

УДК 539.3:669

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ И НАГРУЗКИ НА ВОЛНОВЫЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

© 2009 Ю. И. Кольцун¹, Б. Е. Мельников², Т. А. Хибник¹, А. А. Прохоров¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет

²Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Рассмотрена неоднородность фронта усталостной трещины при многоцикловом нагружении с точки зрения волновых деформационных процессов. Представленные положения на основе гипотезы плоских продольных сечений позволяют использовать волновые уравнения для описания структуры трещины. Этот метод дифференциального анализа фронта трещины является основой для волновой теории циклической прочности.

Плоские, цилиндрические образцы, макроструктурный анализ, медленнорастущая усталостная трещина, неоднородность фронта трещины, волновые деформационные процессы, частота нагружения

Современные методы исследования трещинообразования базируются на определении коэффициента интенсивности напряжений (КИН), который взаимосвязан со скоростью и периодом роста трещины в условиях циклического нагружения детали. Но КИН не позволяет оценивать направление траектории движения линии фронта трещины, особенно если это направление постоянно изменяется. Факторы, влияющие на изменение направления движения устья трещины определяются, прежде всего, его структурой, технологическими особенностями изготовления, термодинамическими свойствами и химическим составом металла. В пластинах и оболочках линия фронта как таковая отсутствует – геометрия трещины определяется длиной. В сплошных деталях типа Solid при образовании усталостной трещины, развивающейся в глубину, существует линия фронта. При различных условиях нагружения детали линия трещины по фронту вершины её устья не всегда является гладкой и непрерывной в одной плоскости. Это позволяет говорить о функциональной неоднородности линии фронта усталостной трещины в сплошных деталях.

В исследовании трещинообразования очень важным является знание механизма разрушения материалов. С одной стороны, знание факта наличия различных механизмов зарождения и развития трещин связано с уровнем амплитуд напряжений, с другой – знание особенностей формирования траектории движения фронта трещины подсказы-

вает о наличии тех или иных механизмов локального разрушения. Это позволяет оценивать величину местных напряжений в условиях самоорганизованной системы превращения и изменения энергии элементов структурного взаимодействия материала.

Анализ изломов металлических образцов и деталей, подвергнутых испытаниям на малоцикловую (МЦУ) и многоцикловую (МНЦУ) усталость, свидетельствует о возможности обобщенного описания закономерностей развития разрушения, если использовать кинетическую диаграмму роста усталостной трещины (КДРУТ) и кинетическую диаграмму медленного роста усталостной трещины (КДмРУТ) [1,2] на полной диаграмме долговечности для материала. На рис. 1,а,б изображены излом и фрагмент излома титановой лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД), для которой основным видом нагружения является переменное кручение с изгибом. На рис. 1,в изображен усталостный излом образца с мелким полукруглым кольцевым надрезом из стали 45 при кручении с изгибом по симметричному циклу.

Можно видеть, что разрушение детали и образца в нижней части имеют усталостную трещину глубиной 1,0 мм. Однако в обоих случаях разрушение началось с противоположной стороны. Поверхность рельефа трещины разрушения зависит от количества и вида действия внешних нагрузок, а также эффекта при изменении их приоритета при уменьшении площади несущего сечения

