

8. Гмурман В.Е. Теория вероятности математическая статистика. – М.: высшая школа, 2000. – 479 с.
9. Громовой Э.П. Математические методы и модели в планировании и управлении на морском транспорте. – М.: Транспорт, 1979. – 360 с.
10. Кондратьев С.И. Теоретические основы управления крупнотоннажными судами по критериям безопасности и энергосбережения: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Новороссийск, 2004.
4. Bagrov L.V. Sea transport (general course). М., "Transport", 1986.
5. Nikitin A.M. Saint Petersburg. Publishing house of the Polytechnic University, 2006.360s. 6. Bazara M., Shetty K. Nonlinear programming. Theory and Algorithms. М.: Mir, 1985.
7. Butov A.C., Legostaev V.A. Planning the work of the fleet and ports. М.: Transport, 1988.175 s.
8. Gmurman V.E. Probability theory mathematical statistics. - М.: higher school, 2000. -- 479 p.
9. Thundering E.P. Mathematical methods and models in the planning and management of maritime transport. – М.: Transport, 1979, 360 p.
10. Kondrat'ev S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnymi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energosberezheniya// Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk.- Novorossijsk, 2004.

REFERENCES

1. Arkhipenkov S. Ya. "What if ...? Or Economic modeling by means of Oracle Express" // ORACLE Magazine RE. 1997. No. 3 (5).
2. Arkhipenkov S. Ya. Analytical systems based on Oracle Express OLAP. М. "Dialog-MERPHI", 2000. 313 p.
3. Atlas B.A., Butov A.C., Volkov N.I. Economic Cybernetics in Water Transport. М: Transport. 1978. 280 p.

УДК 539.432

DOI: 10.34046/aumsuomt92/24

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА НАГРУЖЕНИЯ НА КИНЕТИКУ ТРЕЩИН ЧАСТЬ I. МЕХАНИЗМЫ, СОПУТСТВУЮЩИЕ НЕРЕГУЛЯРНЫМ НАГРУЗКАМ

А.В. Файвисович, доктор технических наук

Кинетика макротрещины является следствием тех механизмов, которые протекают в непосредственной близости от ее кончика при воздействии на конструктивный элемент переменных по амплитуде нагрузок. Анализ литературных источников свидетельствует о значительном интересе исследователей к вопросу роста макротрещины при нерегулярном нагружении, что объясняется, как практической целесообразностью, так и простым интересом к природе явления усталостного разрушения. Установлено, что на скорость роста трещины оказывает влияние не только амплитуда нагрузки, но и история (последовательность) их воздействия. Вследствие различных сочетаний знаков и амплитуд нагрузок и их последовательности, возможны противоположные результаты, приводящие, как к замедлению, так и к возрастанию скорости трещины. В первой части работы основное внимание уделено возможным механизмам, протекающим в период неустойчивости трещины в непосредственной близости от ее устья. Во второй части статьи будет приведена классификация нерегулярных нагрузок с соответствующими последствиями на кинетику трещины.

Ключевые слова: макротрещина, скорость роста трещины, конструктивный элемент, коэффициент интенсивности напряжений

Abstract. The kinetics of a macrocrack is a consequence of the mechanisms that occur in the immediate vicinity of its tip when the structural element is exposed to variable amplitude loads. Analysis of the literature indicates a significant interest of investigators to the question of macrocrack growth under irregular loading, which is explained by both practical expediency and simple interest in the nature of the phenomenon of fatigue failure. It was found that the crack growth rate is influenced not only by the amplitude of the load, but also by the history (sequence) of their impact. Due to different combinations of values and amplitudes of loads and their sequence, an opposite result is possible, leading to both a slowdown and an increase in the crack velocity. In the first part of the paper, the main attention is paid to the possible mechanisms occurring during the instability of the crack in the immediate vicinity of its tip. In the second part of the article the classification of irregular loads with corresponding consequences on the fracture kinetics will be given.

Keywords: macrocrack, crack growth rate, structural element, stress intensity factor

Введение

В большинстве случаев КЭ в процессе эксплуатации объекта воспринимают переменную во времени нагрузку, которая может быть описана тригонометрической функцией. Основные характеристики цикла показаны на примере случая

нагружения с постоянной амплитудой напряжений, рис. 1, где: $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ – наибольшее и наименьшее значения напряжения цикла; $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$ – амплитуда напряжений цикла; $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$ – среднее напряже-

ние цикла; $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ – размах напряжений; $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ – коэффициент асимметрии цикла. Асимметрия цикла оказывает существенное влияние на кинетику трещин, что является основным предметом рассмотрения многих исследований.

