

УДК 620.165.79

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-40-44

А.В. Гриневи<sup>1</sup>, В.С. Ерасов<sup>1</sup>, В.В. Автаев<sup>1</sup>, С.М. Шве<sup>1</sup>**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ  
ЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Рассматривается проблема определения вязкости разрушения листовых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Основной проблемой при оценке вязкости разрушения является неопределенность критической длины трещины, при которой происходит лавинообразное разрушение образца. Разработанные ранее методы по исследованию критической длины трещины, при котором происходит разрушение образца под действием запаса упругой энергии, накопленной в системе, крайне сложны или требуют обязательной предварительной тарировки. Сложность определения критической длины трещины вынуждает исследователей опираться на исходную длину трещины для определения коэффициента интенсивности напряжений и получения условного значения вязкости разрушения. Предложен метод испытаний на вязкость разрушения, обеспечивающий фиксацию длины трещины непосредственно перед разрушением, что позволяет с высокой степенью корректности определить критический коэффициент интенсивности напряжений для данной толщины полуфабриката.

**Ключевые слова:** вязкость разрушения, критическая длина трещины, плосконапряженное состояние.

The problem of fracture toughness of sheet semies from aluminum alloys definition is considered. The main problem when evaluating a fracture toughness is an impossibility to define the critical length of crack, when avalanche-like specimen destruction occurs. The developed earlier methods on study of the critical length of crack, when the specimen destruction occurs under the influence of accumulated elastic energy in the system are extremely complicated or require obligatory prior taring. As it is very difficult to define the critical length of crack, researchers are enforced to take the initial length of crack as the base for determination of stress intensity factor and some conditional value of fracture toughness.

**Keywords:** fracture toughness, critical crack length, plane-stress condition.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Современные методы установления и продления ресурса авиационной техники в значительной мере основаны на знании характеристик материала, отражающих его способность сопротивляться появлению усталостных трещин при малоцикло-вой усталости (МЦУ) и развитию трещины (вязкость разрушения). Создание новых материалов и технологий их получения, наряду с повышением требований к надежности и экономической эффективности современной авиационной техники [1–7], требует также разработки новых средств и методов прогнозирования усталостного разрушения и более надежных способов определения критической длины трещины, при которой происходит лавинный рост трещины и последующее разрушение конструкции [8, 9].

Механика разрушения рассматривает процесс разрушения как кинетический, состоящий из стадии зарождения дефекта, его медленного роста и последующего лавинного разрушения тела и развития трещины под действием упругой энергии, накопленной в системе [10–13]. Коэффициент интенсивности напряжения ( $K_c$  или  $K_c^y$ ) определя-

ется как нагрузка, умноженная на корень квадратный из длины трещины и некоторый коэффициент, отвечающий форме исследуемого тела. Стандартные методы оценки вязкости разрушения опираются на испытания различного типа образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной. Для испытания листовых материалов используют: плоский прямоугольный образец с центральной трещиной для испытаний на осевое растяжение; цилиндрический образец с кольцевой трещиной для испытаний на осевое растяжение; прямоугольный компактный образец с краевой трещиной для испытаний на внецентренное растяжение; плоский прямоугольный образец с краевой трещиной для испытаний на трехточечный изгиб. Для тонких листовых полуфабрикатов используется первый тип образца с центральной трещиной.

Для определения критической длины трещины, которая имеет место в связи с ее подрастанием при нагружении, ранее были разработаны несколько методов Б.А. Дроздовским, В.М. Марковым и Я.Б. Фридманом [14]. Определение длины трещины осуществлялось следящей системой на базе перемещающегося датчика вихревых то-

ков, «отслеживающего» движение вершины развивающейся трещины [15]. Считалось, что при лавинном росте трещины система не успевала отслеживать данную скорость и, следовательно, зафиксированное значение определяло критическую длину трещины. Данный метод не получил практического применения. Предложен также метод, основанный на измерении электросопротивления, при котором измеряется разность потенциалов между двумя точками, расположенными по обе стороны от трещины [16] либо с одной стороны от трещины [17]. Если в образце, по которому протекает ток, развивается трещина, то разность потенциалов увеличивается при условии неизменности силы тока. Данный метод требует использования тарифовочных кривых и тем самым затрудняет практическое его использование. Другой способ базируется на исследовании раскрытия трещины [18]. В этом случае длина трещины может быть определена по раскрытию, что, как и для многих других методов [19–21], также требует соответствующей тарировки. В связи с этим возникает вопрос определения, при хорошей метрологии, реального подрастания длины трещины. С этой целью разработана следующая методика исследования.