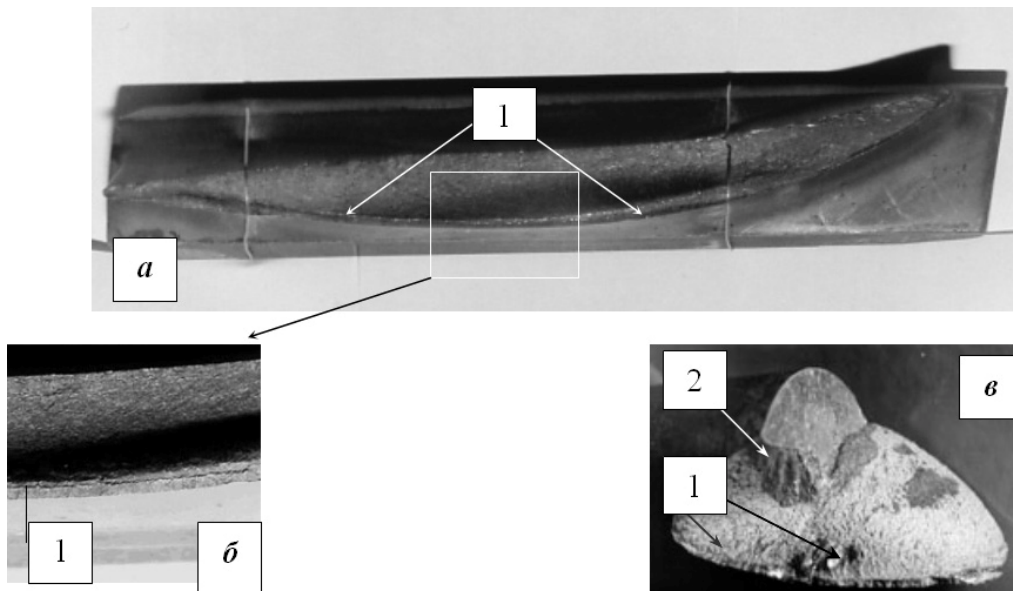


Рис. 1. Типичные изломы с медленно растущей трещиной I в лопатке ступени компрессора ГТД из сплава ВТ-3-1 (а–б) и образце (в) из стали 45 без ОН при кручении с изгибом: а - лопатка ГТД с медленно растущей усталостной трещиной I; б - фрагмент излома лопатки компрессора ГТД; в - Ст.45, $R = 0,3$ мм, ГДО

детали. Так, на рис. 1,в видно, что первоначальное развитие трещины шло перпендикулярно поперечному сечению в силу приоритета действия нормальных напряжений в зоне наименьшего сечения, воспринимающего изгиб. Затем разрушение развивалось по волновой поверхности относительно плоскости под углом 45 градусов к продольной оси в результате действия касательных напряжений от кручения. Как видно на рис. 1,в, зона 2 перехода от трещины типа отрыва к трещине по типу антиплоского сдвига, имеет характерную волновую поверхность. Данная зона обладает строгой геометрической закономерностью распределения волновых деформационных процессов при циклическом развитии магистральной трещины. По всей вероятности, формирование зоны 2 возникло в результате локального резонирования при сложении продольных и поперечных волн в силу синфазного циклического нагружения с частотой 19,5 Гц. Следовательно, можно констатировать, что процесс смены типа трещины при её росте сопровождается волновыми процессами, проходящими при образовании сколов пластических деформаций, что выражается при условии резонирования продольных и поперечных волн с новыми значениями местных частот переходной зоны 2 на рис. 1,в в макрофрактальных объёмах материала. Это определяет неоднородность развития усталостной трещины и условия смены механизмов зарождения

усталостной трещины при переходе трещины от типа I к типу III и наоборот. Можно считать, что при росте с поверхности трещины нормального отрыва (см. рисунок 1,в) по типу I (от изгиба) одновременно зарождалась усталостная трещина по типу III, (в результате кручения) глубоко под поверхностью сразу в нескольких локальных областях, судя по зоне 2. Данные области определяются острыми углами так называемых волновых усталостных ступеней-борок, которых, примерно шесть.

Описание подобных макро закономерностей формирования рельефа усталостного излома не ограничивается одним примером. Условия формирования закономерностей при эволюции формирования рельефа усталостных изломов неудовлетворительно объясняются скосами пластических деформаций. Очевидно, что суммирование неизвестных нам процессов внутри материала детали выражается формой рельефа излома. Если она имеет волновую поверхность, то, объективности ради, целесообразным является использование волновых уравнений для описания распределения силового взаимодействия и перемещений локальных объемов материала детали при циклическом нагружении и их дифференциальные результаты по полученным траекториям в различных локальных зонах суммировать при описании рельефа поверхности движения трещины. Вопрос в том, так ли необходимо знать тра-

екторию движения трещины усталости? Насколько важно знание правильного описания формирования рельефа усталостной трещины, приводящей к разрушению? Ответ на эти вопросы поможет правильно представлять процессы, происходящие в пакетах кластеров фуллеренов на нано уровне, что позволит заглянуть внутрь усталостной бороздки и смоделировать процесс её зарождения в металле на мезо структурном масштабном уровне. Для этого важным является макро структурирование рельефа усталостного излома при анализе разрушения детали.

