

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН  
ПРИ СМЕШАННЫХ СХЕМАХ НАГРУЖЕНИЯ****В.В. Покровский<sup>1</sup>, В.Н. Ежов<sup>1</sup>, В.Г. Сидяченко<sup>1</sup>, Ю.И. Коваль<sup>2</sup>****INVESTIGATION OF CRACK GROWTH BEHAVIOUR  
UNDER MIXED MODE LOADING.****V.V. Pokrovsky, V.N. Yezhov, V.G. Sydiachenko, Yu.I. Koval**<sup>1</sup>*Институт проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины, Киев, Украина*<sup>2</sup>*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»<sup>2</sup>, Киев, Украина*

**Abstract** The crack growth resistance of different metals under mixed mode (I+II) and biaxial loading was investigated. Fracture pattern depends on the load ratio under different modes and their level. Criterial equation were proposed.

В реальных конструкциях ориентация плоскости трещин может быть произвольной относительно прикладываемой внешней нагрузке. В этих случаях смещение берегов трещины возможно не только по моде I (нормальный отрыв), а и по смешанным модам I+II+III. Нагружение по этим модам при определённых условиях может быть более опасным, чем по моде I. Это обстоятельство важно учитывать, при прогнозировании характеристик циклической и статической трещиностойкости.

Несмотря на достаточно большой объём теоретических и экспериментальных исследований на сегодняшний день нет обоснованных и чётких рекомендаций по выбору типа образцов для получения характеристик вязкости разрушения при нагружении по моде II и смешанных модах I+II. Кроме того, в обзорных публикациях по проблеме исследования характеристик вязкости разрушения при чистом поперечном сдвиге и при различных соотношениях мод I и II показан значительный разброс по значениям характеристик вязкости разрушения [1, 2]. Это свидетельствует о необходимости усовершенствования экспериментальной методики и дальнейшей работы над теоретическим обобщением.

В данном сообщении остановимся на методике исследования характеристик статической трещиностойкости при моде II, а так же в условиях смешанных мод I+II.

Исследование характеристик статической трещиностойкости при поперечном сдвиге (мода II) и при комбинации нормального отрыва с поперечным сдвигом (мода I+II) выполнялись на сервогидравлической испытательной установке фирмы Schenck

Для построения зависимости «нагрузка-перемещение» использовали компьютеризированную измерительную систему для обработки результатов испытаний.

Компьютеризированная измерительная система включает следующие элементы: ПК, АЦП с шестнадцатью дифференциальными каналами, терминальную плату для подсоединения дифференциальных каналов, модули аналогового тензоусилителя постоянного тока для мостовых схем ADAM 3016.

В данной работе для исследования характеристик трещиностойкости сталей 15X2НМФА(КП60), 15X2НМФА(КП100), 15X2МФА(КП60) были выбраны образцы на несимметричный трёхточечный и четырёхточечный изгиб.

Формулы для расчёта КИН, а также схема нагружения заимствованы из работы [3].

Приспособление для нагружения образца на несимметричный четырёхточечный

изгиб показано на рис.1.

Рама, в которой расположен образец 1, состоит из нижней балочки 2 к которой крепятся боковые направляющие пластины 3, верхней балочки 4, которая свободно может перемещаться по боковым направляющим 3 и валикодержателей 5. Нижняя балочка 2 при помощи соединения типа «ласточкин хвост» закреплена на пластине 6, которая зажимается в подвижном гидравлическом захвате 7 установки.

Практическая реализация схемы нагружения, показанной на рис.1 происходит следующим образом. При перемещении вверх нижнего захвата 7 пластина 8, зажатая в верхнем (неподвижном) гидрозахвате 9 установки передаёт усилие на верхнюю балочку 4, которая, смещаясь вниз по боковым направляющим 3, передаёт усилия на образец 1 через валики расположенные в валикодержателях 5.

Перемещение образца 1 в горизонтальном направлении изменяет величину изгибающего момента и поперечной силы в плоскости трещины, что и вызывает изменение соотношения  $K_I/K_{II}$ .