#### Материалы и методы

Для исследования использовали широко применяемые в авиастроении материалы – алюминиевые сплавы 1163-Т и В95п.ч.-Т2 [22, 23] в виде листовых полуфабрикатов толщиной 1,4 и 2,3 мм соответственно. Для оценки критической длины трещины проводится испытание непосредственно двух образцов, которые располагаются последовательно и соединяются между собой специальными приспособлениями, сохраняющими силовую цепочку нагружения, с возможным введением шарнира для ликвидации возможного изгибающего момента. В данных испытаниях образцы размером 100×300 мм строго выверяли по оси нагружения, а затем просверливали отверстия для крепления.

Из предварительно созданного надреза (отдельно на каждом образце) выращивали усталостные трещины на резонансной машине 100NFP 5100 фирмы Zwick Amsler в соответствии с ГОСТ 25.506 [24, 25]. Длина усталостной трещины составляла ~0,3 от ширины образца и была одинаковой на обоих образцах. Схема испытаний образцов на усталостной машине MTS 810 представлена на рис. 1. При нагружении, которое осуществлялось в одном случае по перемещению, в другом – по нагрузке, фиксировали соответственно нагрузку и перемещение по времени. Данную систему, состоящую из двух образцов, доводили до разрушения одного из них. При этом на другом образце фиксировали величину прироста усталостной трещины, которая и является реальной длиной трещины, предшествующей разрушению материала, что позволяет определить кри-

тическую длину трещины. После исследования первого разрушенного образца проводили разрушение второго образца и сравнивали характеристики вязкости разрушения и характер разрушения.

#### Результаты

В результате испытаний двух пар образцов (1, 1' и 2, 2' – табл. 1) из сплава В95п.ч.-Т2 при нагружении со скоростью 0,1 мм/мин образцов 1 и 1' зафиксировано образование пластической деформации под углом ~60 град к плоскости развития трещины (рис. 2, а).

Оценка вязкости разрушения (определение коэффициентов  $K_c$  или  $K_c^y$ ) и величина разрушающей нагрузки представлены в табл. 1. При наличии существенной пластической деформации визуально разрушения на втором образце 1' не обнаружено. На первом образце 1 в зоне пластической деформации отмечается различие микрорельефа в зоне предварительной пластической деформации в устье трещины и в зоне последующего быстрого ее развития (см. рис. 2, б).

Для объективной оценки подрастания трещины второй в тандеме образец, который не разрушился, нагружали до значений 0,3–0,5 от разрушающей нагрузки и в устье раскрывшейся трещины вводили контрастную жидкость (рис. 3). Затем образец в ненагруженном состоянии высушивали и подвергали разрушению для определения вязкости разрушения. Данная методика позволила определить реальное подрастание трещины, которое не фиксировалось визуально.

В результате испытаний двух пар образцов из сплава 1163-Т при нагружении со скоростью 0,1 мм/мин также зафиксировано образование пластической деформации под углом ~60 град к плоскости развития трещины (см. рис. 2, в). Оценка вязкости разрушения (определение коэффициентов  $K_c$  или  $K_c^y$ ) и величина разрушающей нагрузки представлены в табл. 2. При наличии существенной пластической деформации визуального разрушения (подрастания трещины) на втором образце 1' не обнаружено. На первом образце 1 в зоне пластической деформации отмечается различие микрорельефа в зоне предварительной пластической деформации в устье трещины и в зоне последующего быстрого ее развития (см. рис. 2, г). При нагружении со скоростью 0,1 мм/мин в процессе развития трещины зафиксировано падение нагрузки (рис. 4, а), в то время как при нагружении со скоростью 20 Н/с данного падения не зафиксировано (см. рис. 4, б). Характер микрорельефа поверхности разрушения образцов 2 и 2' идентичен характеру микрорельефа поверхности при разрушении образцов, нагруженных со скоростью 0,1 мм/мин.