Макроструктурный анализ неоднородности линии фронта и берегов усталостной трещины

Плоские образцы

Рассмотрим макроскопические особенности изломов образцов по третьему типу ГОСТ 25.506-85, полученных в процессе испытаний на установке *INSTRON 8801* при частотах внешнего нагружения от 19,5 Гц до 100 Гц с постоянной внецентренной силой.

Вначале проведем анализ изломов образцов из высоколегированного стального сплава (марки АК) с высокой вязкостью, предоставленные Э.И.Мансыревым и В.Н.Селюковым (КСМ СПбГПУ) [1]. Внешняя сила рассчитывалась так, чтобы количество циклов до разрушения составляло порядка 100...200 тысяч циклов. На рис. 2 в зоне так называемого раструба [3], где классически считается наличие плоского напряженного состояния, можно видеть движение скосов пластической деформации магистральной трещины, смещение фаз полуволны которых составляет 1...3мм. Данный процесс фактически представляет результат квантования усталостной трещины.

Глядя на рис. 2, на первом макро-периоде трещина наметила движение вправо, но развитие разрушения началось по левой линии полуволновой формы. Тем не менее, в процессе роста трещины её периодическое смещение фаз при движении волны, можно назвать, макро квантование. Оно намечало возможность изменения направления развития трещины, четко выделяя скосы пластических деформаций. И только примерно на восьмом макро периоде произошло измене-

ние направления движения трещины по линии правой полуволны 3. Испытания показали, что для определенного размера опасного поперечного сечения, для конкретной марки металла, определяющей величину объемной зоны скосов пластических деформаций, изменение направления при росте магистральной трещины в большой степени обусловлено величиной внешней частоты нагружения образца. Волновые процессы, происходящие в металле при ударе и взрыве известны и интенсивно изучаются. Но здесь возникает другой вопрос: возможно ли при внешних частотах многоциклового нагружения возникновение волновых процессов в металле, проявляющихся в области интенсивных пластических деформаций?

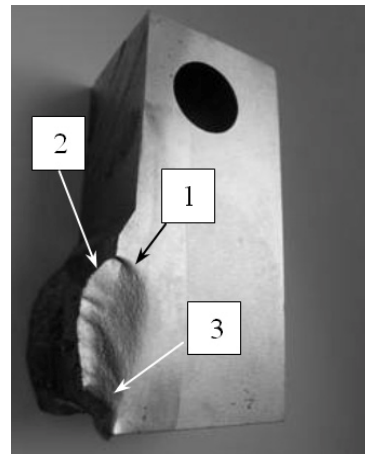


Рис. 2. Разрушение образца из сплава АК

На рис. 3,а,б изображена фотография синусоидального излома в области окончательного разрушения образца. Позицией 1 показана линия явно выраженной синусоиды, по которой произошло разрушение.

Данную зону иначе как пластическим шарниром назвать нельзя. Исходя из схемы нагружения, волна, по которой произошло разрушение в пластическом шарнире, является продольной.

На рис. 3, в показаны продольная волна 1 в пластическом шарнире и поперечная вертикальная волна 2 по линии фронта усталостной трещины. Из этой серии изломов наиболее ярким примером волновых деформационных процессов, происходящих при циклическом нагружении является фотография излома, приведенного на рис. 4.