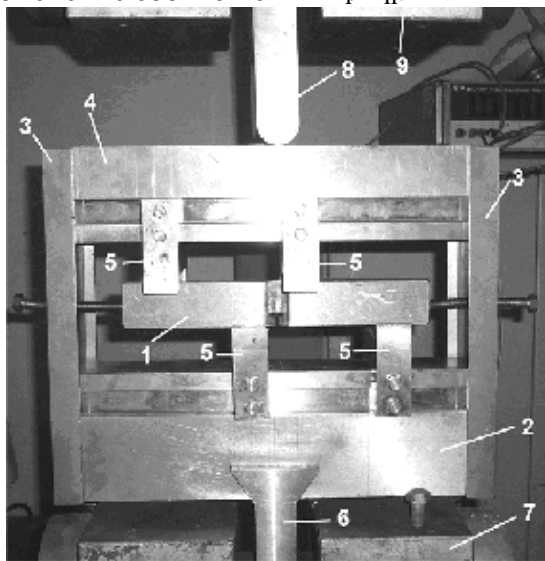


Рис.1. Приспособление для нагружения образца на несимметричный четырёхточечный изгиб.

На рис. 2 представлены фотографии изломов образцов из сталей 15X2НМФА (КП60), 15X2НМФА (КП100) испытанных при нагружении по моде II. Из представленных данных видно, что в стали 15X2НМФА (КП60) в исходном состоянии трещина развивалась автономно и угол отклонения от начальной трещины был незначительный и составлял  $14^\circ$ . Аналогичный характер разрушения наблюдался и для стали 15X2МФА(I). Для стали 15X2НМФА (II) охрупченной термообработкой, которая имитирует радиационное охрупчивание в процессе эксплуатации, угол отклонения был около  $62^\circ$ , что близко к величине угла  $70^\circ$ , который прогнозируется по критерию обобщённого нормального отрыва. Это говорит о том, что критерий обобщённого нормального отрыва, критерий минимальной плотности энергии деформации (критерий Си) и др. критерии, разработанные на основе линейно-упругой механики разрушения не дают адекватного прогноза по углу отклонения трещины от начальной при нагружении чистым поперечным сдвигом (мода II) для вязких материалов.

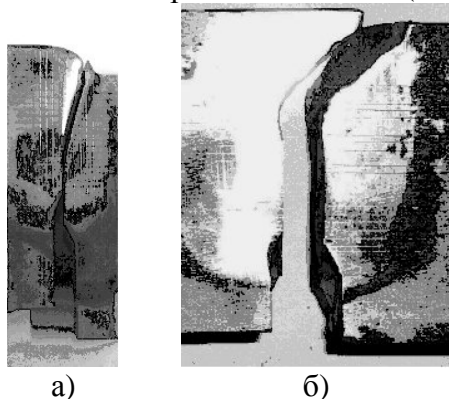


Рис. 2. Фотографии изломов образцов при нагружении на четырёх точечный изгиб (мода II): а – 15X2НМФА (КП60), б - 15X2НМФА (КП100).

Значения вязкости разрушения исследованных сталей представлены в табл. 1. Из приведенных данных видно, что нагружение по II моде приводит к снижению вязкости разрушения в среднем на 30% во всех рассмотренных случаях и как следствие к снижению до 2 раз критических длин трещин в исследованных образцах (рис. 3).

Таблица 1. Характеристики статической трещиностойкости.

Характеристики статической трещиностойкости	Стали		
	15X2НМФА (КП60)	15X2НМФА (КП100)	15X2МФА (КП60)
Мода I $K_{Ic}, \text{МПа} \sqrt{\text{м}}$	110	120	90
Мода II $K_{IIc}, \text{МПа} \sqrt{\text{м}}$	74	96	64,8

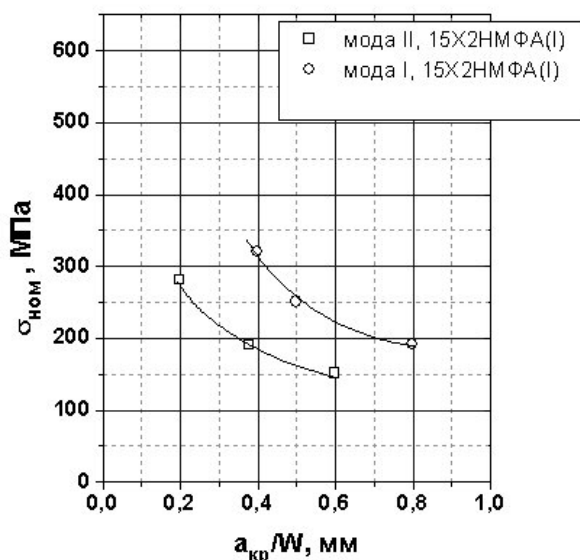


Рис.3. Зависимость относительной критической длины трещины от величины приложенных номинальных напряжений при различных схемах нагружения.

