

объемом отсека и расчетным расходом сточных вод. При достижении обработанной водой определенного уровня срабатывает поплавковый датчик, который включает насос 10. На этом процесс обработки сточных вод в установке заканчивается. Очищенная и обеззараженная вода сливается за борт.

Предлагаемый к использованию метод биологической очистки судовых сточных вод в режиме предшествующей денитрификации позволит:

- уменьшить время пребывания сточных вод в биореакторе;
- экономить часть электроэнергии, затрачиваемой на аэрацию иловой смеси;
- практически полностью предотвратить сброс биогенных веществ с очищенными судовыми сточными водами в морскую среду.

Литература

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973, измененная и дополненная, протоколом к ней 1978 г., или, сокращенно, МАРПОЛ 73/78: в 2 т. - М.: Изд-во ЦНИИМФ, 2012. - 762 с.
2. Руководство 2016 года по разработке Плана управления энергоэффективностью судна (ПУЭС) - МЕРС.282(70): ИМО - 2018
3. Алексеев, М.И. Биологическая очистка сточных вод рыбообрабатывающих производств в режиме нитри-денитрификации / М.И. Алексеев, И.Г. Береза // Водоснабжение и санитарная техника. - 2004. - № 12. - С. 18 - 20.

4. Мишуков Б.Г. Перспективные схемы биологической очистки сточных вод от азота и фосфора // Вода и экология. № 1, 2009. - С. 36 - 39.
5. Очистка сточных вод / М.Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э Арван. - М.: Мир, 2008. - 480 с.
6. Яковлев С.В., Карюхина Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод / С.В. Яковлев, Т.А. Карюхина. - М.: Стройиздат, 2000, - 200 с.
7. Береза И.Г. Разработка технологии биологической нитри-денитрификации для очистки судовых сточных вод // И.Г. Береза, Т.С. Брюшковская // Транспортное дело России. - 2018. - № 6 (139) - С. 333-334

References

- 1 International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78. 2 t. (2012). CNPIMF, 762.
- 2 Ship Energy Efficiency Management Plan (2018), MEPC.282(70), IMO.
- 3 Alekseev, M.I., Beryozha I.G. (2004). Biologicheskaya ochistka stochnykh vod ryboobrabatyvayushchikh proizvodstv v rezhime nitri-denitifikatsii. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika, 12, 18 - 20.
- 4 Mishukov, B.G. (2009). Perspektivnye skhemy biologicheskoi ochistki stochnykh vod ot azota i phosphora. Voda i ekologiya, 1, 36 - 39.
- 5 Khentse, M. Armoes, P., Lya-Kur-Yansen, Y., Arvan, E. (2008). Ochistka stochnykh vod. Mir, 480.
- 6 Yakovlev, S. V., Karyukhina, T.A. (2000). Biokhimicheskie protsessy v ochistke stochnykh vod. Stroyizdat, 200.
- 7 Beryozha I.G., Bryushkovskaya T.S. (2018). Razrabotka tehnologii biologicheskoi nitri-denitifikatsii dlya ochistki sudovykh stochnykh vod. Transportnoe delo Rossii, 6, 333-334.

УДК 539.432

DOI: 10.34046/aumsuomt93/12

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА НАГРУЖЕНИЯ НА КИНЕТИКУ ТРЕЩИН. ЧАСТЬ II. КЛАССИФИКАЦИЯ НЕРЕГУЛЯРНЫХ НАГРУЗОК

А.В. Файвисович, доктор технических наук, профессор

Актуальность вопроса прочности и долговечности конструкций с каждым годом только возрастает, что обусловлено, как повышением их нагруженности, так и использованием новых конструкционных материалов. По мере развития механики разрушения, проблема эксплуатации конструктивных элементов с трещинами рассматривается с новых позиций, позволяющих в ряде случаев сознательно продолжать эксплуатацию объекта. Это становится возможным вследствие глубокого понимания природы и механизмов усталостного разрушения. В данной работе рассматривается кинетика макротрещины при нерегулярном нагружении в зависимости от различных факторов на основе классификации, предложенной Skorupa. Приведены результаты многочисленных исследований для образцов различных конструкционных материалов при их испытании, как разовыми, так и блочными перегрузками разных знаков. Установлены основные закономерности кинетики макротрещины при нерегулярном характере нагружения, отмечено различие в поведении трещины после перегрузки растяжением и сжатием. Приведены экспериментальные данные о влиянии величины коэффициентов асимметрии циклов нагружения и размаха

коэффициентов интенсивности напряжений при базовом нагружении и циклах перегрузок на последующий рост трещины. Особый интерес представляет влияние на кинетику трещины различных возможных сочетаний и последовательностей циклов перегрузок растяжением и сжатием.

Ключевые слова: макротрещина, перегрузка, скорость роста трещины, коэффициент интенсивности напряжений

The relevance of the issue of strength and durability of structures every year only increases, which is due to both the increase in their load and the use of new structural materials. With the development of fracture mechanics, the problem of operation of structural elements with cracks is considered from new positions allowing in some cases to consciously continue the operation of the object. This is made possible by a deep understanding of the nature and mechanisms of fatigue failure. In this paper the kinetics of macrocrack under irregular loading is considered depending on various factors on the basis of the classification proposed by Skorupa. The results of numerous studies for samples of various structural materials during their testing, both single and block overloads of different signs are observed. The basic laws of macrocrack kinetics under irregular loading are established, the difference in crack behavior after tension and compression overload is noted. Experimental data on the influence of the asymmetry coefficients of loading cycles and the magnitude of the stress intensity factors under basic loading and overload cycles on the subsequent crack growth are presented. Of particular interest is the effect on the fracture kinetics of various possible combinations and sequences of stress and compression overload cycles.

