

КИНЕТИКА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С УМЗ СТРУКТУРОЙ

Клевцов Г.В.¹, Валиев Р.З.², Семенова И.П.², Клевцова Н.А.¹, Ганеев А.В.²,
Линдеров М.Л.¹, Засыпкин С.В.¹

¹⁾ Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия,
Klevtsov11948@mail.ru

²⁾ НИИ Физики перспективных материалов УГАТУ, Уфа, Россия,
rzvaliev@outlook.com

Целью настоящей работы является изучение кинетики усталостного разрушения ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов с различным типом кристаллической решетки в сравнении с крупнозернистыми (КЗ) материалами.

В качестве исследуемых материалов использовали низколегированную трубную сталь 09Г2С, углеродистую сталь 45 (материалы с ОЦК решеткой), алюминиевый сплав АК4-1 (материал с ГЦК решеткой) и титановый сплав ВТ6 (материал с ГПУ решеткой).

Сталь 09Г2С исследовали в исходном (горячекатаном) состоянии и после РКУП. РКУП проводили по режиму: гомогенизирующий отжиг при 820 °С + закалка в воде + отпуск при 350 °С + РКУП при 350 °С (маршрут Вс, $n=4$, $\varphi = 120^\circ$) + дополнительный отжиг при 350 °С с выдержкой 10 мин. Сталь 45 исследовали после закалки + высокого отпуска (550 °С) и после РКУП по режиму: закалка от температуры 800 °С в воде + средний отпуск (350 °С) + РКУП при 350 °С (маршрут Вс, $n=6$, $\varphi = 120^\circ$). Алюминиевый сплав АК4-1 исследовали в состоянии Т6 (закалка + старение) и после РКУП при 160 °С (маршрут Вс, $n=2$, $\varphi = 90^\circ$). Титановый сплав ВТ6 исследовали в исходном (горячекатаном) состоянии и после РКУП по режиму: гомогенизирующий отжиг + закалка в воде от температуры 960 °С + отпуск при 675 °С в течение 4 часов + РКУП при 650 °С (маршрут Вс, $n=6$, $\varphi = 120^\circ$).

Структуру стали и сплавов в крупнозернистом (КЗ) состоянии исследовали в металлографическом микроскопе; тонкую структуру после РКУП – в просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEOLJEM 2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Испытания материалов на твердость проводили на твердомере ТН 300; статическое растяжение образцов со скоростью 5 мм/мин – на универсальной испытательной машине Н50КТ. Усталостные испытания призматических образцов толщиной 10 мм проводили при температуре 20 °С по схеме трехточечного изгиба на установке Instron 8802 при $\nu=10$ Гц, $R=0,1$ и различных значениях ΔP . Микрофрактографические исследования изломов проводили в растровом электронном микроскопе (РЭМ) SIGMA фирмы «ZEISS».

На рисунке 1 показана тонкая структура исследуемых материалов после РКУП; в таблице 1 – размер зерна и механические свойства данных материалов.

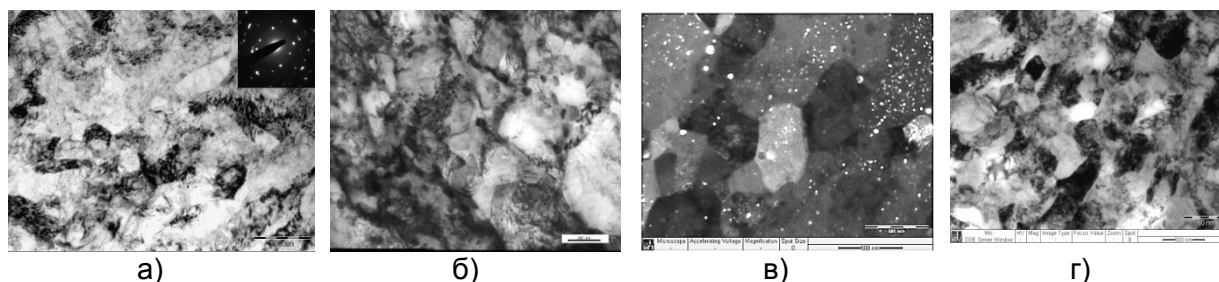


Рисунок 1 – Тонкая структура после РКУП стали 09Г2С (а), стали 45 (б), сплава АК4-1 (в) и сплава ВТ6 (г) (ПЭМ)