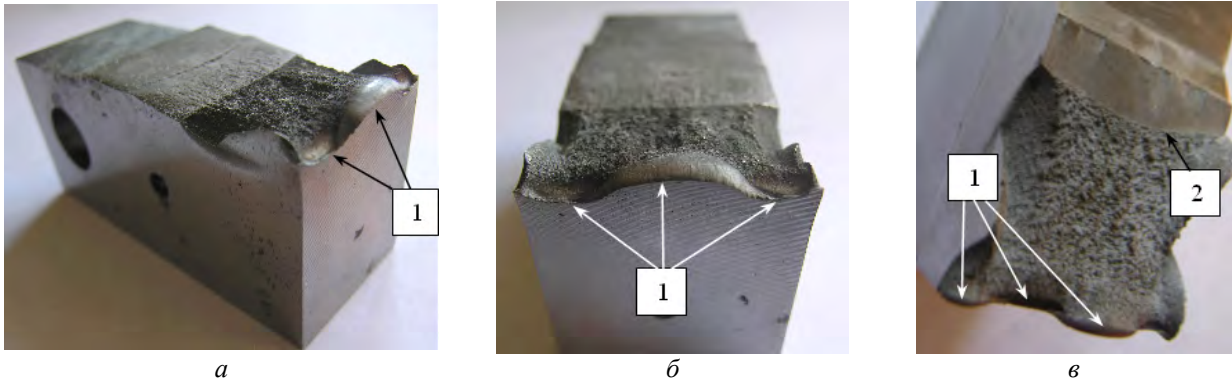


Рис. 3. Синусоидальная форма пластического шарнира



Рис. 4. Деформационный волновой процесс на поверхности излома

Волновой процесс, изображенный на рис. 4 на поверхности «раструба» (КСМ СПбГПУ) при движении магистральной трещины с частотой внецентренного нагружения 30 Гц образца, явно представляет собой объемное напряженное состояние. Это противоречит классическому представлению НДС в раструбе, где должно иметь место плоское напряженное состояние (ПНС). Часто ПНС в раструбе при асимметричном внецентренном растяжении наблюдается в среднеуглеродистых и малопрочных сталях во всем диапазоне частот многоциклового усталости.

В низколегированных стальных сплавах, например сталь 30ХГСА, результаты испытания которой представлены в данной работе, последний этап разрушения при увеличении внешней частоты нагружения до 70 Гц сопровождается увеличением неоднородности трещины из-за проявления волновых процессов на поверхности при формировании скосов пластической деформации в пределах глубины равной примерно 3 мм (рис. 5,а).

Анализ излома из среднеуглеродистой стали 45 при частоте 19,5 Гц, позволил установить результат остаточного процесса, который также выражен в виде застывших бегущих волн. Данный процесс наглядно показан на рис. 5,б, где застывшие волны в пластической зоне показаны позицией 1. Рис. 5,в,г свидетельствуют о том, что для низколегированных сплавов (сталь 30ХГСА) увеличение частоты нагружения от 20 Гц до 100 Гц приводит к увеличению амплитуды и скорости движения волн в области пластических деформаций.

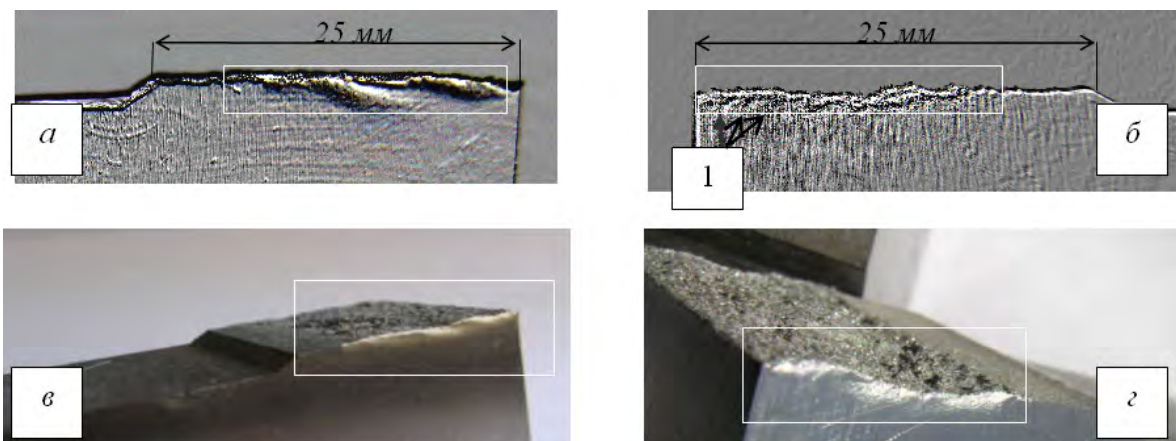


Рис. 5. Область пластических деформаций плоских образцов:

a – сталь 30ХГСА, $f=70\text{Гц}$; *б* – сталь 45, $f=19,5\text{Гц}$; *в* – сталь 30ХГСА, $f=20\text{Гц}$; *г* – сталь 30ХГСА, $f=100\text{Гц}$

На рис. 6 *a, б* изображен излом стального сплава марки АК при двукратном изменении величины внешней нагрузки, преобразованного в редакторе Adobe fotoshop 6.0 на режиме фильтрации [1]. На рисунках приведены размерные и реперные линии, по которым можно вычислить все необходимые параметры геометрии рельефа во фронтальной плоскости. У линии горизонтального надре-

за можно видеть границу усталостной трещины, имеющую сходство с «тарелкой» (см. п.1 рис. 6,б). Отчетливо видно изменение фрактальной размерности в областях с различной величиной нагрузки при внецентренном нагружении и в областях скосов пластических деформаций, выраженных в виде волново-сфероидных поверхностей (рис. 6,а).