Keywords: macrocrack, overload, crack growth rate, stress intensity factor

Введение

Вопросы прочности и долговечности конструкций и механизмов существовали всегда и решались в соответствии с имеющимся на тот момент представлением о природе процесса разрушения. Еще совсем недавно вопрос о дальнейшей эксплуатации конструктивного элемента с трещиноподобным дефектом вообще не рассматривался. Элемент или деталь либо заменялись на новые, либо производился соответствующий ремонт. Известны случаи, когда после такого ремонта происходило разрушение элемента значительно раньше, нежели если бы продолжили его эксплуатацию с трещиной. В настоящее время понимание природы процесса разрушения существенно расширилось и углубилось вследствие проведения интенсивных исследований в этом направлении, чему способствовали и потребность в ужесточении условий эксплуатации конструкций, а также использование новых конструкционных материалов, основным механическим свойством которых является повышенное сопротивление развитию трещины, т.е. трещиностойкость.

Прогнозирование остаточной прочности и долговечности конструктивного элемента с трещиной основывается на использовании той или иной модели ее развития при циклическом нагружении. Существуют десятки таких моделей и еще больше кинетических уравнений роста макротрещины. Однако, вследствие зачастую непредсказуемости характера внешних нагрузок и отсутствия адекватной модели роста трещины, подобные расчеты могут привести к

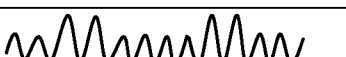
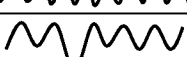
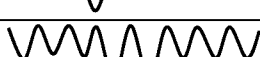
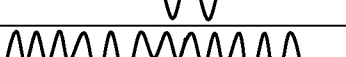
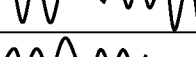
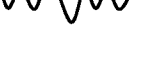
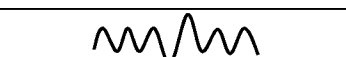
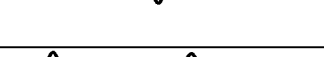
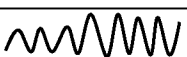
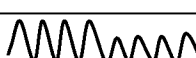
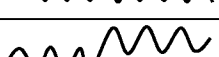
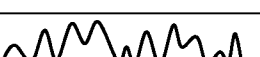
существенным расхождениям с реальными результатами эксплуатации. В первую очередь эти ошибки объясняются существенным отличием кинетики макротрещины при нерегулярном нагружении от роста трещины при постоянной амплитуде циклической нагрузки. Проведем анализ результатов исследований и рассмотрим установленные закономерности кинетики трещины при нерегулярном нагружении.

В большинстве обзорах, посвященных вопросу усталостного разрушения под действием циклических нагрузок с переменной амплитудой напряжений, используют классификацию, предложенную Skorupa [1] (табл.1). Преобразовав ее в табличную форму, используем ее для рассмотрения эффектов, связанных с различными сочетаниями нагрузок.

Единичная перегрузка растяжением

Эффект от воздействия единичной перегрузки на последующий рост трещины может либо отсутствовать, либо приводить к ускорению и/или торможению, или даже к временной остановке ее роста. Кинематика трещины схематично показана на рис. 1. В общем случае после перегрузки возможно непродолжительное ускорение роста трещины, после чего ее скорость стремительно снижается до минимума, который может быть на несколько порядков ниже значения, предшествующего перегрузке. После возвращения режима нагружения к предшествующим перегрузке параметрам, скорость роста (СРТ) трещины постепенно возвращается к своему изначальному значению.

Таблица 1 – классификация нагрузок

характер	описание	изменение напряжений	результат
простое нагружение	единичная перегрузка растяжением		торможение роста трещины
	блок амплитуд перегрузки растяжением		более сильное торможение
	повторение блоков амплитуд перегрузки растяжением		возможно как торможение, так и ускорение
	единичная перегрузка сжатием		ускорение роста трещины
	блок амплитуд перегрузки сжатием		торможение роста трещины
	повторение блоков амплитуд перегрузки сжатием		ускорение роста трещины
	последовательность амплитуд перегрузок растяж.-сжатие		торможение роста трещины
	последовательность амплитуд перегрузок сжатие – растяж.		торможение роста трещины
	повторение последовательности растяжение-сжатие		возможно как торможение, так и ускорение
	повторение последовательности сжатие - растяжение		возможно как торможение, так и ускорение
блочное нагружение	переход от низких амплитуд на высокие		возможно как торможение, так и ускорение
	переход от высоких амплитуд на низкие		
	переход на более высоких уровень средних напряжений		
случайное нагружение	случайное чередование амплитуд напряжений		непредсказуем

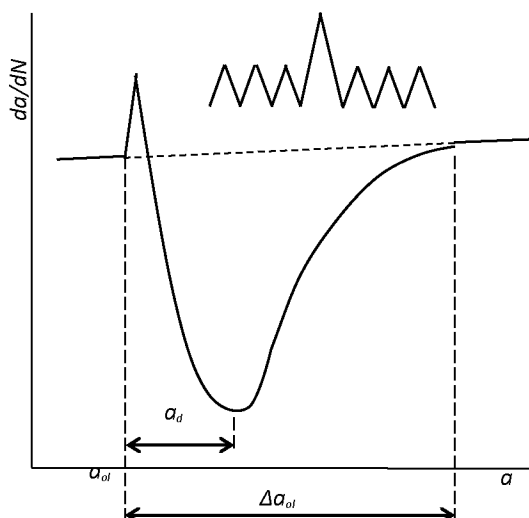


Рисунок 1 - Кинематика трещины после разовой перегрузки растяжением

Приведем основные закономерности, установленные в результате многочисленных наблюдений за протеканием переходного периода развития усталостного разрушения во многих материалах после единичной перегрузки:

- чем больше перегрузка, характеризующая коэффициентом $R_{ol} = (K_{ol} - K_{min}) / \Delta K$, при неизменных остальных условиях нагружения, тем сильнее проявляется торможение роста трещины, что приводит к увеличению протяженности зоны торможения, Δa_{ol} , количества циклов, N_D , необходимое для ее прохождения, а также к существенному снижению СРТ.