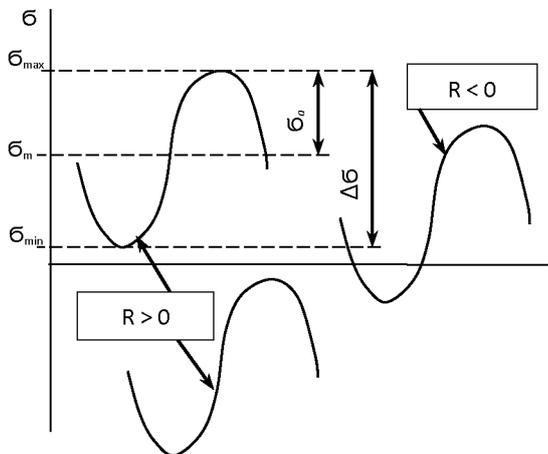


Рисунок 1 – Характеристики цикла нагружения

В случае, когда размер пластической зоны перед кончиком трещины существенно меньше ее длины (менее 20%), при анализе напряженного состояния можно использовать силовой параметр – коэффициент интенсивности напряжений (КИН), предложенный Irwin [2]. Для прогнозирования усталостного разрушения с постоянной амплитудой используют кинетическую диаграмму усталостного разрушения (КДУР), построенную в координатах: СРТ за один цикл - размах КИН, $\log(dl/dN) - \log(\Delta K)$. На рис. 2 показан характерный для металлов вид КДУР. Размах КИН является движущей силой, определяющей СРТ. Предельными значениями ΔK являются: слева ΔK_{th} – пороговое значение размаха КИН, ниже которого не возможен рост трещины, и справа ΔK_{fc} – критическое значение размаха КИН при котором происходит окончательное разрушение.

Участок I характерен нестабильностью развития трещины и очень низкими значениями ее скорости ($< 10^{-8}$ м/цикл). С практической стороны установление величины ΔK_{th} имеет большое значение для оценки остаточной прочности КЭ с макротрещиной и трещиностойкости конструкционного материала. Однако, вследствие низкой СРТ на данном участке, продолжительность испытаний становится очень большой и, соответственно, увеличивается их стоимость. Величина ΔK_{th} считается константой для данного конструкционного материала и зависит только от условий проведения эксперимента. Следует уточ-

нить, что в случае «малых» трещин (длиной, сопоставимой с размером зерна) величина ΔK_{th} для того же материала становится меньше, что, в первую очередь, объясняют отсутствием эффекта закрытия берегов малых трещин, но проявляющийся в случае макротрещин (длинных трещин).

Для участка III характерен рост трещины при высоких скоростях ($> 10^{-6}$ м/цикл), что предшествует окончательному разрушению КЭ (образца). По этой причине данный участок не представляет большой практический интерес.

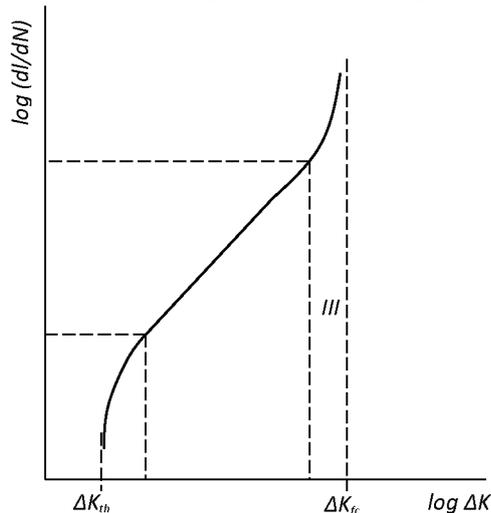


Рисунок 2 - Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

Большинство исследований связано с II участком КДУР, который соответствует стабильному росту макротрещины со средними скоростями 10^{-8} - 10^{-6} м/цикл. Как видно на рис. 2, этот участок в логарифмических координатах представлен прямой линией и получил название «участок Пэриса» в честь впервые предложенной Paris формулы [3]:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m, \tag{1}$$

где $\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi l}$, Y – поправочный коэффициент на геометрию образца и относительный размер трещины, l ; $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$; C , m – эмпирические коэффициенты, характеризующие свойство материала сопротивляться развитию в нем трещин.

Формула (1) может быть использована только для описания II участка КДУР. Кроме того, она не учитывает влияние величины коэффициента асимметрии цикла, R , наличия агрессивной среды, частоты нагружения и других внешних факторов, влияющих на разрушение. Впоследствии было предложено более 100 формул для описания различных участков и всей КДУР в целом. Каждая формула (модель) имеет свои достоинства и недостатки. Большинство из

них объединяет использование ΔK в качестве основного параметра, характеризующего движущую силу, обеспечивающую рост трещины.

Эффект воздействия переменной во времени нагрузки на конструктивный элемент (КЭ) зависит не только от ее величины, но и от последовательности амплитуд циклических напряжений. Рассмотрим два возможных случая нагружения: 1) с постоянной во времени амплитудой напряжений и 2) с изменяющейся во времени амплитудой напряжений. Результат воздействия переменных нагрузок можно количественно оценить либо на основе среднего показателя, $\Sigma n/N$, как отношение реального числа циклов к долговечности элемента, рассчитанной на основе закона Miner [1] (суммирование усталостных повреждений), либо отношением мгновенных значений скорости роста трещины (СРТ) при постоянной (СА) и переменной (ВА) амплитудах напряжений, $(da/dN)_{CA}/(da/dN)_{VA}$. В случае нагружения с постоянной амплитудой $\Sigma n/N=1$. При нагружении с переменной амплитудой напряжений оба показателя (средний и мгновенный) не будут равны единице. Так, если величина отношения среднего или мгновенного показателя больше единицы, то это означает, что нагрузки с переменной амплитудой приводят к эффекту торможения развития трещины, в противном случае (меньше единицы), мы имеем дело с эффектом ускорения роста трещины. Рассмотрим основные закономерности кинетики трещины при нагружении с постоянной амплитудой цикла напряжений и с переменной амплитудой.

Целью статьи является анализ и систематизация наиболее интересных результатов лабораторных исследований кинетики макротрещины при нерегулярном нагружении.