На рис.4 представлены экспериментальные диаграммы предельных состояний исследуемых теплоустойчивых сталей, ограничивающие область безопасных значений  $K_I$  и  $K_{II}$ , а также расчётная диаграмма по критерию обобщённого нормального отрыва. Показано, что по мере увеличения составляющей поперечного сдвига, отношение  $K_{II}/K_{Ic}$  всё больше отклоняется от критерия обобщённого нормального отрыва. Причём такая закономерность более ярко выражена для стали 15X2НМФА (КП60) в исходном состоянии, чем для стали 15X2НМФА (КП100) в охрупченном состоянии. Полученные данные описываются эмпирическим уравнением вида:

$$(K_I/K_{Ic})^a + (c \cdot K_{II}/K_{Ic})^b = 1, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – постоянные, определяемые из условия наилучшего соответствия эксперименту.

Другим важным видом смешанного нагружения является многоосное нагружение, в частности двухосное. Особенно это характерно для дисков ГТД, чье напряженно-деформированное состояние определяется наличием радиальных и тангенциальных напряжений по радиусу диска.

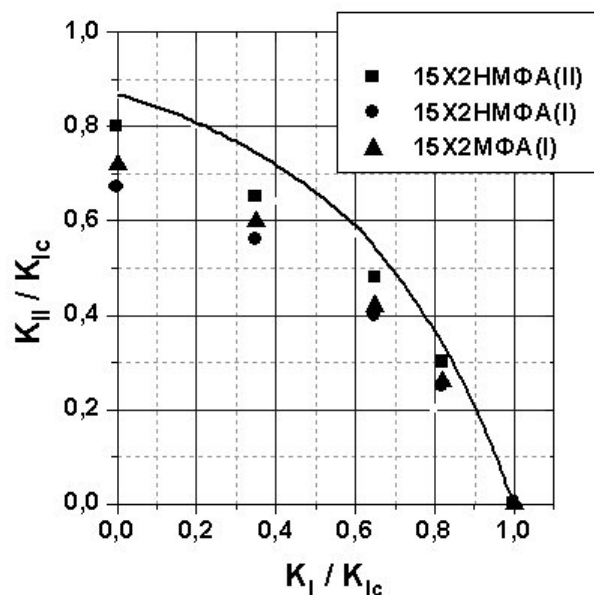


Рис.4. Диаграмма предельных состояний по критерию обобщённого нормального отрыва (сплошная линия) и экспериментально установленные зависимости между  $K_I/K_{Ic}$  и  $K_{II}/K_{Ic}$  (точки).

Проблема оценки долговечности дисков ГТД является сложной ввиду того, что весьма затруднителен учет геометрии изделия, которое содержит различные конструктивные и технологические концентраторы: отверстия, выточки, галтели и т.п.

Опыт эксплуатации ГТД показывает, что не смотря на выполнение всех нормативных требований при проектировании, изготовлении, доводке и эксплуатации более 70% разрушения и отказов двигателя связаны с усталостным разрушением, то есть с появлением и развитием трещины.

Анализ напряженно-деформированного состояния реальных дисков показал, что отношение главных напряжений в диске может меняться в пределах от -0,5 до 1.

При решении задач механики материалов (концентрация напряжений при плоском напряженном состоянии, малые упруго-пластические деформации и т.п.) рекомендовано использовать образцы в виде прямоугольника [4], имеющие по сторонам хвостовики с прорезями для приложения нагружающих усилий (рис.5).

По рекомендациям работы [5] размер рабочей части образца выбирается из условия того, чтобы длина трещины  $2l$ , размер рабочего поля  $H$  и свойства материала находились в зависимости

$$\frac{9}{\pi} \left( \frac{K_c}{\sigma_{0,2}} \right) \leq 2l \leq \frac{1}{3} H, \quad (2)$$

$$4,3 \left( \frac{K_c}{\sigma_{0,2}} \right)^2 < H.$$

Для моделирования влияния концентратора на распространения трещины в рабочем поле образца сделано отверстие ( $d = 16$  мм). Для инициирования зарождения трещин в концентратора сделано два диаметрально расположенных пропила, длиной 2 мм и шириной 0,2 мм.