При больших перегрузках, $R_{ol} > 2,5$, для многих материалов отсутствует начальное ускорение роста трещины, наступает сразу ее торможение с резким снижением скорости вплоть до полной ее остановки, хотя текущее значение ΔK значительно может превосходить ΔK_{th} ;

- эффект торможения уменьшается с ростом асимметрии цикла нагружения, R . Так, для нержавеющей стали AISI 304 отмечено уменьшение участка перехода после перегрузки к минимальной скорости с ростом R от 0,1 до 0,6, а при $R=0,65$ скорость упала до минимальной сразу же после перегрузки. Дальнейшее увеличение R привело к небольшому снижению минимальной скорости трещины;

- соотношение размеров зоны торможения и пластической зоны, замеренной на поверхности образца нержавеющей стали AISI 304 толщиной 6 мм, с ростом R также снижалось с 3,5 при $R=0,1$ до 0,2...0,3 при $R=0,45$. Качественно такие же результаты, за небольшим исключением, получены и для алюминиевого сплава. Таким образом, можно заключить, что не установлено однозначной зависимости величины зоны торможения от размера пластической зоны, образованной после перегрузки, их соотношение может существенно отличаться от единицы в обе стороны;

- противоречивыми выглядят данные о влиянии величины ΔK на продолжительность периода торможения. Так, для титанового сплава и некоторых конструкционных материалов, используемых в авиации эта зависимость имеет U-образный вид, т.е. с ростом ΔK величина N_D сначала уменьшается, а затем увеличивается, достигая минимума в некотором промежуточном значении ΔK . Однако, для нержавеющей стали AISI 304 эта зависимость выглядит графически в виде перевернутой буквы U, а для некоторых конструкционных сталей с ростом ΔK наблюдается плавное снижение величины N_D . Устойчивой выглядит тенденция к усилению эффекта торможения по мере уменьшения ΔK .

В работе [2] вопрос влияния уровня базового размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН) на последующий рост трещины после разовой перегрузки был исследован на образцах алюминиевых сплавов 7075-T7351, 7075-T351 и 2024-T351. Обобщенный результат представлен на рис.2. Установлено, что с ростом ΔK эффект торможения роста трещины снижается. На рис.2 видно, что ниже порогового значения размаха КИН, ΔK_{th} , - левая граница, представляющая собой вертикальную линию, рост трещины как до, так и после перегрузки невозмо-

жен. Правой границей является нисходящая кривая, разделяющая устойчивый и неустойчивый (быстрое разрушение) рост трещины. Достижение этой границы зависит от сочетания базового размаха КИН, ΔK , и коэффициента перегрузки, R_{ol} : с ростом ΔK все меньшее значение R_{ol} требуется для достижения правой границы. Имеется линия, отделяющая состояние замедленного роста трещины от ее остановки после перегрузки. Здесь наблюдается обратная зависимость: чем больше базовое значение размах КИН, ΔK , тем требуется больший коэффициент перегрузки, R_{ol} . На рис. 2, с подробнее представлен случай (а), где построены линии, соответствующие определенной длительности, N_{DI} , эффекта торможения. Отсутствие роста трещины за время $N_{DI} > 10^7$ циклов было принято считать ее остановкой. Перегрузка оказывает влияние не только на задержку развития трещины по времени, но и на величину зоны торможения, Δa_{ol} (рис.1): с ростом R_{ol} увеличивается Δa_{ol} .

Блок амплитуд перегрузки растяжением

Воздействие блока амплитуд перегрузки растяжением на последующий переходный период роста трещины оказывается более сильным в сравнении с аналогичной единичной перегрузкой. Эффект торможения наступает сразу после перегрузки и СРТ снижается быстрее, чем это имеет место после единичной перегрузки.

На рис. 3 представлены результаты исследований влияния блочной перегрузки на образцы конструкционной стали E36. Как видно на левом рисунке (а), рост числа циклов в блоке, N_{ol} , приводит к увеличению времени торможения, N_D . Причем, этот эффект усиливается с ростом коэффициента перегрузки R_{ol} (OLR). На правом рисунке (b) видно, что с увеличением числа циклов в блоке перегрузки при том же R_{ol} размер зоны торможения не меняется относительно случая единичной перегрузки, но с ростом R_{ol} увеличивается ее размер, что соответствует уже сложившемуся представлению о формировании остаточных напряжений сжатия перед трещиной. Как и в случае единичной перегрузки, при блочной перегрузки рост коэффициента асимметрии цикла нагружения, R , после перегрузки приводит к ослаблению эффекта торможения.