Кинетика трещины при циклическом нагружении с постоянной амплитудой

В 1970 году Elber обнаружил [4], что при циклическом нагружении даже при растягивающих напряжениях берега трещины могут оставаться сомкнутыми. Это имеет место в начале цикла при возрастании нагрузки до некоторого уровня напряжения, σ_{op} , после которого наблюдается полное раскрытие берегов трещины, и в конце цикла при разгрузке на уровне σ_{cl} , после которого берега трещины смыкаются прежде, чем напряжение опустится до минимальной величины, σ_{min} , оставаясь растягивающим (рис. 3). Это явление получило название «закрытие трещины». Таким образом, нарушается необходимое условие для роста трещины – полное ее раскрытие.

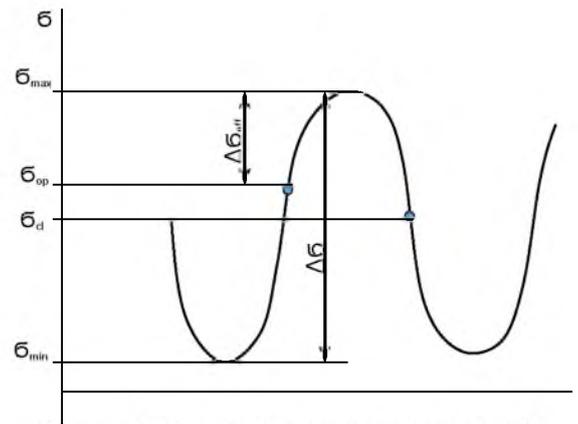


Рисунок 3 – Характеристики цикла напряжений

В уравнении (1) используется величина полного размаха КИН, ΔK , в то время как периоду полного раскрытия трещины соответствует только его эффективная часть, ΔK_{eff} , определяемая размахом напряжений $\Delta \sigma_{eff}$. Природа явления закрытия трещины объясняется механизмом образования пластически деформированных зон перед и за трещиной с высокими остаточными напряжениями сжатия, влияющими на кинетику и геометрию трещины.

Эффект закрытия трещины объясняет и влияние асимметрии цикла на СРТ: при постоянной величине ΔK скорость трещины тем выше, чем выше значение коэффициента асимметрии цикла, R , что отмечено во многих работах. На рис. 4 приведены КДУР, построенные Sharp с соавторами для трех значений R [5].

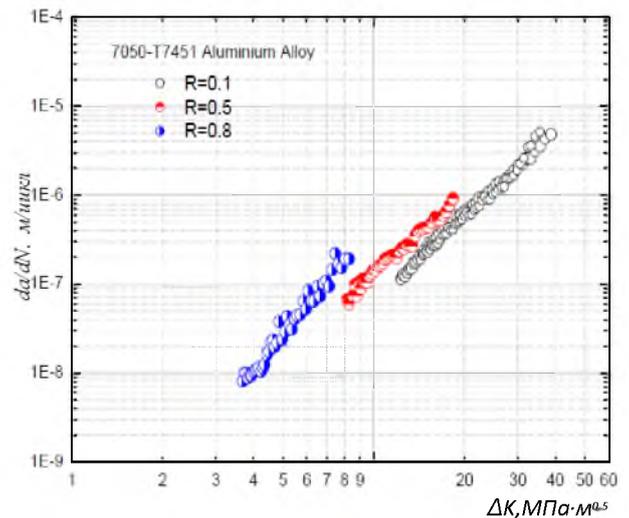


Рисунок 4 – Влияние R на ΔK_{th} (на воздухе):
 ○ – Бр. А9Ж4Н4, □ - Бр. А7Мц14Ж3Н2

Асимметрия цикла напряжений влияет и на величину трещиностойкости материала, ΔK_{th} , [6]: с ростом R уменьшается величина порогового значения ΔK , как это показано на рис. 5 для бронзовых сплавов при испытании образцов на воздухе. Для обоих сплавов наблюдается одинаковая

тенденция к снижению трещиностойкости, ΔK_{th} , при увеличении асимметрии цикла напряжений, R . Действительно, с ростом R минимальное значение напряжений цикла, σ_{min} , приближается к напряжению открытия берегов трещины, σ_{op} , и, таким образом, большая часть ΔK приходится на ΔK_{eff} , отвечающей, как показывают исследования, за СРТ. Соотношение эффективного размаха КИН, $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}$, и расчетного, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$, определяется коэффициентом закрытия трещины

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{(1 - K_{op}/K_{max})}{(1 - R)} \quad (2)$$

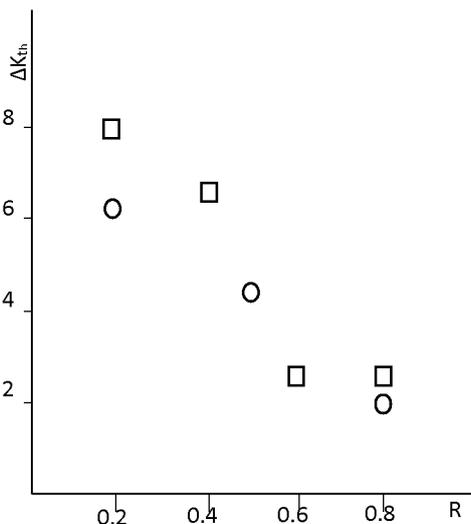


Рисунок 5 - Влияние асимметрии цикла на СРТ

Многими исследованиями показано, что, если по экспериментальным данным о СРТ, полученным при различных значениях R построить КДУР (рис. 2), где по горизонтали откладывать ΔK_{eff} вместо ΔK , то все точки разместятся в пределах общей полосы разброса единой прямой, что свидетельствует об отсутствии влияния асимметрии цикла напряжений на СРТ, если в качестве силового параметра выбрать ΔK_{eff} .