Таблица 1 – Размер зерна и механические свойства исследуемых материалов

Материал	Состояние	$d_{ср.}, \text{мкм}$	НВ	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0.2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
09Г2С	Исходное	12	143	485	354	25
	После РКУП	0,33	331	838	655	10
Сталь 45	Закалка + высокий отпуск	10	302	985	839	8
	После РКУП	0,56	346	1171	1064	5
АК4-1	Т6 (закалка + старение)	40	122	370	320	16
	После РКУП	0,3	126	460	420	8
ВТ6	Исходное	15	331	950	849	12
	После РКУП	0,24	341	1090	990	9

Анализ кинетических диаграмм усталостного разрушения исследуемых материалов показал (рис. 2), что при одном и том же значении размаха коэффициента интенсивности напряжения ΔK , скорость распространения усталостной трещины в УМЗ стали 09Г2С и стали 45 ниже, чем в крупнозернистых сталях, а скорость распространения усталостной трещины в УМЗ сплавах АК4-1 и ВТ6 – выше, чем в крупнозернистых сплавах.

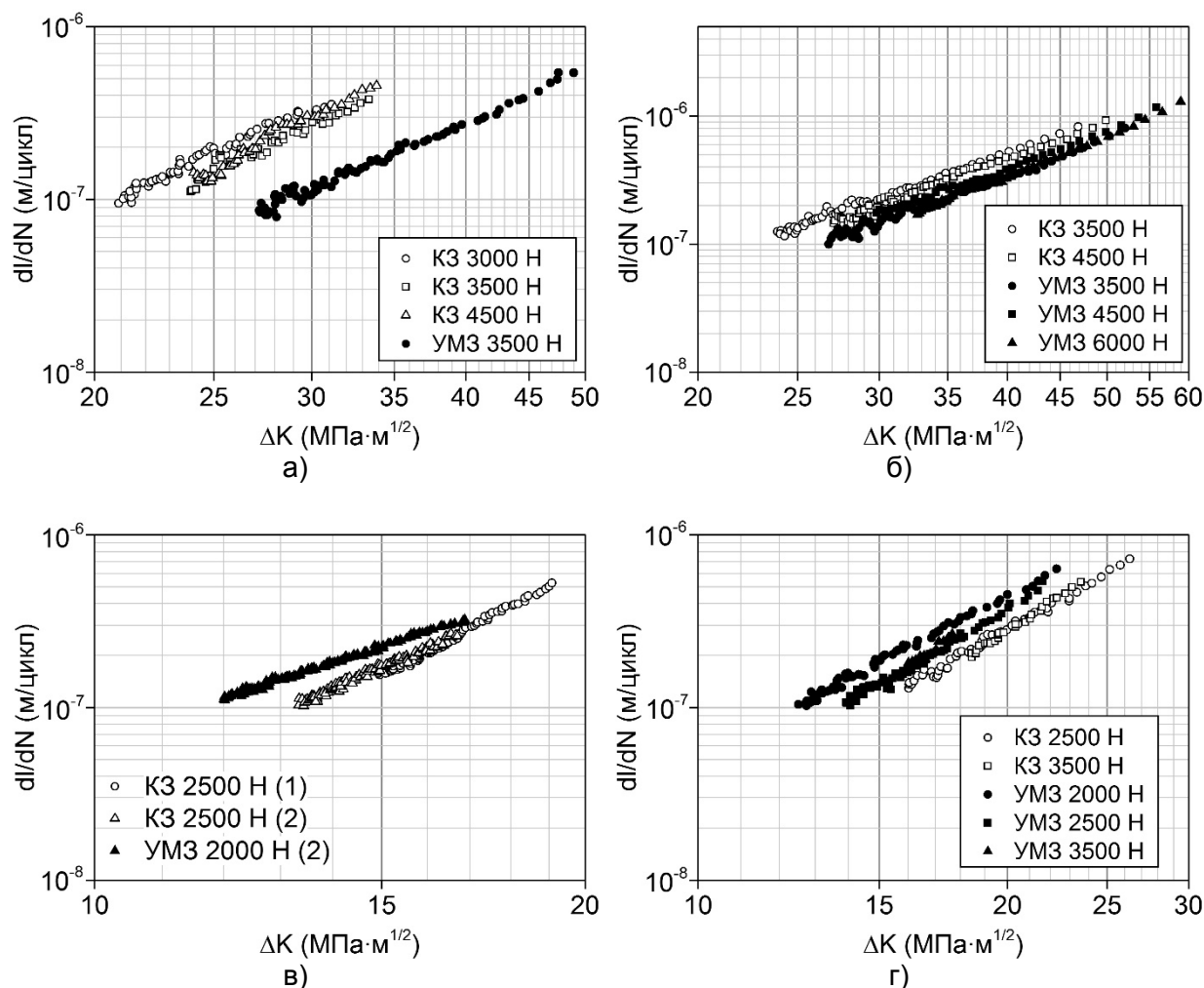


Рисунок 2 – Прямолинейные участки кинетических диаграмм усталостного разрушения стали 09Г2С (а), стали 45 (б), алюминиевого сплава АК4-1 и титанового сплава ВТ6 (г) в КЗ состоянии (светлые точки) и УМЗ состоянии (темные точки)

Прямолинейный участок кинетических диаграмм усталостного разрушения описывается уравнением Пэриса. Анализ данного уравнения показывает (табл. 2), что коэффициент n в уравнении Пэриса, в большинстве случаев, выше для крупнозернистых материалов, чем для УМЗ материалов. Следовательно, можно заключить, что материалы с УМЗ структурой менее чувствительны к возникающим циклическим перегрузкам.