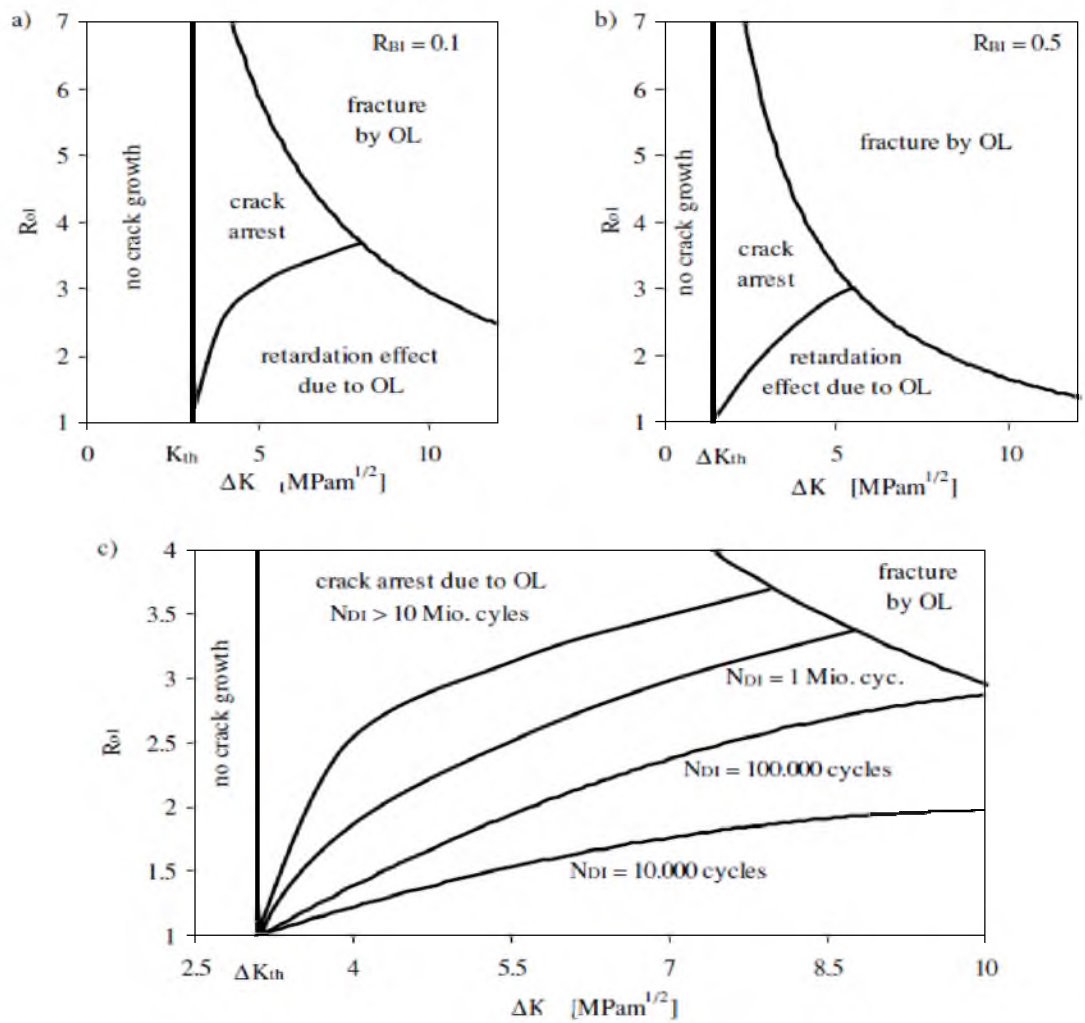


Рисунок 2 - Влияние базовой величины ΔK на рост трещины после единичной перегрузки:
а) $R=0,1$, б) $R=0,5$, в) изолинии при $R=0,1$ [86]

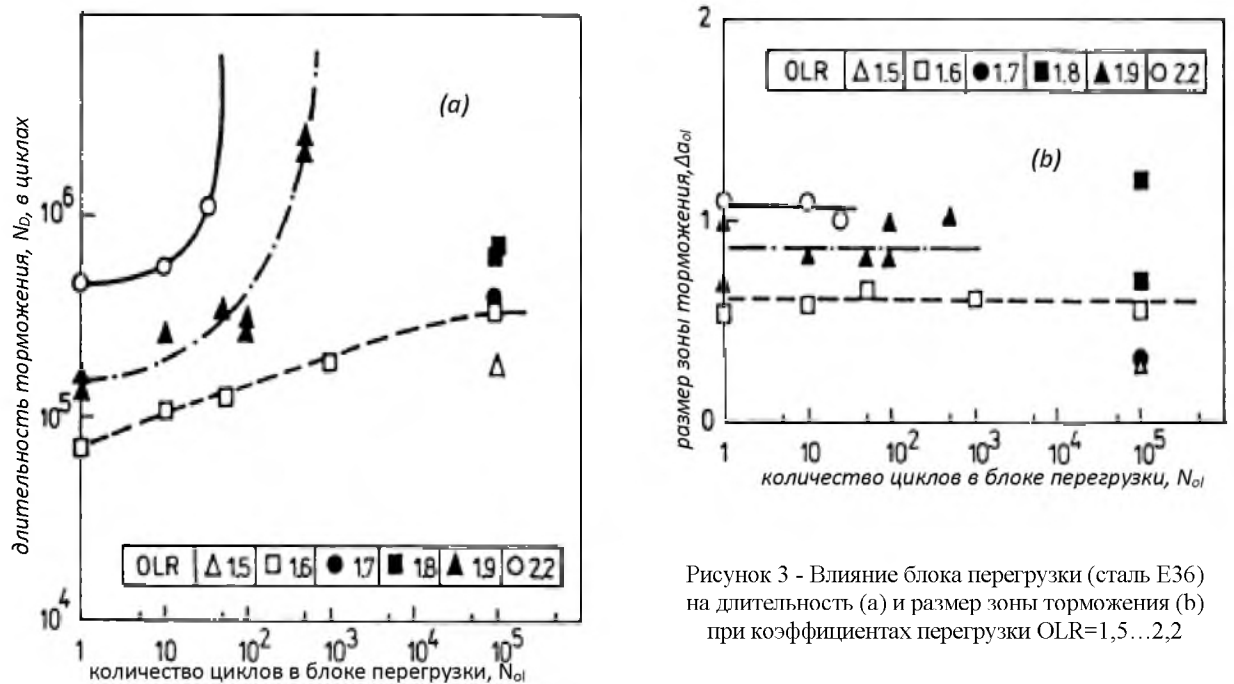


Рисунок 3 - Влияние блока перегрузки (сталь E36) на длительность (а) и размер зоны торможения (б) при коэффициентах перегрузки $OLR=1,5 \dots 2,2$