Явление закрытия трещины представляет большой интерес, т.к. оно позволяет объяснить многие вопросы, возникающие при исследовании роста трещины. Начиная с работ Elber и по настоящее время ведутся интенсивные лабораторные и аналитические исследования, пытающиеся прояснить механизм этого явления. Однако, известно не мало работ, где ставится под сомнение значимость данного эффекта. Но все же, в основе большинства известных моделей, позволяющих прогнозировать рост трещины при переменных нагрузках, использовано явление закрытия трещины.

Механизмы, сопутствующие росту трещины при циклическом нагружении с переменной амплитудой

В последние годы внимание исследователей уделено вопросу прогнозирования усталостной прочности и долговечности конструкций под действием нагрузок с переменной амплитудой цикла напряжений. Этот интерес обусловлен самой природой реальных нагрузок, для которых характерно непредсказуемость изменения их величины и последовательности. Дальнейший рост трещины зависит не только от уже существующего уровня повреждений, но от характера и величины предшествующих нагрузок, при которых был создан данный уровень повреждений. В литературе при описании такого характера нагружения зачастую используют понятие «взаимовлияние нагрузок». В этих случаях приращение размера трещины за цикл нагружения может отличаться от аналогичной величины при нагружении с постоянной амплитудой напряжений даже при полном совпадении значений минимального и максимального КИН.

Среди многих работ, например [7-16], посвященных проблеме прогнозирования эффекта последовательности (истории) нагружения на рост трещины следует особо выделить обзор, выполненный Skorupa [12, 13], где систематизированы возможные случаи последовательности нагрузок с переменной амплитудой в сочетании с соответствующими механизмами и последующими результатами их взаимного влияния. Результат воздействия на КЭ с трещиной нагрузки с переменной амплитудой напряжений зависит от множества факторов: от механических свойств материала, от последовательности амплитуд их знака и величины, от наличия активной окружающей среды, геометрии КЭ и размера трещины, и т.д. В большинстве случаев это воздействие сказывается на изменение СРТ, da/dN , как это показано на рис. 6, в случае воздействия разовой перегрузки. Здесь циклическое нагружение с постоянной амплитудой и соответствующей СРТ (левый почти горизонтальный участок кривой) «нарушается» разовой перегрузкой с большей амплитудой, чем предшествующая, при длине трещины a_{ol} . На рис. 6 показано возрастание скорости после перегрузки на небольшом приращении длины трещины, что наблюдается не всегда, и наличие этого участка не является обязательным проявлением перегрузки. Однако, всегда после перегрузки большей хотя бы на треть от амплитуды предшествующего цикла имеет место резкое снижение СРТ на несколько

порядков. А в случае перегрузки в 3 и более раз возможна и временная ее остановка. Восстановление величины скорости до предшествующего перегрузке значения происходит постепенно по мере прохождения кончиком трещины зоны торможения, $\Delta a_{от}$. После прохождения зоны торможения СРТ становится такой же, которая была до перегрузки.

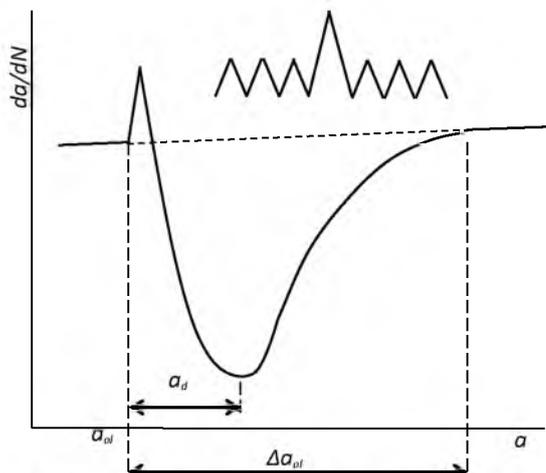


Рисунок 6 – Кинематика трещины после разовой перегрузки

Прежде чем рассматривать результаты взаимодействия различных вариантов последовательности амплитуд напряжений, остановимся на возможных механизмах, протекающих в период нестабильности трещины. Скогупа перечисляет их в следующей последовательности:

- затупление кончика трещины;
- наличие остаточных напряжений перед кончиком трещины;
- закрытие трещины, обусловленное пластичностью материала;
- деформационное упрочнение материала перед кончиком трещины;
- неравномерность фронта трещины.

Затупление кончика трещины можно рассматривать как переход трещины в статус надреза, который снова становится острой трещиной по прохождении определенного числа циклов, необходимого для нового инициирования трещины от надреза. Данный механизм использован многими исследователями для объяснения непродолжительного ускорения роста трещины перед последующим ее замедлением после перегрузки (рис. 6), а также явления не полного закрытия кончика трещины на стадии разгрузки.

