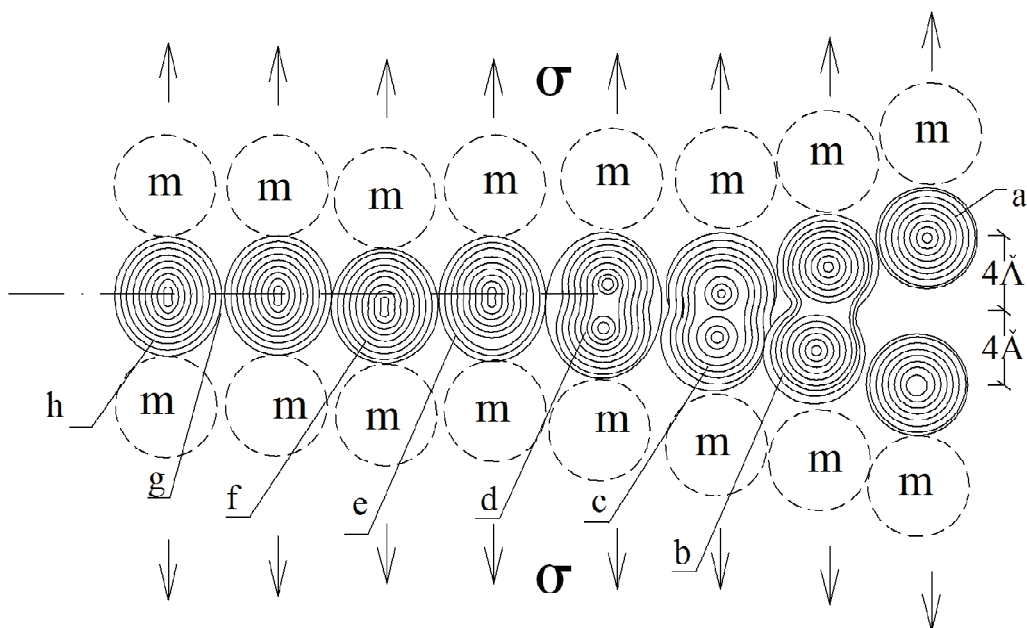


Рисунок 3. Квантовая модель микротрещины: b-h – двухатомные молекулы в зоне термофлуктуационного воздействия; a – атомы на свободной поверхности; b – молекула в вершине трещины перед возможным разрывом связи или ее восстановлением; m – молекулы за зоной термофлуктуационного воздействия.

кон наиболее активно применяется и развивается в этой области.

Успешно используется этот закон для прогнозирования длительной прочности древесины. Возможно, это происходит потому, что древесина тоже полимер, но природный. Во всяком случае, в учебнике по «Конструкциям из дерева и пластмасс» (под ред. проф. Г. Г. Карлсена) с 1986 г. (5-м издании) присутствует параграф «Основные закономерности длительной прочности древесины и пластмасс». Располагая средними значениями разрушающего напряжения и времени, полученными из испытаний кратковременной нагрузкой, прогнозируется длительная прочность древесины для заданного периода действия неизменного напряжения.

Успешно используется (1) и для прогнозирования механических характеристик металла, но в основном курсе металлических конструкций (1) пока не присутствует. В нашем случае мы ограничимся применением формулы (1) для прогнозирования предельных циклов нагружения металлических конструкций.

Для этого полагаем, что механизм разрушения один и тот же при статических и циклических нагрузках, тогда приближенно верен так называемый критерий Бейли, позволяющий в

принципе по уравнению долговечности рассчитать время до разрушения при любом временном режиме нагружения, в том числе и при циклическом [8]:

Критерий Бейли запишем в виде (при постоянной температуре):

$$\int_0^{t_p} \frac{dt}{\tau_D(\sigma)} = 1, \quad (2)$$

где t_p – время разрушения при заданном произвольном режиме нагружения $\sigma = \sigma(t)$, а $\tau_D(\sigma)$ – долговечность материала известная при каждом значении напряжения растяжению σ уравнение долговечности.