Для определения размеров поля однородных напряжений при заданной степени двухосности были проведены расчеты с использованием стандартных программ (ANSYS версия 7.0). На рис. 6 показаны некоторые результаты этих расчетов.

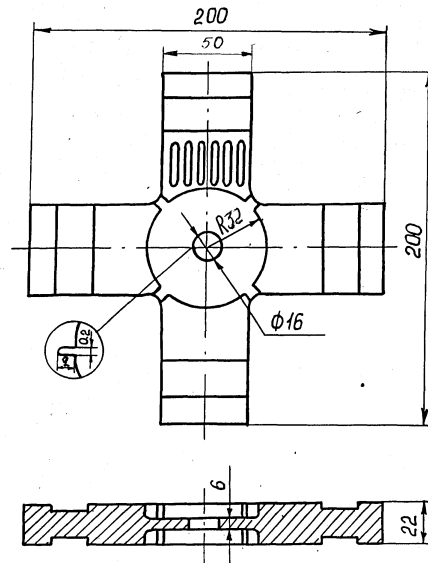


Рис. 5. Крестообразный образец из сплава ЭП742.

Из-за особенностей формы и размеров образца напряжения в его рабочей части определялись по формулам

$$\sigma_1 = \alpha \cdot \sigma_y + \beta \cdot \sigma_x, \quad \sigma_2 = \beta \cdot \sigma_y + \alpha \cdot \sigma_x \quad (3)$$

$$\lambda = \sigma_2 / \sigma_1,$$

где  $\sigma_1$  – напряжения перпендикулярные плоскости трещины

$\sigma_2$  - напряжения вдоль плоскости трещины

$\sigma_x$  и  $\sigma_y$  - напряжения прикладываемые вдоль оси x и y соответственно

$\lambda$  - показатель двухосности

$\alpha = 0,97$ ,  $\beta = -0,169$  – тарировочные коэффициенты, учитывающие особенности образца.

Все вышеизложенное послужило обоснованием возможности проведения расчетной оценки К-тарировки крестообразного образца с трещиной при различных значениях показателя двухосности  $\lambda$ .

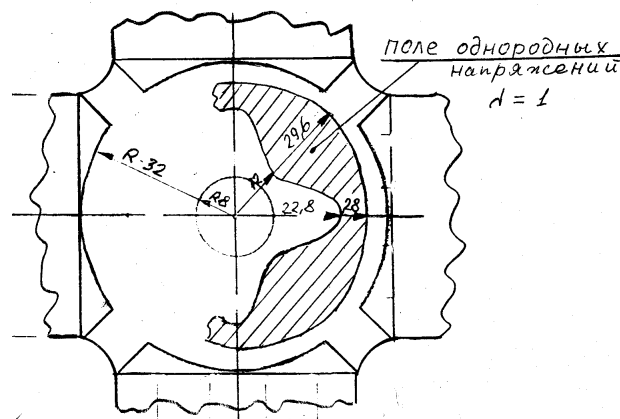


Рис. 6. Расположение поля однородных напряжений при  $\lambda=1$  на рабочей площадке образца.

На рис. 7 представлены результаты расчетов тарировочной функции  $F$  для крестообразного образца при различных значениях показателя двухосности  $\lambda$  от относительной длины трещины  $2a/W$ .

