

СТАТИЧЕСКОЕ И УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ МАГНИЕВОГО СПЛАВА АМ60 С РАЗЛИЧНЫМ РАЗМЕРОМ ЗЕРНА

Исследовали строение статических и усталостных изломов образцов из сплава АМ60 в исходном состоянии (размер зерна 1 мм) и после равноканального углового прессования (РКУП) при 150 °С (размер зерна 1 мкм). Показаны существенные различия как в механических свойствах сплава, так и в макро- и микростроении изломов образцов сплава в исходном состоянии и после РКУП.

Ключевые слова: статическое и усталостное нагружение, разрушение, излом, макро- и микрорельеф поверхности излома.

Введение

Современные конструкционные материалы, применяемые в промышленности, должны обладать высоким комплексом механических свойств при различных видах нагружения.

Известно [1-4], что размер зерна поликристаллических материалов существенным образом влияет на его прочностные характеристики. Измельчение зерна в металлах и сплавах до ультрамелкозернистого и наносостояния может привести как к повышению прочности материала, так и к его разупрочнению.

Использование различных схем и методов интенсивной пластической деформации [3, 4] позволяет получать ультрамелкозернистое состояние металлов и сплавов с очень высокими прочностными свойствами. Однако в настоящее время слабо изучены механизмы разрушения наноструктурированных металлических материалов при различных видах нагружения.

Целью настоящей работы является изучение механизмов статического и усталостного разрушения образцов из сплава АМ60 в исходном состоянии с размером зерна 1 мм и после равноканального углового прессования (РКУП) при 150 °С с размером зерна 1 мкм.

Материал и методики исследования

Испытывали образцы из магниевого сплава АМ60 в исходном состоянии (гомогенизация при 450 °С, 6 час., размер зерна 1 мм) и после равноканального углового прессования (РКУП) при 150 °С [4] (10 проходов, размер зерна 1 мкм). Статические испытания на растяжение проводили на цилиндрических образцах с рабочим сечением 5 мм; усталостные испыта-

ния проводили на плоских образцах с рабочим сечением 1x10 мм.

Микрофрактографические исследования статических и усталостных изломов проводили в растровом микроскопе JSM-2Т.

Статическое нагружение

Как уже отмечалось, при уменьшении размеров зерна прочность сплавов увеличивается. Из таблицы 1 видно, что с уменьшением размера зерна в сплаве АМ60 от 1 мм до 1 мкм путем РКУП при 150 °С предел прочности сплава увеличивается примерно в 2 раза.

Рассмотрим макро- и микростроение изломов, полученных при статическом нагружении цилиндрических образцов.

Поверхность статических изломов образцов из сплава АМ60 в исходном состоянии (размер зерна 1 мм) расположена нормально к оси растяжения. Изломы светлые, однородные, имеют большую шероховатость в виде округлых впадин и выступов (рис. 1 а).

Поверхность изломов образцов из сплава АМ60 с размером зерна 1 мкм расположена примерно под углом в 45° к оси растяжения (поэтому на рисунке 1 б в фокусе только часть излома). Изломы светлые, матовые, однородные. Шероховатость поверхности таких изломов ниже, чем у излома сплава в исходном состоянии (рис. 1 б).

Таблица 1. Предел прочности сплава АМ60 в исходном состоянии и после РКУП

Состояние сплава	Исходное состояние	После РКУП при 150 °С
$\sigma_{в2}$, МПа	160	310

Микрофрактографический анализ показал, что в исходном состоянии сплав АМ60 разрушается по телу зерна, преимущественно вязко (рис. 2 а, б). Такой излом можно отнести к древовидному излому [5]. При большом увеличении (рис. 2 б, в) можно наблюдать, что плоские гребни, составляющие локальные утяжки, направлены по вытянутым в длину зернам; видны вторичные трещины.

Микрорельеф изломов сплава после РКУП с размером зерна 1 мкм характеризуется стро-

ечной ямочной структурой (рис. 3 а, б), которая наиболее ярко выражена при большом увеличении (рис. 3 в).

Усталостное нагружение

На рисунке 4 представлены кривые усталости сплавов АМ60 в исходном состоянии (размер зерна 1 мм) и сплава, полученного после РКУП при 150 °С (размер зерна 1 мкм). Видно, что после РКУП усталостные характеристики сплава значительно возрастают.