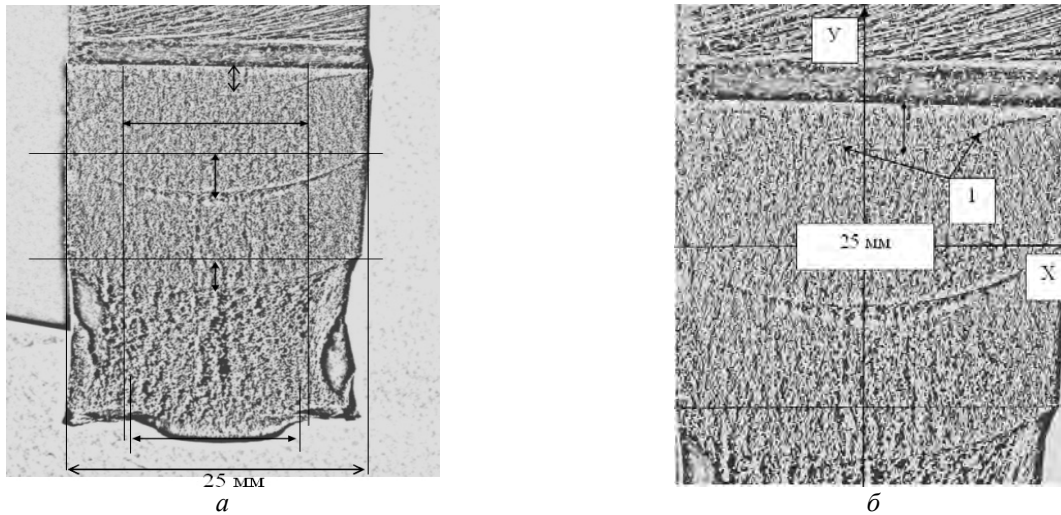


Рис. 6. Излом образца из сплава АК в режиме фильтрация

Таким образом, показано, что в плоских образцах из стали и её сплавов имеет место наличие волновых процессов в зоне скосов пластических деформаций при частотах внешнего нагружения от 19,5 Гц до 100 Гц. Однако, эксперименты показывают, что данные процессы происходят и при менее интенсивных пластических деформаций, в частности, в цилиндрических образцах при изгибе.

Цилиндрические образцы

На рис. 7, *а* представлен излом цилиндрического образца из стали 45 с кольцевым полукруглым надрезом при изгибе по симметричному циклу с частотой 19,5 Гц. На

рис. 7, *б* изображена компьютерная обработка в редакторе Adobe fotoshop 6.0 в режиме фильтрации. В выделенных прямоугольных зонах можно видеть регулярную волновую поверхность берега усталостной трещины, образованного при минимальных пластических деформациях в области устья трещины на линии фронта.

Переход к магистральной усталостной трещине показан на рис. 8, *а, б, в*, где отчетливо видна микроструктура формирования усталостных ступеней (рис. 8,а), выраженная волновым пластическим течением стали (рис. 8,б). На рис. 8, *в* представлена компьютерная обработка рис. 8,б.