Повторение блоков амплитуд перегрузки растяжением

В зависимости от сочетания параметров нагрузки и характеристик материала данный случай нагружения может привести как к ускорению, так и к замедлению СРТ. Так, для конструкционной стали и алюминиевого сплава при нагружении с достаточно частыми повторениями единичных перегрузок растяжением было установлено повышение СРТ относительно нагружения с постоянной амплитудой напряжений [3]. Этот результат находится в противоречии с предыдущими случаями при единичной и блочной перегрузки растяжением без повторения. При этом, для алюминиевого сплава наблюдалось снижение отношения скоростей при переменной и постоянной амплитуде напряжений по мере роста трещины. Однако, аналогичные испытания, выполненные на конструкционной стали при нескольких размерах блока амплитуд перегрузки, N_{ol} , показывают, что наибольший мгновенный эффект торможения наблюдается на некотором промежуточном участке роста трещины. При испытании алюминиевых образцов с повторением единичных амплитуд перегрузки

растяжением установлено, что наибольшая продолжительность роста трещины имеет место при перегрузках $R_{ol}=2$ и на два порядка превосходит аналогичный показатель при нагружении с постоянной амплитудой напряжений без перегрузок. Установлено [3], что увеличение периода между единичными или блочными перегрузками приводит к усилению эффекта торможения. Испытания конструкционных сталей с повторением блоков перегрузки через $N=10^4$ циклов показало усиление торможения с увеличением продолжительности блоков перегрузки, N_{ol} .

Аналогичный результат был получен в работе [4] при испытании образцов алюминиевого сплава 2024-T3 при асимметрии цикла напряжений, $R=0,5$. С увеличением числа циклов с базовой амплитудой напряжений, $n=1000$, между циклами перегрузки эффект торможения усиливался, что видно на рис. 4. Этот эффект становился тем заметнее, чем выше был размах КИН базовых циклов напряжений. Однако, при небольшом количестве циклов, $n=10$, между циклами перегрузки, наблюдалось при относительно низких размахах КИН даже некоторое ускорение роста трещины.

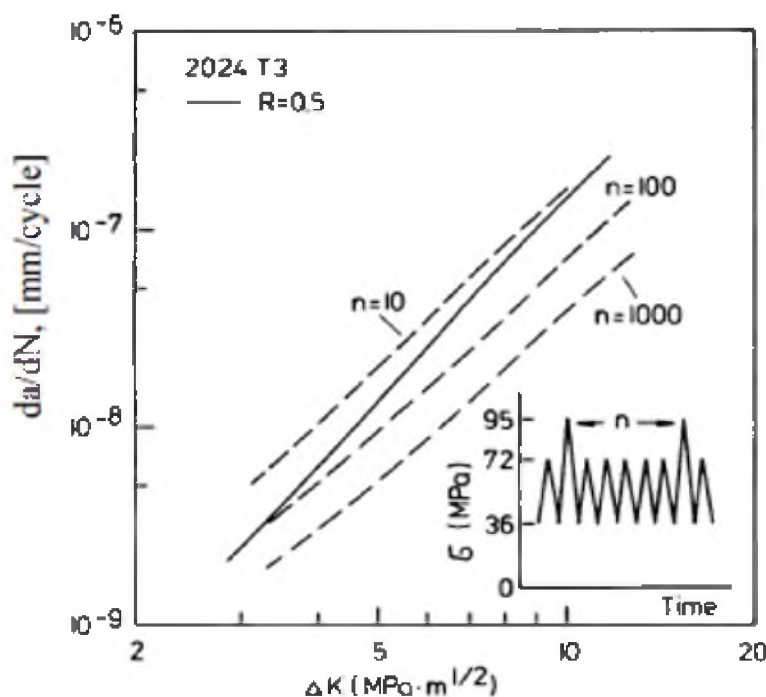


Рисунок 4 - Скорость роста трещины при периодических перегрузках [4]

Единичная перегрузка сжатием

Перегрузки сжатием в единичном или в блочном виде обычно приводят к сокращению рабочего ресурса элемента за счет увеличения СРТ, т.е. негативно влияют на усталостную прочность. Этот вывод был сделан авторами

работы [1] по результатам испытаний алюминиевого сплава при $R=0,5$, $R_{ul}=1,32$ и $K_{ul}>0$, и нержавеющей стали при $R=0$, $R_{ul}=2,0$ и $K_{ul}<0$. В обоих случаях после перегрузки сжатием наблюдалось ускорение роста трещины. Но в случае алюминиевого сплава ускорение

наступало значительно быстрее, чем для стали, повышение скорости относительно базовой (при постоянной амплитуде) значительно сильнее, а размер зоны воздействия перегрузки перед трещиной меньше. Аналогичные результаты для алюминиевого сплава получены после единичной перегрузки сжатием при осевом нагружении и чистом изгибе. Отмечается, что зарождение трещин и дальнейший их рост в алюминиевом сплаве от концентратора возможен при пониженных скоростях даже при напряжениях сжатия, если образцы были первоначально подвержены перегрузке сжатия. Конечный размер трещины, при котором имеет место ее остановка, увеличивается с увеличением коэффициента перегрузки, R_{ul} , и понижением уровня среднего напряжения цикла сжимающих напряжений.