Остаточные напряжения перед кончиком трещины формируются в относительно небольшой зоне, размер которой, однако, больше,

чем перед перегрузкой. Эти остаточные напряжения имеют отрицательный знак (напряжения сжатия) в случае положительной перегрузки (растяжение) и положительный знак в случае отрицательной перегрузки (сжатия). Величина остаточных напряжений сопоставима с соответствующим данному материалу пределу текучести как при растяжении, так и при сжатии, и даже может его заметно превышать. Это зависит в существенной мере от вида напряженно-деформированного состояния (НДС) перед трещиной (от стесненности деформаций). Schijve и Broek для объяснения механизма влияния остаточных напряжений на рост трещины использовали принцип суперпозиции. Скогупа приводит наглядный пример использования принципа суперпозиции применительно к результатам работы, в которой исследовали НДС перед трещиной в образце конструкционной стали E550. На рис. 7 показано распределение напряжений перед кончиком трещины до и после растягивающей перегрузки. Видно, что растягивающие напряжения перед кончиком трещины имеют наибольшее значение до момента перегрузки. После перегрузки образуются остаточные напряжения сжатия, которые накладываются на напряжения растяжения и в результате суммарные напряжения при новом цикле нагружения оказываются значительно меньше, чем перед перегрузкой. Этим, также, объясняется снижение СРТ (эффект торможения). Интересно отметить, что размер зоны торможения, $\Delta a_{от}$, (рис. 6) примерно соответствует зоне расхождения эпюр напряжений до и после перегрузки.

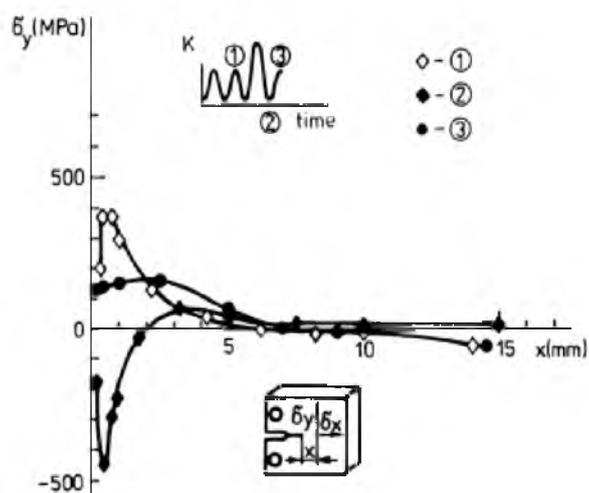


Рисунок 7 – Распределение напряжений перед трещиной до и после перегрузки (R_{ol}=2, R=0,1)

В случае сжимающей перегрузки временное ускорение роста трещины объясняется возникновением зоны растягивающих остаточных напряжений перед кончиком трещины.

Явление **закрытия трещины, обусловленное пластичностью материала**, было установлено Elber [4] и сразу привлекло внимание многих исследователей. В отличие от остаточных напряжений, которые способны объяснить снижение скорости после перегрузки, закрытие трещины объясняет все три эффекта, возможные при перегрузке, это: временное ускорение, торможение и возвращение к стационарному состоянию (рис. 6). Действительно, возможное ускорение трещины сразу после перегрузки (эффект #1) можно объяснить возникновением зоны больших растягивающих пластических деформаций перед кончиком трещины, приводящих к раскрытию кончика (затуплению) и, соответственно, к существенному снижению K_{op} относительно величины, предшествующей перегрузке растяжения, что увеличивает ΔK_{eff} , отвечающий за скорость трещины. По мере продвижения трещины за ее кончиком образуются пластически деформированные области материала, обуславливающие явление закрытия трещины. Их размер больше, чем при нагружении до перегрузки с постоянной амплитудой, что приводит к возрастанию K_{op} и, соответственно, к уменьшению эффективного размаха КИН, ΔK_{eff} , а, следовательно, к торможению роста трещины (эффект #2). По мере прохождения кончиком трещины увеличенной пластической зоны, образованной перегрузкой, происходит постепенное восстановление скорости роста трещины (эффект #3) за счет снижения K_{op} и, соответственно, увеличения ΔK_{eff} до уровня, предшествующего перегрузке. Применительно к сжимающей перегрузке начальное ускорение роста трещины объясняется снижением размеров пластически деформированных областей за кончиком трещины посредством их пластического деформирования сжатием.

Большинство исследователей признают роль явления закрытия трещины в описании ее роста, однако существуют работы, ставящие эти выводы под сомнение.

Деформационное упрочнение материала перед кончиком трещины после перегрузки ведет к торможению ее роста за счет снижения способности материала деформироваться. Чем больше степень упрочнения материала, тем более выражен эффект торможения после перегрузки. Возможно, условия роста трещины в предвари-

тельно однородно упрочненном образце отличаются от случая, когда перед трещиной имеет место относительно малая зона упрочненного материала вследствие перегрузки, окруженная не деформированным пластически материалом. Некоторые исследователи считают, что влияние деформационного упрочнения материала на рост трещины объясняется явлением закрытия трещины: чем больше степень упрочнения, тем меньше уровень остаточных напряжений за кончиком трещины и меньше величина раскрытия трещины. С другой стороны, в случае менее упрочненного материала пластические области за кончиком трещины более подвержены формированию (сглаживанию) под действием циклических напряжений. Поскольку закрытие трещины усиливается при увеличении пластически деформированных областей за кончиком трещины и снижается с ростом аналогичной области перед кончиком, прямолинейного объяснения роли НДС в росте трещины сделать не получается. Двойственное влияние упрочнения на закрытие трещины проявляется и в аналитических исследованиях. Установлено, что при низких нагрузках более упрочненные материалы показывают более высокие значения σ_{op} , чем менее упрочненные, и наоборот при высоких нагрузках.