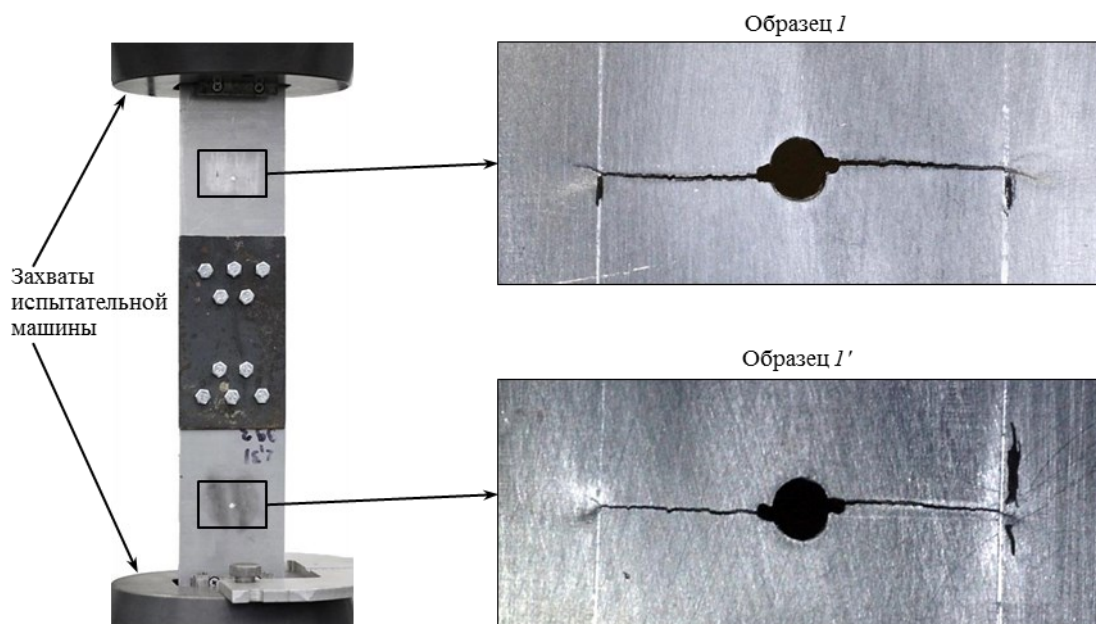


Рис. 1. Схема установки образцов на испытательной машине MTS 810

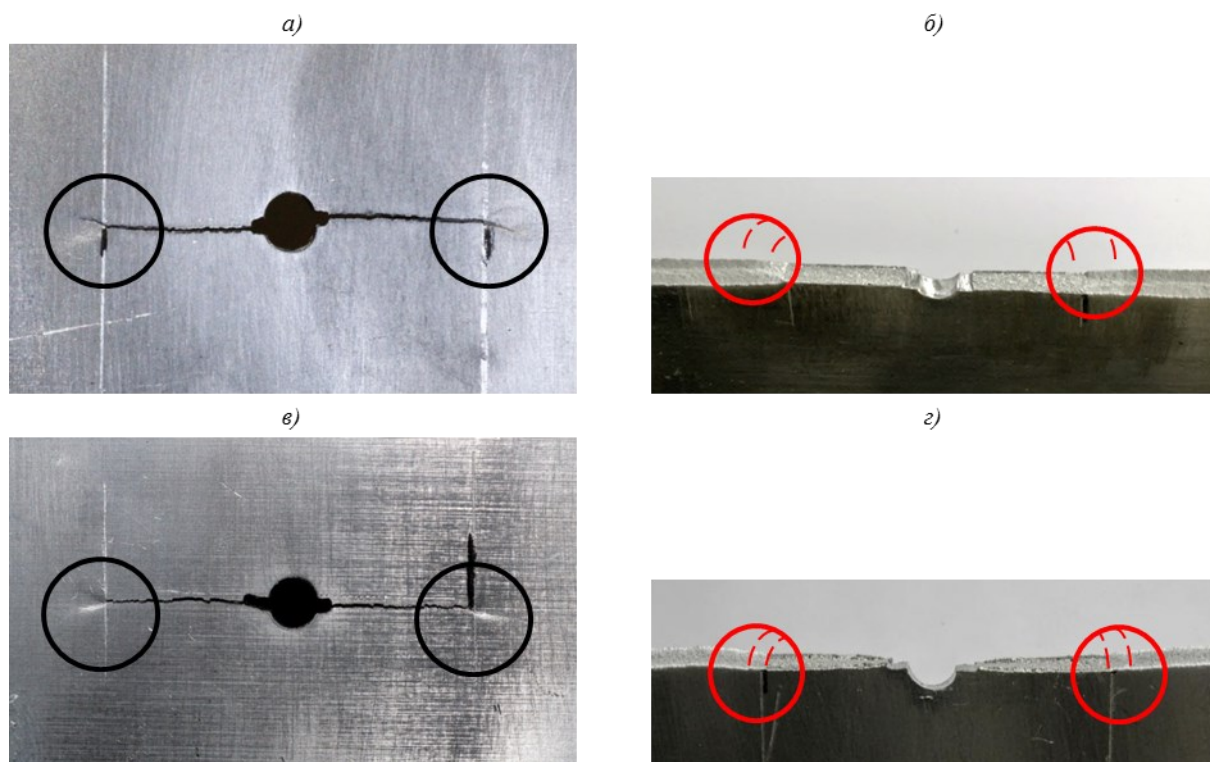


Рис. 2. Пластическая деформация в вершинах трещины (а, в) и поверхность разрушения (б, г) образцов I (см. табл. 1 и 2) из сплавов В95п.ч.-Т2 (а, б) и 1163-Т (в, г)



Рис. 3. Вид образца с введенной в излом контрастной жидкостью

Таблица 1

Результаты испытаний образцов из сплава В95п.ч.-Т2

Условия нагружения	Условный номер образца	Размер образца, мм		Длина трещины, мм		Максимальная нагрузка, кН	$K_c^y$	$K_c$
		ширина	толщина	начальная	конечная			
Скорость перемещения поршня 0,1 мм/мин	1	98,69	2,31	29,33	—	60,4	60,2	—
	1'	99,30	2,31	29,29	30,70	59,6	58,7	60,6
Скорость силового нагружения: 100 Н/с до нагрузки 50 кН+20 Н/с до разрушения	2	98,71	2,30	27,73	—	64,2	62,2	—
	2'	98,90	2,31	27,93	33,51	64,0	62,1	69,4

Таблица 2

Результаты испытаний образцов из сплава 1163-Т

Условия нагружения	Условный номер образца	Размер образца, мм		Длина трещины, мм		Максимальная нагрузка, кН	$K_c^y$	$K_c$