Эффект ускорения роста трещины после перегрузки сжатием хорошо объясняется как с помощью остаточных растягивающих напряжений перед кончиком трещины, так и явлением закрытия трещины от пластического деформирования близлежащих областей за трещиной.

Повторение блоков амплитуд перегрузки сжатием

Периодическое повторение перегрузки сжатием приводит к увеличению скорости роста трещины, что было установлено [1] на различных сталях и сплавах при разных асимметриях циклов напряжений. Сила эффекта периодического воздействия перегрузкой сжатием зависит от числа циклов между перегрузками, N_{BL} . Чем меньше N_{BL} , тем выше скорость трещины. По мере увеличения N_{BL} эффект затухает, стремясь к

величине скорости при режиме нагружения с постоянной амплитудой (без перегрузок). Хотя в литературе доминирует вывод об ускорении скорости после перегрузки сжатием, однако, известны работы и с противоположными результатами, где отмечается незначительный эффект на последующий за перегрузкой рост трещины, и, даже, возможное торможение. Поэтому, эффект от воздействия повторяющихся перегрузок сжатием зависит от самого материала, геометрии образца, параметров нагружения.

Сочетания перегрузок растяжением и сжатием

В последовательности единичных перегрузок растяжением и сжатием наибольший эффект торможения в переходный период роста трещины имеет место когда перегрузка сжатием непосредственно предшествует перегрузке растяжением, что подтверждается результатами испытаний алюминиевого сплава [1], представленными на рис. 5. Наибольший эффект торможения проявляется в случае единичной перегрузки растяжением (случай *a*), что существенно увеличивает долговечность трещины, а кривая ее роста находится значительно правее кривой, соответствующей росту трещины без перегрузок. Наличие перегрузки сжатием перед перегрузкой растяжением (случай *b*) несколько снижает эффект торможения, что перемещает кривую роста трещины влево. В случае, когда перегрузка сжатием следует после перегрузки растяжением (случай *c*) эффект торможения почти исчезает и кривая роста трещины приближается к положению кривой, соответствующей испытанию без перегрузок.

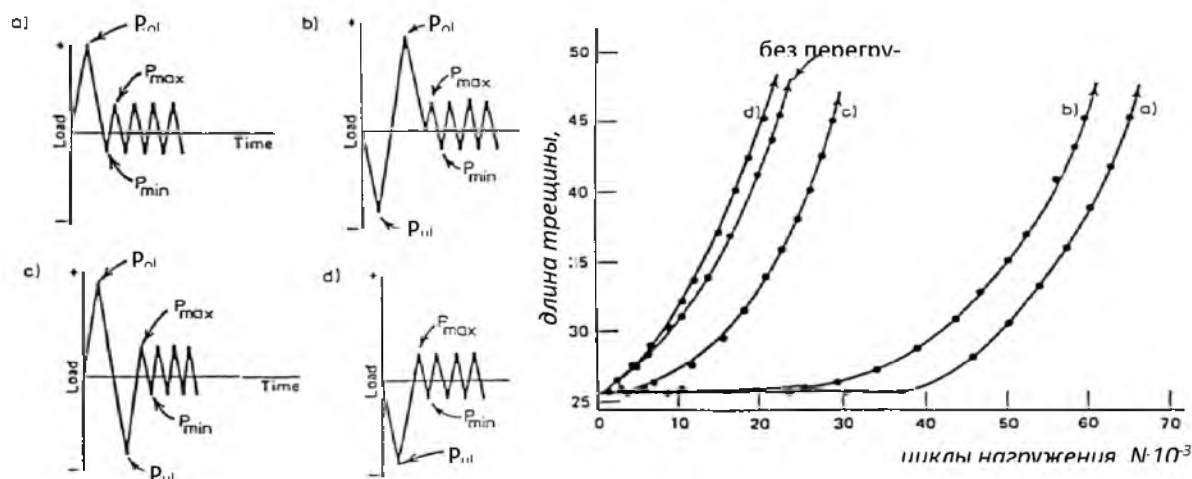


Рисунок 5 - Влияние комбинаций перегрузок на рост трещины в сплаве 2024-T3 [1]

Как и было отмечено ранее, перегрузка сжатием несколько увеличивает СРТ, что проявляется в смещении кривой ее роста левее базовой кривой "без перегрузок". Таким образом, при испытании алюминиевого сплава в случае, когда последней перегрузкой является растяжение, эффект торможения проявляется сильнее, чем когда последней перегрузкой в сочетании является сжатие.

С увеличением амплитуды перегрузки сжатием снижается эффект торможения и может полностью исчезнуть [5].

В качественном отношении описанная тенденция сохраняется и для случаев с блочными перегрузками. Однако, при увеличении числа циклов в блоках эффект проявляется сильнее, чем при единичных перегрузках, но все равно остается слабее, чем после просто единичной перегрузки растяжением.