Влияние **неравномерности фронта трещины** на ее рост впервые обратил внимание Schijve в работе [17], где представлены результаты исследования влияния неравномерного характера нагружения на кинетику трещины. Автором отмечено несоответствие геометрии излома образца характеру нагружения. Известно, что при нагружении образца с небольшой трещиной и постоянной невысокой амплитудой напряжений (в пределах I участка S-образной КДУР, рис. 2) перед кончиком трещины реализуется плоское деформированное состояние и фронт трещины продвигается в плоскости, ориентированной под 90° к направлению внешней нагрузки. На рис. 8 это соответствует зоне отрыва. В случае высоких и постоянных по амплитуде напряжений, и длинных трещин, т.е. при высоких КИН, перед трещиной реализуется плоское напряженное состояние и фронт трещины переходит в плоскость, наклонную под 45° к направлению нагрузки.

В промежуточных (переходных) НДС фронт трещины находится одновременно в нескольких плоскостях. При нерегулярном нагружении закономерности, установленные для циклов с постоянной амплитудой напряжений, могут нарушаться вплоть до обратных результатов: при

высоких КИН, после перегрузки растяжения, может быть развитие фронта по I типу (отрыв), что объясняется снижением ΔK_{eff} . Это несоответствие является следствием последовательности и взаимодействия нагрузок. Согласно [17-19], неравномерность фронта может существенно влиять на торможение или ускорение трещины. Было установлено, что переход между типами трещин контролируется больше ΔK_{eff} , нежели ΔK .

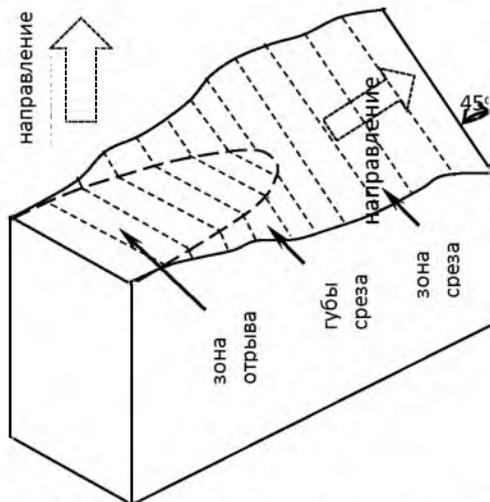


Рисунок 8 - Изменение геометрии фронта трещины

Suresh пришел к выводу [18], что отклонение трещины от прямолинейной траектории, ее ветвление и появление остаточных сжимающих напряжений могут снизить локальную движущую силу в такой мере, что перед трещиной реализуется напряженной состояние, соответствующее I участку КДУР, т.е. вблизи порогового значения размаха КИН, хотя базовый размах КИН до перегрузки относился ко II участку КДУР.

Это способствует появлению II типа смещений и, соответственно, возникновению условий реализации явления закрытия трещины по механизму шероховатости поверхности ее берегов, что способствует эффекту торможения роста трещины. В случае же значительной перегрузки сжатия происходит сглаживание или разрушение ранее сформировавшихся пластически деформированных областей и неровностей свободных поверхностей трещины, что снижает эффект от закрытия трещины.

Для некоторых систем окружающая среда – микроструктура материала, особенно при низких асимметриях цикла, R , и небольших ΔK (I участок КДУР) последующая перегрузка растяжением способствует процессу окисления ювенильных поверхностей трещины в значительно большей степени, чем при условиях, предшествующих перегрузке. В этом случае создаются условия ре-

ализации явления закрытия трещины по механизму химических процессов, протекающих в непосредственной близости от кончика трещины между ее свободными поверхностями, что также снижает действие движущей силы, ΔK_{eff} , и способствует торможению роста трещины.

Следует заметить, что большинство исследований было проведено при перегрузке растяжением, поэтому в случае перегрузки сжатием многие закономерности подвергаются критике. Так, на основе теоретических рассуждений по вопросу трения поверхностей ветвящейся трещины, было сделано заключение, что КИН II типа будет возрастать, а КИН I типа убывать при возрастании сжимающей составляющей цикла напряжений.

Выводы

Анализ результатов исследований, посвященных влиянию нерегулярного характера нагружения на кинетику трещины, показал следующее:

1) кинетика макротрещины в условиях нерегулярного характера внешних нагрузок существенно отличается от случая роста трещины при переменной нагрузке с неизменными параметрами цикла;

2) явление "закрытие берегов трещины", открытое Элбером, объясняет многое в поведении трещины, как при регулярном, так и случайном характере нагружения КЭ, например, влияние асимметрии цикла нагружения на величину СРТ;

3) существенное влияние на кинетику геометрии трещины оказывает НДС перед кончиком трещины, изменяющее механизм образования пластически деформированного материала на ее берегах;

4) при нерегулярном нагружении в период нестабильности трещины возможна реализация различных механизмов, приводящая к затуплению кончика трещины, появлению перед ним остаточных напряжений, закрытию берегов в устье трещины, деформационному упрочнению материала перед кончиком трещины и неравномерностью ее фронта.