Таблица 2 – Уравнения Пэриса для исследуемых материалов с КЗ и УМЗ структурой

Структура	КЗ	УМЗ
09Г2С	$\frac{dl}{dN} = 2,8 \cdot 10^{-12} (\Delta K)^{3,5}$	$\frac{dl}{dN} = 3,4 \cdot 10^{-12} (\Delta K)^{3,1}$
Сталь 45	$\frac{dl}{dN} = 1,1 \cdot 10^{-12} (\Delta K)^{2,9}$	$\frac{dl}{dN} = 5,7 \cdot 10^{-12} (\Delta K)^{3,1}$
АК4-1	$\frac{dl}{dN} = 3,2 \cdot 10^{-13} (\Delta K)^{5,0}$	$\frac{dl}{dN} = 5,2 \cdot 10^{-11} (\Delta K)^{3,1}$
ВТ6	$\frac{dl}{dN} = 7,6 \cdot 10^{-12} (\Delta K)^{3,6}$	$\frac{dl}{dN} = 2,5 \cdot 10^{-11} (\Delta K)^{3,3}$

Макро- и микрофрактографические исследования полученных изломов не выявили принципиальных различий в механизмах усталостного разрушения исследуемых материалов с КЗ и УМЗ структурой.

Выводы

1. При одном и том же значении ΔK скорость распространения усталостной трещины в УМЗ сталях (09Г2С и стали 45) ниже, чем в КЗ сталях, в то время как в алюминиевом (АК4-1) и титановом (ВТ6) УМЗ сплавах выше, чем в КЗ сплавах.
2. Коэффициент n в уравнении Пэриса для большинства исследуемых УМЗ материалов ниже, чем КЗ материалов. Следовательно, УМЗ материалы менее чувствительны к перегрузкам напряжения цикла.
3. Принципиальных различий в механизмах усталостного разрушения исследуемых материалов в КЗ и УМЗ состояниях не обнаружено.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-08-00340_а).