

УДК 669.017: 548.73

## ПЛАСТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КРУПНОЗЕРНИСТЫХ И УМЗ МАТЕРИАЛОВ С ОЦК И ГЦК РЕШЕТКОЙ

© 2017 Г.В. Клевцов<sup>1</sup>, Н.А. Клевцова<sup>1</sup>, Р.З. Валиев<sup>2</sup>, И.Н. Пигалева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тольяттинский государственный университет

<sup>2</sup>НИИ физики перспективных материалов

Уфимского государственного авиационного технического университета

Статья поступила в редакцию 30.05.2017

В статье показано, что при испытании материалов с крупнозернистой (КЗ) и ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой на статическую трещиностойкость ( $K_{IC}$ ) в условиях плоской деформации (ПД), необходимо учитывать тип кристаллической решетки.

*Ключевые слова:* трещиностойкость материалов, глубина пластической зоны под поверхностью изломов, локальное напряженное состояние, наноструктурированные материалы с УМЗ структурой.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-48-02119 р\_поволжье\_а).*

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка локального напряженного состояния материала у вершины трещины имеет принципиальное значение, например, при испытании материалов на статическую трещиностойкость ( $K_{IC}$ ), при диагностики причин разрушения конструкций и деталей машин, а также в ряде других случаев. Согласно положению механики разрушения, наиболее объективную информацию о локальном напряженном состоянии материала в момент разрушения дает анализ размеров и формы пластических зон, образующихся у вершины трещины. В работах [1, 2] предложен количественный критерий оценки локального напряженного состояния материала как отношение максимальной глубины пластической зоны под поверхностью изломов  $h_{max}$  к толщине образца или детали  $t$ , то есть  $h_{max}/t$ . При разрушении материалов в условиях плоской деформации (ПД) отношение  $h_{max}/t < 10^{-2}$ ; в условиях плоского напряженного состояния (ПН) – отношение  $h_{max}/t > 10^{-1}$ ; в переходной области от ПД к ПН, отношение  $10^{-2} < h_{max}/t < 10^{-1}$ . Однако остается открытым вопрос о возможности использования критерия  $h_{max}/t$  при исследова-

нии наноструктурированных материалов с УМЗ структурой.

Целью настоящей работы является установление связи критерия локального напряженного состояния материала  $h_{max}/t$  с критериями механики разрушения для крупнозернистых (КЗ) и ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов с ОЦК и ГЦК решеткой.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве наноструктурированных УМЗ материалов с ОЦК решеткой использовали углеродистые сталь 10 (0,11 % С) и сталь 45 (0,45 % С); в качестве материала с ГЦК решеткой – аустенитную сталь AISI 321 (0,06 % С; 1,2 % Мn; 17,5 % Cr; 9,4 % Ni; 0,48 % Ti) и алюминиевый термически упрочняемый сплав АК4-1 (2,48 % Cu; 0,21 % Si; 1,47 % Mg; 1,16 % Fe; 1,06 % Ni; 0,057 % Mn; 0,082 % Cr; 0,056 % Ti).

УМЗ состояние стали 10 было получено путем равноканального углового прессования (РКУП) при температуре 200 °С, количество проходов  $n=4$ , с поворотом образца вокруг оси на 90° (маршрут Вс). Угол пересечения каналов инструмента составлял  $\phi = 120^\circ$ . Средний размер зерна стали 10 в УМЗ состоянии составил  $d_{cp.} = 300$  нм. Сталь 45 с КЗ структурой исследовали в исходном состоянии (после закалки + высокого отпуска при 550 °С) ( $d_{cp.} = 10$  мкм). УМЗ состояние стали было получено путем РКУП по режиму: закалка + РКУП при 350 °С,  $n=6$ ,  $\phi = 120^\circ$  ( $d_{cp.} = 560$  нм). Аустенитную сталь AISI 321 исследовали как в исходном (горячекатанном) состоянии, так и после РКУП при 20 °С,  $n=4$ , маршрут Вс,  $\phi = 120^\circ$  ( $d_{cp.} = 300$  нм). Алюминиевый сплав АК4-1 исследовали в двух состояниях: в исходном состоянии (после

*Клевцов Геннадий Всеволодович, доктор технических наук, профессор кафедры нанотехнологий, материаловедения и механики (НМиМ) ТГУ.*