Литература

1. Miner M. A. Cumulative damage in fatigue / M. A. Miner // Journal of Applied Mechanics. – 1945. – Vol. 67. – P. A159-A164.
2. Irwin, G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate / G. R. Irwin // ASME J. Appl. Mech. – 1957. – Vol. 24. – P. 361-364.
3. Paris P. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws / P. Paris, F. Erdogan // Journal Basic Engineering. – 1963. – Vol. 85. – № 4. – P. 528 - 533.

4. Elber W. Fatigue crack growth under cyclic tension / W. Elber // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1970. – Vol. 2. – P. 37 - 45.
5. Sharp P. Examination of 7050 fatigue crack growth data and its effect on life prediction / P. Sharp, R. Byrnes, G. Clark // DSTO-TR-0729. - 1998.
6. Файвисович А.В. Усталостная прочность и трещиностойкость лопастей гребных винтов теплоходов типа «Маршал Буденный» / А.В. Файвисович // *Судостроение*. – 2002. – № 2. – С. 31- 33.
7. Laseure N. Effects of variable amplitude loading on fatigue life / N. Laseure, I. Schepens, N. Micone, W. De Waele // *International Journal of Sustainable Construction and Design*. – 2015. – Vol. 6, № 3.
8. Simuneka D. Fatigue crack growth under constant and variable amplitude loading at semi-elliptical and V-notched steel specimens / D. Simuneka, M. Leitnera, J. Maierhoferb, H. Gänser // *Proceedings of 6th Fatigue Design Conference “Fatigue Design 2015”*. – 2015. – Vol. 133. – P. 348 – 361.
9. Liu J. A general model of fatigue crack growth under variable amplitude Loading / J. Liu, P. Du, Z. Zhang // *Technological Sciences*. – 2012. – Vol. 55. – № 3. – P. 673 – 683.
10. Chen F. An improved constitutive model to predict fatigue crack growth rate under constant-amplitude loading with single and multiple overload / F. Chen, F. Wang, W. Cui // *Engineering for the Maritime Environment*. – 2011. – Vol. 225. – Part M. – P. 271 – 281.
11. Chahardehi A. Fatigue crack growth under remote and local compression – a state-of-the-art review / A. Chahardehi, A. Mehmanparast // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2016. – Vol. 35. – P. 41 - 49.
12. Skorupa M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading - a literature review. Part I: empirical trends / M. Skorupa // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1998. – Vol. 21. – P. 987 – 1006.
13. Skorupa M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading - a literature review. Part II: qualitative interpretation / M. Skorupa // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1998. – Vol. 22. – P. 905 – 926.
14. Pereira, M.V.S. On the prediction of fatigue crack retardation using Wheeler and Willenborg models / M.V.S. Pereira, F.A.I. Darwish, A.F. Camarão, S.H. Motta // *Materials Research*. – 2007. - Vol. 10. - № 2. – P. 101 - 107.
15. Ribeiro, A.S. Variable amplitude fatigue crack growth modelling / A.S. Ribeiro, A.P. Jesus, J.M. Costa, L.P. Borrego, J.C. Maeiro // *Mecânica Experimental*. – 2011. – Vol. 19. – P. 33 - 44.
16. Venkatesan K.R. Subcycle fatigue crack growth formulation for constant and variable amplitude loading: A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science / K.R. Venkatesan // *Arizona State University*. - 2016. – 63 p.
17. Schijve, J. Fatigue damage accumulation and incompatible crack front orientation / J. Schijve // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1974. - Vol. 6. - P. 245 - 252.
18. Suresh, S. Micromechanisms of fatigue crack growth retardation following overloads / S. Suresh // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1983. - Vol. 18. - P. 577 - 593.
19. Файвисович А.В. Экспериментальная оценка изменения величины КИН вдоль фронта поверхностной трещины / А.В. Файвисович // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 1996. – №3. – С. 45 – 48.

References

1. Miner, M. A. Cumulative damage in fatigue / M. A. Miner // *Journal of Applied Mechanics*. – 1945. - Vol. 67. - P. A159-A164.
2. Irwin, G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate / G. R. Irwin // *ASME J. Appl. Mech.* – 1957. - Vol. 24. - P. 361-364.
3. Paris, P. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws / P. Paris, F. Erdogan // *Journal Basic Engineering*. – 1963. - Vol. 85, № 4. - P. 528 - 533.
4. Elber, W. Fatigue crack growth under cyclic tension / W. Elber // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1970. - Vol. 2. - P. 37 - 45.
5. Sharp, P. Examination of 7050 fatigue crack growth data and its effect on life prediction / P. Sharp, R. Byrnes, G. Clark // DSTO-TR-0729. - 1998.
6. Faivisovich, A.V. Ustalostnaya prochnost i treschenostoykost lopastey grebnyh vintov teplohodov tipa "Marshal Budeniy" / A.V. Faivisovich // *Sudostroenie*. – 2002. – № 2. – S. 31- 33.
7. Laseure, N. Effects of variable amplitude loading on fatigue life / N. Laseure, I. Schepens, N. Micone, W. De Waele // *International Journal of Sustainable Construction and Design*. – 2015. – Vol. 6, № 3.
8. Simuneka, D. Fatigue crack growth under constant and variable amplitude loading at semi-elliptical and V-notched steel specimens / D. Simuneka, M. Leitnera, J. Maierhoferb, H. Gänser // *Proceedings of 6th Fatigue Design Conference “Fatigue Design 2015”*. – 2015. – Vol. 133. – P. 348 – 361.
9. Liu, J. A general model of fatigue crack growth under variable amplitude Loading / J. Liu, P. Du, Z. Zhang // *Technological Sciences*. – 2012. - Vol. 55. - № 3. – P. 673 – 683.
10. Chen, F. An improved constitutive model to predict fatigue crack growth rate under constant-amplitude loading with single and multiple overload / F. Chen, F. Wang, W. Cui // *Engineering for the Maritime Environment*. – 2011. - Vol. 225. - Part M. – P. 271 - 281.
11. Chahardehi, A. Fatigue crack growth under remote and local compression – a state-of-the-art review / A. Chahardehi, A. Mehmanparast // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2016. – Vol. 35. – P. 41 - 49.