Полагаем, что в каждый момент времени образец разрушается на какую-то долю $dt_p = dt / \tau_D(\sigma)$ и сумма этих разрушений вплоть до момента разрушения, когда $t = t_p$, составляет единицу [8], запишем (2) для циклического нагружения в виде:

$$\int_0^{t_p} \frac{dt}{\tau_D(\sigma)} = N \int_0^\theta \frac{dt}{\tau_D(\sigma)} = 1, \quad (3)$$

где N – число циклов до разрушения;

θ – период цикла;

$t_p = N \cdot \theta$ – время до разрушения.

При постановке экспериментов следует обратить внимание на частоты циклов нагружения, так как при большей частоте возможен перегрев металла [8], а локальное повышение температуры образца снижает его долговечность.

На рис. 4а показана прогнозируемая зависимость величины напряжения σ и уровень циклов нагружений N . Частота циклов нагружения выбрана – 4 цикла в секунду, а характер нагружений определяется коэффициентом асимметрии $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0$.

График соотношения σ – ε (рис. 4б) для металла (С 235) и углепластика (Sika® Carbo Dur®Н и Sika Wrap® Hex) указывает на то, что до момента перехода металла в пластическую стадию ($\sigma_y = 220$ МПа) наблюдается совместная упругая работа металла с углепластиком.

Отсюда следует важный вывод, что упругий участок прямой диаграммы деформирования металла (рис. 4б) способствует снижению величины нормальных напряжений σ в металле ниже предела текучести. Причем, по мере увеличения объема присутствия в сечении углепластика пре-

дел этот снижается. Известно, что такое снижение имеет место до определенной величины (рис. 5) – усталостного разрушения (вибрационной прочности σ_v рис. 2.25 [14], рис. 164 [15], рис. 2 [16]). Очевидно, что наличие углепластика повышает вибрационную прочность σ_v металла. К этому заключению вернемся ниже.

Прямая долговечности на основании формул (1) и (3) обеспечивает возможность убедиться в достоверности величин, полученных в результате экспериментальных исследований [12]. К тому же, мы можем прогнозировать динамическую усталость металлических конструкций усиленных методом «консервации трещин» [12], т. е. нанесения на проблемные места (наиболее расположенные к развитию трещин на исследуемом объекте) высокомодульных углепластиковых холстов (типа Sika Wrap® Hex) или лент (типа Sika® Carbo Dur®Н) или их комбинаций. Из рис. 4а следует, что результаты экспериментальных исследований металлических образцов хорошо укладываются вблизи прямой долговечности.