Выше описанные результаты воздействия различных сочетаний перегрузок на неустойчивый рост трещины не являются однозначными и зависят от материала. Так, в отличие от выше приведенных результатов для алюминиевого сплава, для нержавеющей стали [1] получены обратные результаты. На рис. 6 видно, что наибольший эффект торможения имеет место (не считая случая с простой перегрузкой растяжением – правая кривая), когда перегрузка сжатием следует за перегрузкой растяжением. При этом величина перегрузки сжатием не имеет заметного влияния. При обратной очередности происходит ускорение

роста трещины, что противоречит данным испытаний на алюминиевом сплаве. Здесь рост перегрузки сжатием заметно ускоряет последующий рост трещины. Исследование влияния числа циклов и их амплитуды в блоке перегрузки сжатием показано на рис. 7. Блок из 10 циклов заметно сильнее ускоряет рост трещины, чем при аналогичных остальных параметрах при единичной перегрузке. Увеличение в 2 раза амплитуды цикла перегрузки сжатием не оказывает заметное влияние на скорость трещины.

Испытания с периодическим повторением последовательностей перегрузок растяжением-сжатием или сжатием-растяжением, представленные в [1], показывают, что эффект зависит от особенностей сочетаний параметров нагружений и свойств материалов. Так, испытание алюминиевого сплава при низких значениях ΔK основной нагрузки с чередованием перегрузочных сочетаний через 10 циклов, привело к ускорению роста трещины. В то же время, увеличение промежутков до 10^3 циклов вызвало заметное торможение с чуть выше скоростью при сочетании перегрузок растяжением-сжатием. Таким образом, в зависимости от сочетаний числа циклов в блоке перегрузки и между ними, а также очередности перегрузок, для различных материалов можно получить как эффект торможения, что встречается чаще, судя по литературе, так и ускорение роста трещины.

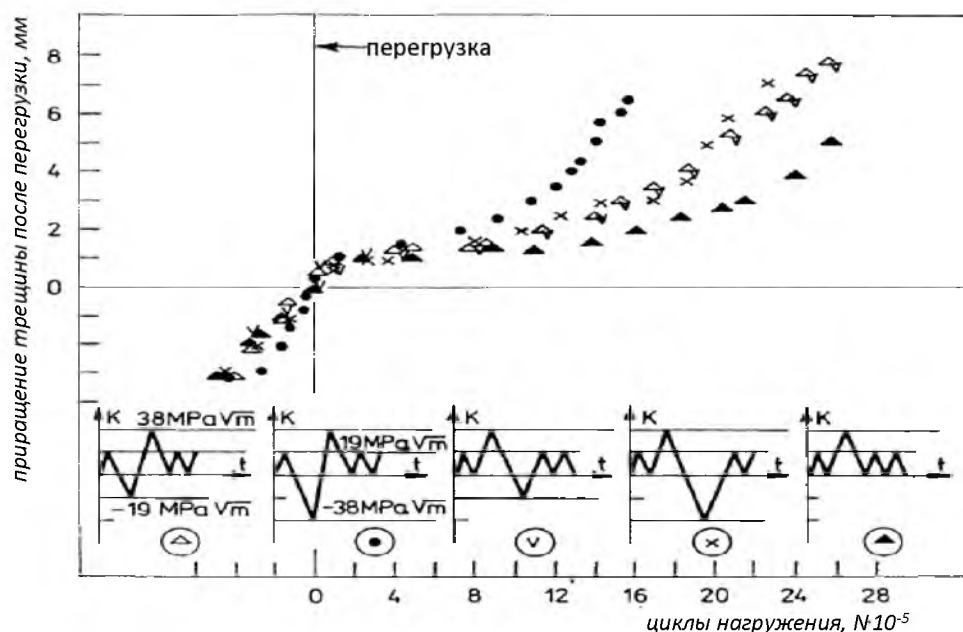


Рисунок 6 - Влияние величины и очередности перегрузки сжатием на рост трещины

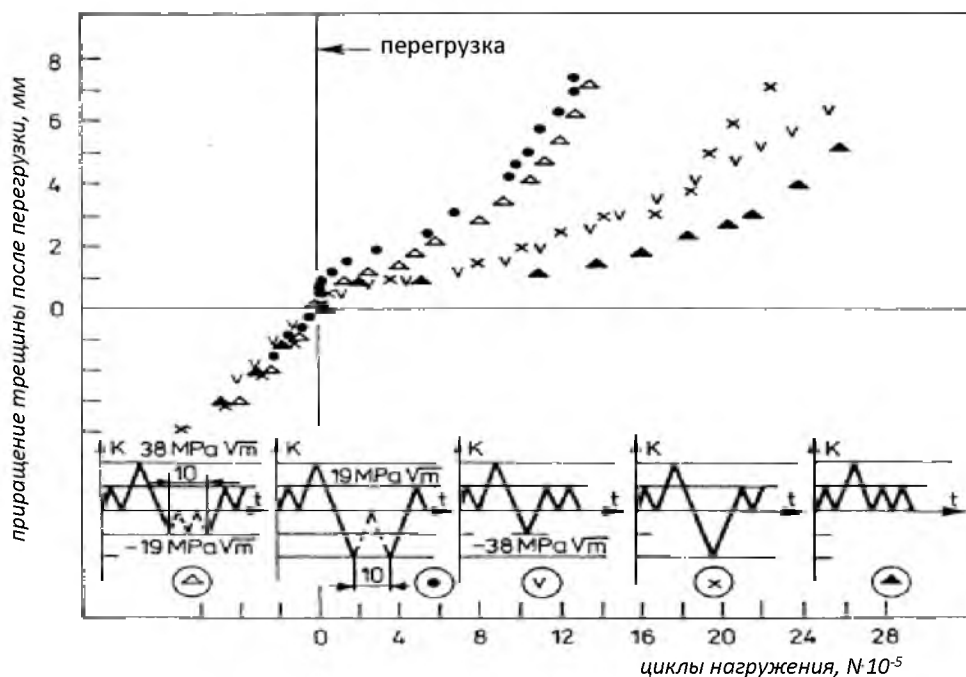


Рисунок 7 - Влияние протяженности блока и амплитуды перегрузки сжатием на рост трещины

Блочное нагружение

При переходе от блока с высокой амплитудой к блоку с низкой амплитудой напряжений эффект похож на случай блочной перегрузки растяжением с той разницей, что здесь отсутствует фаза ускорения. Процесс торможения наступает сразу при переходе на блок с низкой амплитудой напряжений.