		ширина	толщина	начальная	конечная			
Скорость перемещения поршня 0,1 мм/мин	1	98,20	1,42	26,67	—	33,3	51,5	—
	1'	98,10	1,42	26,12	29,01	33,5	51,2	54,3
Скорость силового нагружения: 100 Н/с до нагрузки 50 кН+20 Н/с до разрушения	2	98,27	1,42	27,90	—	32,4	51,2	—
	2'	98,10	1,41	28,01	30,5	32,5	51,9	54,6

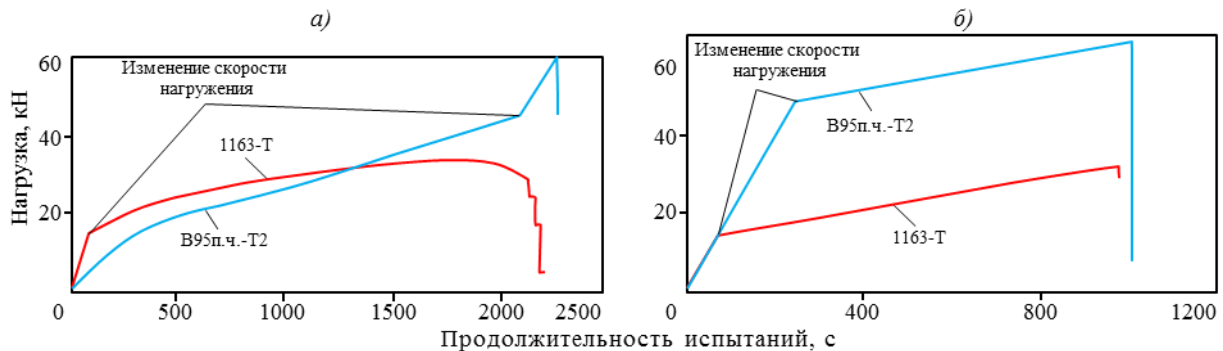


Рис. 4. Зависимость приложенной нагрузки от продолжительности испытаний образцов из сплавов В95п.ч.-Т2 и 1163-Т с управлением по перемещению при скорости нагружения 0,1 мм/мин (а) и управлением по нагрузке при скорости нагружения 20 Н/с (б)

Обсуждение и заключения

Результаты показали, что при испытании с управлением по нагрузке имеет место постоянно возрастающая нагрузка до момента разрушения материала, в то время как при нагружении с заданной скоростью траверсы (нагружение по перемещению) для образца из сплава 1163-Т происходит сброс нагрузки при развитии трещины. Данный фактор зафиксирован только для образца из сплава 1163-Т. Образец из сплава В95п.ч.-Т2 отличается более хрупким характером разрушения.