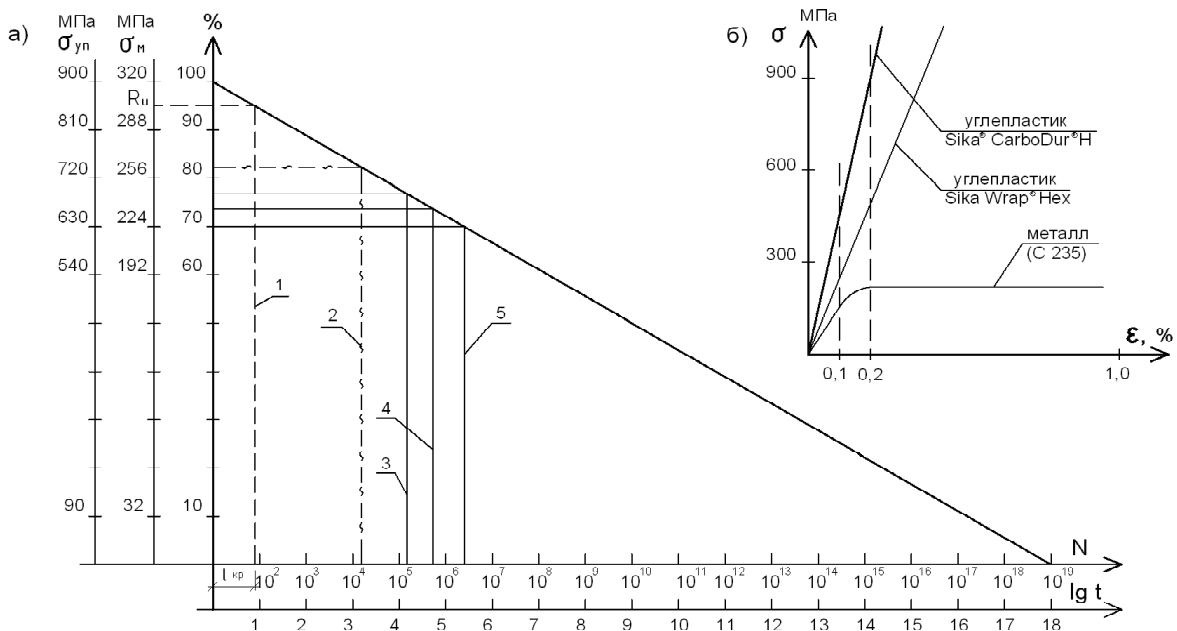


Рисунок 4. Прогнозирование динамической усталости (σ_{B3}) элементов металлических конструкций (коэф. асимметрии $\rho = 0$, а частота N составляет 4 цикла в сек.) а) зависимость σ - N (напряжения – циклы нагружений); $l_{кр}$ – участок кратковременного разрушения; б) график σ – ε для углепластика и металла; 1 – образец для определения предела прочности; 2 – 5 образцы с поперечной искусственной трещиной; 3, 4, 5 – усиленные углепластиком (3 – 1-м холстом; 4 – 2-мя холстами; 5 – 3-мя холстами).

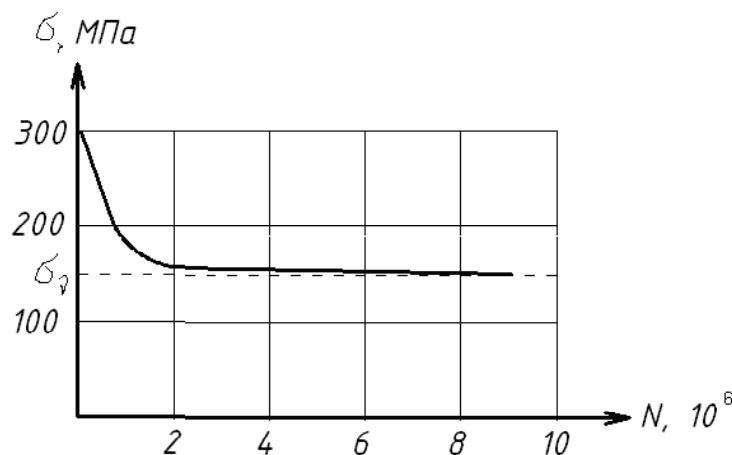


Рисунок 5. Зависимость вибрационной прочности σ_v от числа циклов нагружения N .

Серия образцов 3-4-5 (рис. 4а) размером 250×50 мм с поперечной трещиной длиной 15 мм выдерживает при растяжении значительно большее число циклов нагружений, чем аналогичные образцы серии 2 (рис. 4а) без усиления [12]. Так, например, образец с накладкой из трех углепластиковых холстов (Sika Wrap® Hex) не разрушился при 2,0 млн. циклов нагружения в то время, как аналогичные образцы без усиления разрушились при 20 – 40 тысячах циклов.

Как уже отмечалось выше, усиление углепластиком металлических элементов с поперечной трещиной способствует повышению работоспособности таких ослабленных конструктивов и, одновременно, позволяет снизить величину нормального напряжения σ в металле ниже предела текучести σ_y (для стали С 235 – это напряжение $\sigma \cong 150$ МПа), что обеспечивает увеличение долговечности металлических элементов.

Такое предельное напряжение σ_δ можно назвать безопасным $\sigma_\delta \cong 0,65\sigma_y$, как предлагается в работах [17, 18].

Выводы:

1. Подтверждена возможность использования уравнения долговечности С.Н. Журкова для **приближенного** прогнозирования динамики усталости металлических конструкций при циклическом нагружении.
2. Предложенная **квантовая** модель микротрещины, при ее дальнейшей отработке для различных типов связей между частицами, по-

зволяет не только использовать ее при определении величины γ (структурно-чувствительный коэффициент), но и для рассмотрения **процесса перехода микротрещины в магистральную трещину**.