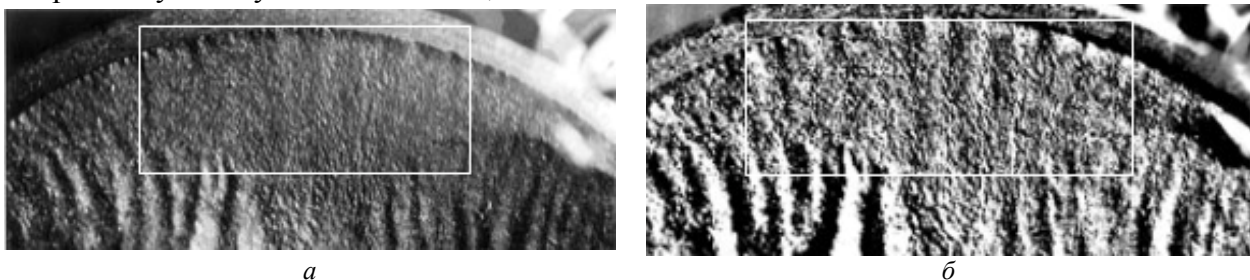


Рис. 7. Цилиндрический образец из стали 45

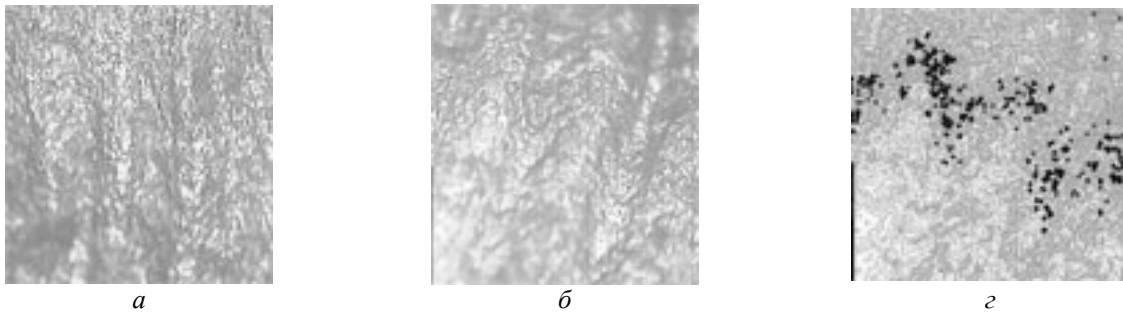


Рис. 8. Микроструктура формирования усталостных ступеней

Рис. 7 и 8 свидетельствуют о том, что регулярная волновая поверхность, полученная после формирования медленно растущей усталостной трещины, является выражением не сколов пластических деформаций, а частоты циклического нагружения. В данном случае имеют место горизонтальные поперечные стоячие волны в выделенных областях на рис. 7 с периодом 1,0 мм. Данные факты заставляют задуматься о новых методах теоретического обоснования формирования рельефа усталостного излома.

Описание макрорельефа усталостных изломов

Макро и микро анализ как быстрого, так и медленного роста усталостных трещин свидетельствует о том, что в области пластических деформаций металл чувствителен к частоте циклического нагружения. При медленном росте усталостной трещины область пластических деформаций в устье очень мала. Однако, малые размеры на макро- (более 5...10 мкм) и мезо- (0,15...1,5 мкм) масштабном уровнях, на нано- уровне выше на три и более порядков. В этом случае отдельные группы молекулярных соединений, между которыми имеет место несовершенство соединений подвержены регулярным перемещениям, соответствующим волновым законам изменения деформаций. В областях пластических деформаций этот процесс наиболее легко реализуемый.

Графо-аналитическая обработка изломов с усталостными трещинами в плане анализа формы линии фронта, волновых поверхностей их берегов и зон сколов пластических деформаций свидетельствует о том, что при полученных длинах волн и амплитуд остаточных деформаций частота собственных колебаний групп молекулярных со-

единений находится в диапазоне ультразвука. Вопрос, касающийся источника колебаний ультразвукового диапазона в металле при циклическом нагружении детали требует дополнительных исследований, ибо известно, что ультразвук не влияет на разрушение деталей. В то же время практика показывает, что изменение направления роста усталостной трещины неоднородно по всем направлениям трехмерной системы координат.

Если схематизировать распределение волн в элементарном кубе, то картина будет такой, как представлена на рис. 9, где a – есть амплитуда волны. Тогда волновой процесс, изображенный на рис. 4 с учетом рис. 9, можно приблизительно смоделировать так, как показано на рис. 10. Видно, что линию выхода магистральной трещины можно описать во времени гармоническими уравнениями с четырьмя уровнями амплитуд.