*E-mail: klevtsov11948@mail.ru*

*Клевцова Наталья Артуровна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры НМиМ ТГУ.*

*E-mail: inshtet@mail.ru*

*Валиев Руслан Zufарович, доктор физико-математических наук, профессор, директор.*

*E-mail: RZValiev@mail.rb.ru*

*Пигалева Ирина Николаевна, аспирант НМиМ ТГУ.*

*E-mail: irina1.985@mail.ru*

стандартной обработки Т6 (закалка + старение) и после РКУП. Стандартная обработка (Т6) включала в себя нагрев до температуры 530 °С, закалку в воде и старение при температуре 190 °С в течение 7 часов, охлаждение на воздухе. Для получения УМЗ структуры сплав подвергали РКУП при температуре 160 °С, n=6, φ=90° (d<sub>ср.</sub> = 300 нм).

Для оценки трещиностойкости материала образцы испытывали на машине Instron 8802, согласно ГОСТ 25.506-85. Исследование микрорельефа изломов проводили в растровом электронном микроскопе SIGMA фирмы «ZEISS». Количество и глубину пластических зон под поверхностью изломов определяли рентгеновским методом [1, 2]. Съемку поверхности изломов проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0 в Fe и Co Kα излучении.

**ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

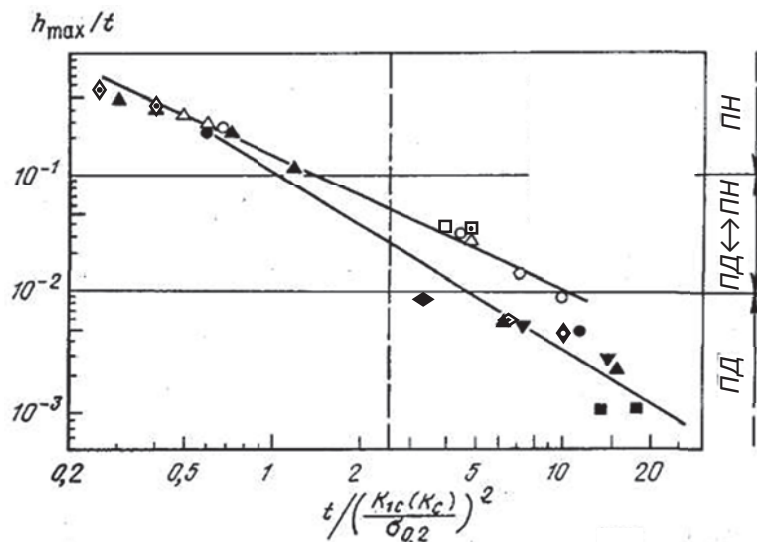
Результаты механических испытаний на K<sub>1C</sub> показали (табл. 1), что РКУП по вышеуказанным режимам незначительно и неоднозначно влияет на трещиностойкость материалов. Причем, критерий  $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 2,5$  во всех случаях, кроме стали AISI 321, удовлетворяет условию ПД. Од-

нако критерий  $h_{max}/t$ , как видно из таблицы 1, не удовлетворяет условию ПД и в случае сплава АК4-1. Чтобы объяснить это, сравним для широкого класса материалов с КЗ и УМЗ структурой предложенный критерий реализации условия ПД  $h_{max}/t < 10^{-2}$  с известным критерием механики разрушения  $t/(K/\sigma_{0,2})^2 \geq 2,5$  (рис. 1).

Из приведенного рисунка видно, что критерий механики разрушения  $t/(K/\sigma_{0,2})^2 \geq 2,5$ , используемый для оценки условия ПД (на графике отмечен пунктирной линией), является менее жестким, чем предложенный критерий  $h_{max}/t < 10^{-2}$  и соответствует средней части переходной области от ПД к ПН. Критерий оценки локального напряженного состояния материала  $h_{max}/t$ , основанный на анализе глубины пластических зон под поверхностью изломов, даёт возможность уточнить известный критерий механики разрушения  $t/(K/\sigma_{0,2})^2 \geq 2,5$ . Из рис. 1 также можно сделать вывод, что при определении условий плоской деформации (ПД) необходимо учитывать тип кристаллической решетки материала. Для материалов с ОЦК решеткой условия ПД можно записать в виде:  $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 5$ , а для материалов с ГЦК решеткой – в виде:  $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 10$ .