Литература

1. Стоянов В. В. Новые подходы обеспечения несущей способности строительных металлических конструкций в полном объеме срока эксплуатации. В сб. VII Украинском НТК Металлические конструкции. – К. : Сталь. – С. 280–292.
2. Strengthening of structures with CERP strips Sika Carbo Dur Convention, 1997.
3. Стоянов В. В. Металлические резервуары – некоторые проблемы проектирования и реконструкции / В. В. Стоянов // Металеві конструкції. – 2007. – Том 13, Номер 1. – С. 45–49.
4. Стоянов В. В. «Консервация» трещин как способ продления срока работоспособности / В. В. Стоянов // Промислове будівництво та інженерні споруди. – К. : Укрпроектстальконструкції, 2009. – № 4.
5. Стальные конструкции : СНиП II-23-81*. – М., 2005.
6. Гольденблат И. И. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / И. И. Гольденблат, В. А. Копнов. – М., Машиностроение, 1968. – 190с.
7. Журков С. Н. Временная зависимость твердых тел / С. Н. Журков, Б. Н. Нарзулаев // Журнал технической физики. – 1953. – Т. 23.
8. Бартнев Г. М. Физика и механика полимеров / Г. М. Бартнев, Ю. В. Зеленов. – М. : Высшая школа, 1983. – 390 с.
9. Гуль В. Е. Структура и прочность полимеров / В. Е. Гуль. – М., Химия, 1971. – 344 с.

10. Дж. Орир. Физика/ Дж. Орир. – М.: Мир, 1981. – 288 с.
11. Платунов Е., Физика / Е. Платунов, В. Самолетов, С. Буравой. – СПб.: Питер, 2005. – 494 с.
12. Стоянов В. В. Испытания на выносливость растянутых металлических образцов с нормальной искусственной трещиной / В. В. Стоянов, Ж. Мазин Алайд // Современные строительные конструкции. – О.: Внешрекламсервис, 2009. – С. 51–58.
13. Зайцев Ю. В. Механика разрушения для строителей / Ю. В. Зайцев. – М.: Высшая школа, 1991. – 285 с.
14. Горев В. В. Металлические конструкции / В. В. Горев. – М.: Высшая школа, 2001. – Т. 1. – 551 с.
15. Стрелецкий Н. С. Курс металлических конструкций / Н. С. Стрелецкий. – М. Л.: Изд-во стр-во арх., 1940. – 790 с.
16. Новоселов А. А. Исследование долговечности подкрановых балок с тавровым верхним поясом / А. А. Новоселов, В. С. Казарновский // В сб. VII Украинского НТК «Металлические конструкции». – К.: Сталь, 2004. – С. 260–265.
17. Скудра А. М. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиком / А. М. Скудра, Ф. Я. Булавс. – Рига: «Зинатне», 1971.
18. Савин В. Ф., Блазнов А. Н. Метод определения долговременной прочности стеклопластиковой арматуры // В сб. 2-ой ВНТ конференция ИАМП-2001. – Алт. гос. техн. ун-т. – 2001. – С. 214–219.

Стоянов Володимир Васильович – д.т.н., професор, завідувач кафедри металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій будівельного факультету Одеської державної академії будівництва й архітектури. Академік Академії будівництва України. Голова Асоціації фахівців дерев'яних конструкцій Росії, України, Білорусії (АСДК РУБ). Наукові інтереси: реконструкція й посилення металевих складених конструкцій високомодульними матеріалами, збірні оболонні легкі покриття.

Стоянов Владимир Васильевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлических, деревянных и пластмассовых конструкций строительного факультета Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Академик Академии строительства Украины. Председатель Ассоциации специалистов по деревянным конструкциям России, Украины, Белоруссии (АСДК РУБ). Научные интересы: реконструкция и усиление металлических составных конструкций высокомодульными материалами, сборные оболочечные легкие покрытия.

Stoyanov Vladimir Vasilyevich, D. Sc. (Engineering) – a Professor, the Chair of the Metal, Wooden and Plastic Structures Department of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. An Academician of the Civil Engineering Academy of Ukraine. The Chairman of the Association of the Wooden Structures Experts of Russia, Ukraine, Byelorussia. Research interests: refurbishment and reinforcement of metal composite structures with high-module materials, prefabricated shell lightweight roofs.