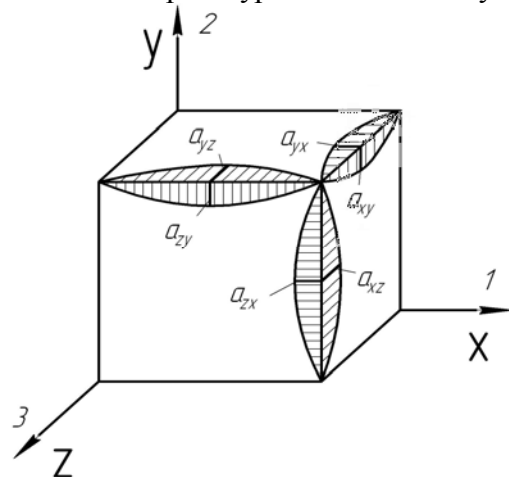


Рис. 9. Распределение волн в элементарном кубе

Исходя из данных предпосылок и, опираясь на неоднородность линии фронта трещины, для описания усталостного излома целесообразно его сечение представить в виде разбиения на макро структурные об-

ласти. На рис. 11 представлено разбиение исследуемого сечения излома на пять макро областей [1]. В этом случае длину продольных и поперечных волн можно описать известными уравнениями (1) и (2).

$$\lambda_{\text{прод}} = V_{\text{прод}} \cdot T = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{1}{\nu}, \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{поп}} = V_{\text{поп}} \cdot T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \cdot \frac{1}{\nu}, \quad (2)$$

где λ – длина волны, м;

V – скорость распространения волн, м/с;

T – период, с;

E – модуль упругости первого рода, МПа;

ρ – плотность материала, кг/м³;

ν – частота собственных колебаний фактальной области, Гц;

$G = E/2(1+\mu)$ – модуль упругости второго рода (модуль сдвига), МПа;

μ – коэффициент Пуассона.

высказывание С.П.Тимошенко о том, что в плоскости всегда можно описать траекторию магистральной трещины. Используя современные технические средства, можно выполнить процедуру лазерного сканирования поверхности излома вдоль линий главных осей, параллельных плоскости задания нагрузки с привязкой к исходной системе координат, составив при этом систему волновых уравнений. Данная процедура, используя гипотезу плоских продольных сечений [4,5], позволит описать рельеф поверхности разрушения детали.

Таким образом, исследуя неоднородность развития трещины, возникает вероятность создания новой теоретической концепции – волновой теории циклической прочности.

Библиографический список

1. Кольцун, Ю.И. Макроструктурный анализ усталостных изломов. Проблемы, достижения и перспективы [Текст] / Ю.И. Кольцун // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: сб. докладов VII Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте 23-24 апреля 2008г. – Петербургский гос. ун-т путей сообщений. – Санкт-Петербург, 2008. – С.149-182.

2. Кольцун, Ю.И. Инженерный метод расчета периода роста усталостной трещины / Ю. И. Кольцун, Т.А. Хибник, А.Ю. Кольцун // Международная конф. RELMAS' 2008. Санкт-Петербург, Россия, 17-20 июня, 2008. – с.173-177.

3. Партон, В.З. Механика упругопластического разрушения [Текст] / В.З. Партон, Е.М.Морозов. – М.: Наука, 1985. – 504с.

4. Кольцун, Ю.И. Волновые процессы при многоцикловом нагружении детали. Гипотеза плоских продольных сечений [Текст] / Ю.И. Кольцун // Вестник Сам-го гос. техн. ун-та. – 2005. – Вып. 34. – С.199-202.

5. Кольцун, Ю.И. Прогнозирование поверхности усталостного излома. Гипотеза плоских продольных сечений [Текст] / Ю.И. Кольцун // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Труды VI Междунар. научн. конф. – Санкт-

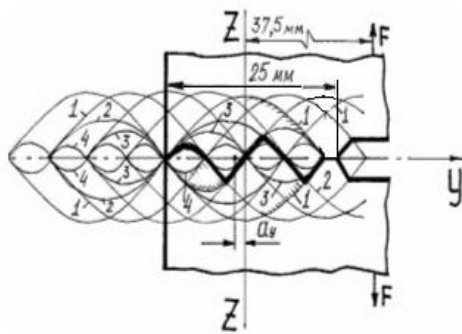


Рис. 10. Смоделированный волновой процесс

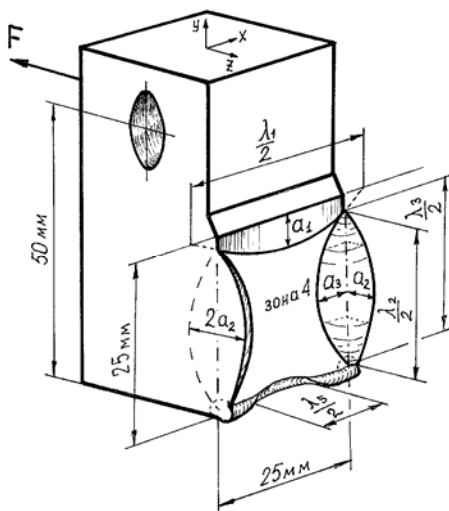


Рис. 11. Разбиение образца на макро структурные области

Следует заметить, что на рис. 10 изображена траектория движения трещины в одной плоскости. В этой связи, вспоминая

Петербург. гос. политехн. ун-т. – Санкт Петербург, 2005.- С. 248-252.