При хорошей сходимости результатов определения значений условных коэффициентов интенсивности напряжений для образцов из сплавов 1163-Т и В95п.ч.-Т2, эти значения определяются без учета подрастания трещины.

Предложенный метод оценки вязкости разрушения позволяет определить критическую длину трещины и на основании этого – критический коэффициент интенсивности напряжений при плосконапряженном состоянии  $K_c$ . С помощью предлагаемой методики в рамках механики разру-

шения можно определить истинное сопротивление развитию трещин, описываемое  $R$ -кривой. В этом случае корректно определяются физиче-

ская длина трещины и величина пластической зоны в ее вершине.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
3. Каблов Е.Н., Шевченко Ю.Н., Гриневиц А.В., Кочанов Д.И. Проблемы паспортизации авиационных материалов на современном этапе /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ. 2007. С. 388–396.
4. Ерасов В.С., Гриневиц А.В., Сенюк В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
5. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
6. Зотов А.А. Расчет самолета на прочность. Внешние нагрузки, конструктивно-силовые схемы. Конструкционные материалы: Учеб. пособие. 2-е изд. М.: Вузовская книга. 2014. 64 с.
7. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И., Коваль Ю.Н. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. К.: Наукова думка. 1992.
8. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневиц А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 6 (viam-works.ru).
9. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Почивалов Ю.И., Панин С.В., Колобнев Н.И. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминийлитиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность. Повышение пластичности и технологических характеристик //Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. №6. С. 107–111.
10. Кишкина С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1981. 280 с.
11. Миллер К.Ж. Усталость металлов – прошлое, настоящее и будущее //Заводская лаборатория. 1993. №3. С. 31–44.
12. Ерасов В.С., Рудаков А.Г., Нужный Г.А., Гриневиц А.В., Терехин А.Л. Образование магистральной трещины в процессе испытания на усталость /В сб. докладов конф. «Фундаментальные исследования в области защиты от коррозии, старения, биоповреждений материалов и конструкций в различных климатических условиях и природных средах с целью обеспечения безопасной эксплуатации сложных технических систем». М.: ВИАМ. 2013 (CD-диск).
13. Маркочев В.М. О двухкритериальном подходе в механике разрушения //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. №3. С. 56–59.
14. Дроздовский Б.А., Маркочев В.М., Фридман Я.Б. Установка для автоматической записи роста длины трещины электроиндуктивным методом //Заводская лаборатория. 1966. №7. С. 859–863.
15. Микляев П.Г., Нешпор Г.С., Кудряшов В.Г. Кинетика разрушения. М.: Металлургия. 1979. 279 с.
16. Прикладные вопросы вязкости разрушения: Пер. с англ. М.: Мир. 1968. 552 с.
17. Маркочев В.М., Гольцев В.Ю., Бобринский А.П. Изучение кинетики развития трещины при статическом нагружении //Заводская лаборатория. 1971. №5. С. 598–600.
18. Браун У. Дж. Сроули. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации: Пер. с англ. М.: Мир. 1972. 246 с.
19. Иванов В.М., Печагин Е.А., Винокуров Е.Б., Желтов А.И. Вязкость разрушения и фрактальная характеристика муаровых узоров на магнитном поле проводников с трещиной //Вестник Тамбовского университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. Т. 15. №3-1п. С. 1048–1049.
20. Бакиров М.Б., Морозов Е.М., Белуник И.А., Крутько Е.С. Определение вязкости разрушения корпусной стали методом кинетического индентирования //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. №2. С. 44–49.
21. Бахрачева Ю.С. Оценка вязкости разрушения сталей по результатам контактного деформирования //Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 10 «Инновационная деятельность». 2012. №7. С. 53–56.
22. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
23. Швечков Е.И., Сыров А.В., Лебедев Г.Д., Ростова Т.Д., Азанова Е.В., Боровков О.В. Механические свойства и характеристики трещиностойкости крупногабаритного профиля из сплава 1163-T //Технология легких сплавов. 2013. №3. С. 51–58.
24. ГОСТ 25.506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
25. Беляев М.С., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов //Труды ВИАМ. 2014. №9. Ст. 11 (viam-works.ru).