12. Skorupa, M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading - a literature review. Part I: empirical trends / M. Skorupa // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1998. – Vol. 21. – P. 987 – 1006.
13. Skorupa, M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading - a literature review. Part II: qualitative interpretation / M. Skorupa // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1998. – Vol. 22. – P. 905 – 926.
14. Pereira, M.V.S. On the prediction of fatigue crack retardation using Wheeler and Willenborg models / M.V.S. Pereira, F.A.I. Darwish, A.F. Camarão, S.H. Motta // *Materials Research*. – 2007. - Vol. 10. - № 2. – P. 101 - 107.
15. Ribeiro, A.S. Variable amplitude fatigue crack growth modelling / A.S. Ribeiro, A.P. Jesus, J.M. Costa, L.P. Borrego, J.C. Maeiro // *Mecânica Experimental*. – 2011. – Vol. 19. – P. 33 - 44.
16. Venkatesan, K.R. Subcycle fatigue crack growth formulation for constant and variable amplitude loading: A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science / K.R. Venkatesan // Arizona State University. - 2016. – 63 p.
17. Schijve, J. Fatigue damage accumulation and incompatible crack front orientation / J. Schijve // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1974. - Vol. 6. - P. 245 - 252.
18. Suresh, S. Micromechanisms of fatigue crack growth retardation following overloads / S. Suresh // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1983. - Vol. 18. - P. 577 - 593.
19. Faivisovich, A.V. Eksperimentalnaya ocenka izmeneniya velichiny KIN vdol fronta poverhnostnoy treschiny / A.V. Faivisovich // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. – 1996. - №3. – S. 45 – 48.

УДК 621.499.4 + 62-404.1
DOI: 10.34046/aumsuomt92/25

ОПТИМАЛЬНЫЙ ВИД СЭУ ДЛЯ РОССИЙСКИХ ТАНКЕРОВ-ГАЗОВОЗОВ СПГ

*Н.Г. Родионов, кандидат технических наук
Н.И. Николаев, доктор технических наук
В.А. Савченко, кандидат технических наук*

Природный газ в настоящее время широко используется во всём мире в качестве эффективного энергоносителя. Поставки газа потребителям производятся, как правило, по системе газопроводов или с использованием технологий сжижения и транспортировки специализированными танкерами-газовозами СПГ.

Конкурентоспособность поставок СПГ во многом определяется многочисленными политическими, экономическими, факторами, состоянием спроса и предложения на международном рынке торговли энергоресурсами. В этом отношении важную роль приобретают качества техники, используемой для транспортировки СПГ, и особенно надёжность и экономичность главных энергетических установок на танкерах-газовозах.

Реальная политическая ситуация диктует российскому бизнесу, занятому в области поставок СПГ, особые требования к оснащению танкеров-газовозов СПГ. В качестве СЭУ на танкерах-газовозах СПГ, в настоящее время обычно применяют дизельные установки зарубежных производителей. В России нет производства мощных судовых дизелей, способных работать на выпаре газа из танков СПГ и на дизельном топливе. Поставки зарубежных дизелей на российские танкеры-газовозы СПГ являются рискованными из-за возможных налагаемых санкций и рискованной политической конъюнктуры. Авторы предлагают использовать парогазовые установки (ПГУ) отечественного производства для СЭУ танкеров-газовозов СПГ.

Убедительно показано, что ПГУ обладают неоспоримыми преимуществами по сравнению с паротурбинными, дизельными, газотурбинными СЭУ для танкеров-газовозов. Их КПД может достигать около 50-55%, что демонстрируется известными примерами результатов расчётов. Исключительно важно, что при этом решаются вопросы импортозамещения и перехода к прорывным технологиям в области СЭУ для танкеров-газовозов СПГ.

Ключевые слова: сжиженный природный газ (СПГ), способы поставки газа, танкеры-газовозы, Северный морской путь, судовая энергетическая установка (СЭУ), паротурбинная установка (ПТУ), дизельная энергетическая установка (ДЭУ), газотурбинная установка (ГТУ), парогазовая установка (ПГУ), коэффициент полезного действия, конкурентоспособность, импортозамещение.

At present natural gas is widely used all over the world as an effective source of energy. The delivery of gas to the consumers is carried out either through gas pipeline system or by using the technology of liquefying gas and transporting it in specialized liquefied natural gas tankers (LNG-carriers).

The competitiveness of LNG deliveries greatly depends upon numerous political and economic factors, as well as the condition of the demand and supply at the international energy source market. In this respect the important role belongs to the quality of the means used for LNG transportation and especially to reliability and economic effectiveness of the marine power plants installed on gas-carriers.

The modern world's political situation sets specific requirements to the Russian business community involved into gas transportation for equipment of LNG-carriers. The majority of marine Diesel power plants employed