Переход от блока с низкой амплитудой к блоку с высокой амплитудой напряжений обычно сопровождается ускорением роста трещины с постепенным последующим снижением СРТ до устойчивого уровня, соответствующего испытанию при постоянной амплитуде напряжений. В зависимости от параметров нагружения и свойств материала фаза ускорения может продолжаться достаточно долго, до нескольких тысяч циклов, или может закончиться на втором цикле блока с высокой амплитудой напряжений. Фаза ускорения трещины может и вообще не наступить, если предшествующий блок с низкой амплитудой соответствовал размаху КИН близкому к пороговому, ΔK_{th} .

Переход от блока с более высоким средним напряжением к более низкому при неизменной амплитуде цикла напряжений наблюдается снижение СРТ даже ниже уровня, соответствующего скорости при низком среднем напряжении при постоянной амплитуде (без эффекта перегрузки); возможна даже временная остановка трещины. В случае с алюминиевым

сплавом [1] при повышении уровня среднего напряжения наблюдалось повышение скорости даже выше величины, соответствующей испытаниям при постоянной амплитуде с высоким средним напряжением, но затем скорость постепенно уменьшалась до устойчивого уровня, соответствующего постоянной амплитуде напряжений.

Случайное нагружение

В процессе эксплуатации объекта последовательность нагрузок имеет случайный характер. Известны работы, оценивающие влияние вносимых в спектры изменений на долговечность объектов. В общем можно сделать вывод, что эффект от случайных нагрузок зависит от типа самого спектра, уровня расчетных нагрузок, свойств конструкционного материала и геометрии конструктивного элемента (образца). Показано, что при случайном нагружении следует учитывать и циклы нагружения с напряжением ниже предела выносливости материала или КИН ниже порогового значения, полученными при испытании с постоянной амплитудой, что уже отмечалось выше при рассмотрении нагружения с переменными амплитудами определенной последовательности. Эффект от взаимовлияния нагрузок зависит и от размера трещины. Поведение малых трещин (до 1 мм длиной) отличается от кинетики макротрещин ($> 1 \text{ мм}$). Как и в случае нагружения с переменной амплитудой определенной последовательности,

при случайном нагружении перегрузки сжатием оказывают такое же влияние, укорачивая остаточный ресурс конструкции.

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 и зависит от множества факторов, таких как механические свойства материала, геометрии конструктивного элемента/образца, вида нагружения, параметров цикла нагружения (коэффициентов асимметрии и величин размаха КИН базового и цикла перегрузки, знака перегрузки, число и последовательность блоков перегрузки и другие);

2) поведение трещины после разовой перегрузки растяжением приводит к последующему снижению СРТ, а при блочной перегрузке растяжением этот эффект усиливается. Количество циклов в блоке и длительность между блоками также влияют на последующую кинетику трещины;

3) протяженность зоны торможения не имеет устойчивой связи с размером пластической зоны передтрещиной и может быть, как больше, так и меньше ее размера;

4) воздействие перегрузки сжатием приводит в большинстве случаев к противоположному эффекту, а именно – к увеличению СРТ. Блочной воздействие перегрузкой сжатия аналогично эффекту, описанному в п.2, но с обратным знаком;

5) сочетание единичных или блочных воздействий циклами перегрузок разного знака зависит от их последовательности, но при этом воздействие перегрузкой растяжения превалирует при равенстве остальных параметров над перегрузкой сжатием;

6) точность прогнозирования долговечности конструктивного элемента с трещиной зависит от адекватности феноменологической модели, положенной в основу расчета, учитывающей все

разнообразие поведения трещины при нерегулярном нагружении.

Литература

1. 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.
2. Sander, M. Fatigue crack growth under variable amplitude loading. Part I: experimental investigations / M. Sander, H. A. Richard // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*—2006.—Vol.29.—P.291–301.
3. Naithani, R. Estimation of wave spectral shapes using ANN / R. Naithani, M.C. Deo // *Advances in Engineering Software*.— 2005. - Vol. 36, № 11 - 12. – P. 750 - 756.
4. 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.
5. 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.

References

1. 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.
2. Sander, M. Fatigue crack growth under variable amplitude loading. Part I: experimental investigations / M. Sander, H. A. Richard // *Fatigue Fracture Eng. Mater. Struct.* – 2006. – Vol.29. - P. 291 – 301.
3. Naithani, R. Estimation of wave spectral shapes using ANN / R. Naithani, M.C. Deo // *Advances in Engineering Software*.— 2005. - Vol. 36, № 11 - 12. – P. 750 - 756.
4. 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.
5. 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.

УДК 621.436

DOI: 10.34046/aumsuomt93/13

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДШИПНИКОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

А. Ю. Самойленко, доктор технических наук, доцент

В.А. Туркин, доктор технических наук, профессор

В статье приводятся параметры известных и перспективных средств эксплуатационного мониторинга подшипников судовых дизелей. Из-за существенного возрастания давлений в цилиндре дизелей условия работы подшипников ужесточились, что требует их непрерывного температурного контроля. В