References

1. Koltoun, Yu. I. Macrostructure analysis of fatigue dog-leg. Problems, achievements and prospects [Article]/ Yu. I. Koltoun // Problems to strength material and buildings on transport: VII International conference on problem of strength material and buildings on transport 23-24 apr. St. Peter univ. ways and messages. – St. Peter., 2008. – p.149-182.

2. Koltoun, Yu. I. An engineering method calculation of fatigue crack growth period / Yu. I. Koltoun, T.A. Khibnick, A.Yu. Koltoun // International Conference RELMAS' 2008. St. Petersburg, Russia, 17-20 June – 2008 – p.173-177. [In Russian].

3. Parton, V.Z. Mechanics of elastic-plastic fracture [Article]/ V.Z. Parton, E.M. Morozov. – M.:Nauka, 1985. – 504p.

4. Koltoun, Yu. I. Wave processes at under high cyclic loading to a part. Theory of plane longitudinal sections [Article]/ Yu. I. Koltoun // Vestnic of Samara State Technical University. – Samara state techn. Univer. – Samara, 2005. – Vol. №34. – p.199-202.

5. Koltoun, Yu. I. Conceptual forecasting of the fatigue fracture of the surfase. Theory of plane longitudinal sections [Article]/ Yu. I. Koltoun // Scientific and technical problems of forecasting of strength and durability of constructions and methods of solving them: Vi International scientific conference. – St. Peter. Polit. Univ. – St. Peter.,2005. – p. 248-252.

INFLUENCE OF THE FREQUENCY AND LOAD ON WAVE DEFORMATION PROCESSES UNDER HIGH CYCLE FATIGUE

© 2009 Yu. I. Koltoun¹, B. E. Melnikov², T. A. Khibnick¹, A. A. Prohorov¹

¹Samara State Aerospace University

²St. - Petersburg State Polytechnical University

Main and fatigue crack front in homogeneity under high cycle loading was considered. It was considered in the view of wave deformation process in metals. Represented rules on the basis of plane longitudinal section hypothesis allow using wave equations for crack structure description. This method of crack front differential analysis is the basis of cyclic strength wave theory.

Flat, cylindrical samples, macrostructural analysis, creeping fatigue crack, heterogeneity of the crack front, wave deformation process, frequency loading

Информация об авторах

Кольцун Юрий Иванович, доктор технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: koltoun_y.i@mail.ru. Область научных интересов: механика разрушения, механика твердого деформируемого тела, мезомеханика, синергетика.

Мельников Борис Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов Санкт Петербургского государственного политехнического университета. Область научных интересов: механика разрушения, механика твердого деформируемого тела, прочность материалов и конструкций.

Хибник Татьяна Алексеевна, ассистент кафедры основ конструирования машин Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов: механика разрушения, механика твердого деформируемого тела, мезомеханика, синергетика.

Прохоров Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов: прочность материалов и конструкций, механика разрушения, механика твердого деформируемого тела.

Koltsov Yuriy Ivanovich, a doctor of the technical sciences, assistant professor of the department of the strength materials of Samara state aerospace university. E-mail: koltsov_y.i@mail.ru. Area of research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezo mechanics, synergetics.

Melnikov Boris Evgenievich, a doctor of the technical sciences, professor of the department of the strength materials of Saint Petersburg state polytechnic university. Area of research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, strength of the materials and designs.

Hibnik Tatiyana Alekseevna, an assistant of the department of the basis designing of Samara state aerospace university. Area of research: mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body, mezo mechanics, synergetics.

Prohorov Andrey Aleksandrovich, candidate of the technical sciences, assistant professor of the department of the strength materials of Samara state aerospace university. Area of research: strength of the materials and designs, mechanics of the cracking, mechanics of a solid deformable body.