**Таблица 1.** Трещиностойкость (K<sub>1C</sub>, K<sub>C</sub>) исследуемых материалов и отношение  $h_{max}/t$

Материал	K <sub>1C</sub> (K <sub>C</sub> ), МПа√м			
	Исходное состояние (КЗ)	$h_{max}/t$	После РКУП (УМЗ)	$h_{max}/t$
Сталь 10	28	-	31,0	$5,00 \cdot 10^{-3}$
Сталь 45	69	$8,50 \cdot 10^{-3}$	53	$6,00 \cdot 10^{-3}$
Сталь AISI 321	99,8	$5,65 \cdot 10^{-1}$	106,4	$4,17 \cdot 10^{-1}$
Сплав АК4-1	27,5	$4,00 \cdot 10^{-2}$	25,0	$3,75 \cdot 10^{-2}$



**Рис. 1.** Экспериментально установленная связь критериев  $h_{max}/t$  и  $t/(K_{1C}(K_C)/\sigma_{0,2})^2$  для материалов с ОЦК решеткой (темные точки), ГЦК решеткой (светлые точки) при испытании на статическую трещиностойкость.

Пунктиром отмечен критерий  $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 2,5$ ,

согласно которому правая часть графика соответствует условию ПД;

1 – сталь 20; 2 – сталь 40; 3 – 15Х2МФА; 4 – сталь 15; 5 – сталь 10 (РКУП); 6 – сталь 45;

7 – сталь 45 (РКУП); 8 – Д16; 9 – 03Х13АГ19 [1], 10 – АК4-1; 11 – АК4-1 (РКУП); 12 – AISI 321 (РКУП)

## ВЫВОДЫ

Для оценки локального напряженного состояния у вершины трещины, как в крупнозернистых, так и в наноструктурированных материалах с ОЦК и ГЦК структурой может быть использован критерий  $h_{\max}/t$ , где  $h_{\max}$  – максимальная глубина пластической зоны под поверхностью излома;  $t$  – толщина образца или детали.

При испытании наноструктурированных материалов с УМЗ структурой на статическую трещиностойкость ( $K_{1C}$ ), оценку условия плоской деформации (ПД) по критерию механики разрушения  $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2$  необходимо проводить

с учетом типа кристаллической решетки материала. Для материалов с ОЦК решеткой условие ПД реализуется при  $t/(K_{1C}/\sigma_r)^2 \geq 5$ , а для материалов с ГЦК решеткой – при  $t/(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2 \geq 10$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСиС, 2007. 264 с.
2. Р 50-54-52/2-94. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение характеристик разрушения металлических материалов рентгеновским методом. М.: ВНИИНМАШ Госстандарта России. 1994. 28 с.

## PLASTIC ZONES AT THE CRACK TIP AS A CRITERIA EVALUATION OF LOCAL STRESS STATE IN THE DISTRUCTION OF COARSE-GRAINED AND UFG MATERIALS WITH BCC AND FCC LATTICE STRUCTURE

© 2017 G.V. Klevtsov<sup>1</sup>, N.A. Klevtsova<sup>1</sup>, R.Z. Valiev<sup>2</sup>, I.N. Pigaleva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Togliatti State University

<sup>2</sup> Research Institute of Physics of Advanced Materials  
of Ufa State Aviation Technical University

In this article it was shown under the test of materials with coarse-grained (CG) and ultra-fine grained (UFG) structure on static fracture toughness ( $K_{1C}$ ) in the plane strain (PD) condition, it is necessary to take into account the type of crystal lattice of the material.

*Keywords:* fracture toughness of materials, depth of plastic zone under the fracture surface, local stress state, nanostructured materials with UFG structure.

---

Ghennadiy Klevtsov, Doctor of Technics, Professor, Professor of Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics (NMSM) Department. E-mail: klevtsov11948@mail.ru

Natal'ya Klevtsova, Doctor of Technics, Associate Professor, Professor of NMSM Department. E-mail: inshtet@mail.ru

Ruslan Valiev, Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor, Head of Research Institute of Physics of Advanced Materials, USATU. E-mail: RZValiev@mail.ru

Irina Pigaleva, Postgraduate Student of NMSM.  
E-mail: irina1.985@mail.ru