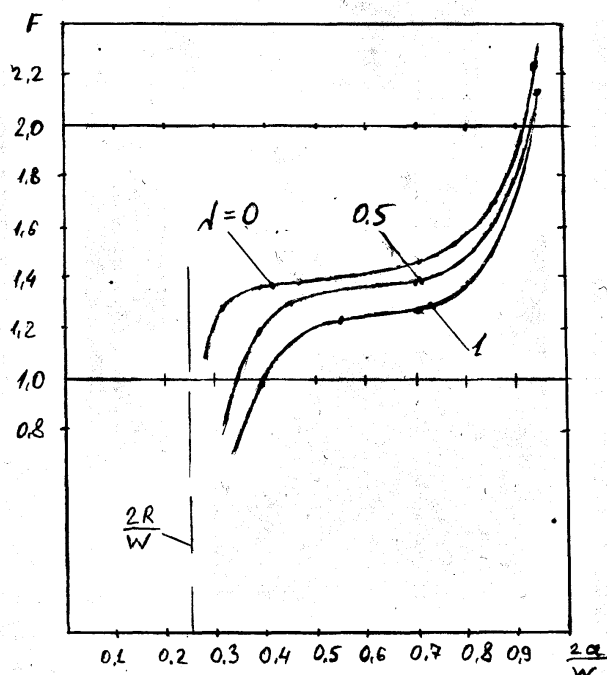


Рис. 7. Зависимость значений тарировочных коэффициентов крестообразного образца от длины трещины.

Для исследований влияния степени двухосного нагружения на закономерности роста трещин был выбран сплав ЭП 742, используемый при изготовлении дисков турбины и компрессора ГТД.

При исследовании кинетики трещин в крестообразных образцах предварительно из концентратора выращивалась начальная трещина таких размеров, чтобы она прорастала на всю толщину рабочей части образца, т.е. 6 мм. Таким образом начальная длина трещины принималась примерно (16-18) мм.

Сравнивая результаты исследования СРТ, приведенные на рис. 8, мы видим, что результаты хорошо согласуются с полученными данными как на СТ образцах, так и на крестообразных образцах (рис.5) при одноосном и двухосном нагружении (при  $\lambda = 0$ ; 0.5; 1). На диаграммах не наблюдается расслоения по СРТ в зависимости от значений  $\lambda$ , это говорит о том, что тарировочные зависимости (см. рис.7) рассчитанные МКЭ для крестообразного образца выполнены верно. Расчеты проводились в упругой постановке и при экспериментальных исследованиях выдерживались требования стандарта, чтобы размер пластической зоны в вершине трещины, равной

$$r^* = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{\sigma_T} \right)^2 \quad (4)$$

был меньше длины трещины и оставшейся живой части образца в десять и более раз.

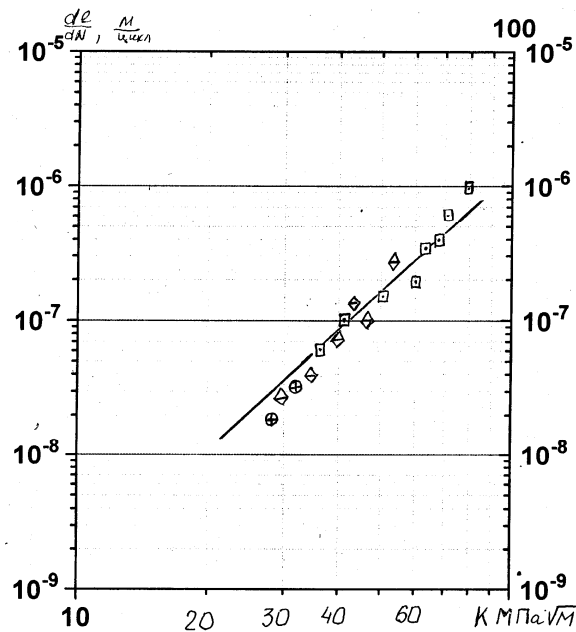


Рис. 8. Экспериментальные данные по СРТ сплава ЭП 742 при температуре 293 К при циклическом нагружении: --- результаты полученные на СТ-образцах;  $\diamond$  - при  $\lambda = 0,5$ , образец № 4;  $\circ$  -  $\lambda = 1$ , № 6;  $\square$  -  $\lambda = 1$ , № 3.

### Литература

1. Laukkanen A. Analysis of experimental factors in elastic-plastic small specimen mixed-mode I-II fracture mechanical testing // *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* – 2001. – 24. – P.193-206.
2. Ярема С.Я., Иваницкая Г.С. Предельное равновесие и развитие косых трещин. Обзор критериев // *Физ.-хим. механика материалов.* – 1986. - №1. – С.45-57.
3. Gao Hua, Brown M.W. and Miller K.J. Mixed-mode fatigue thresholds // *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* – 1982. – 5. – P.1-17.
4. Monch E., Galster D. A method for producing a defined uniform biaxial tensile stress field // *Brit. J. Appl. Phys.* - 1963. - 14, N11. – P.810-812.
5. Feddersen C. // *ASTM STP 486.* – 1971. – P.50.