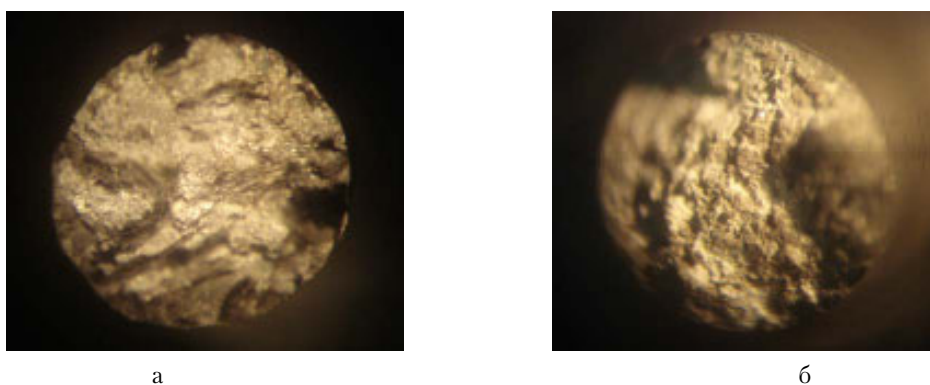


Рисунок 1. Общий вид статических изломов образцов из сплава АМ60 в исходном состоянии (а) и после РКУП при 150 °С (б)

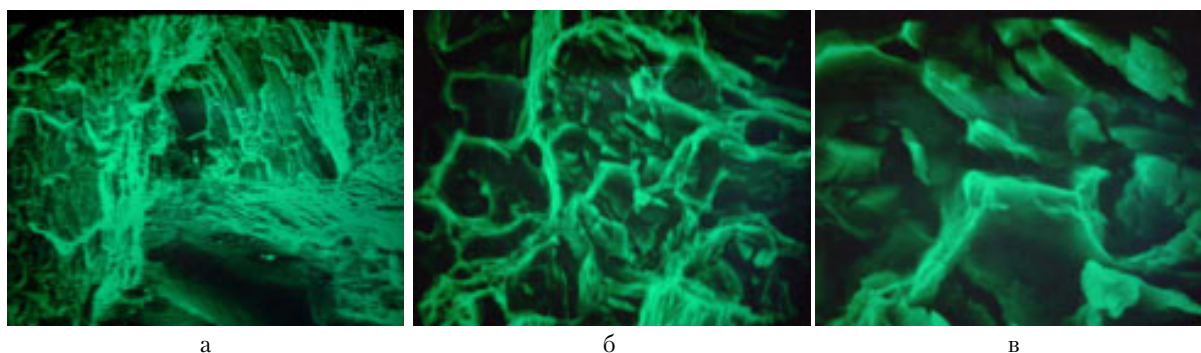


Рисунок 2. Микрорельеф статического излома сплава в исходном состоянии: а - x100, б - x1000, в - x3500

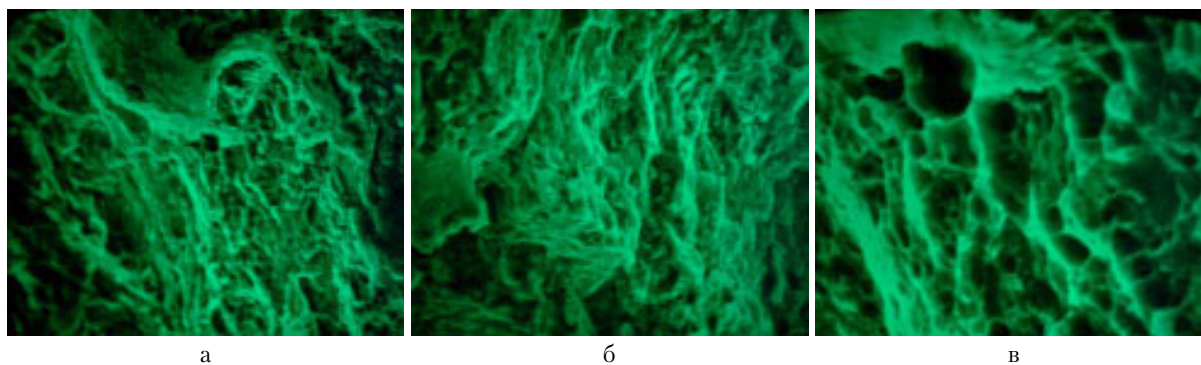


Рисунок 3. Микрорельеф статического излома сплава, полученный после РКУП при 150 °С: а - x100, б - x1000, в - x3500

Рассмотрим строение усталостных изломов сплава АМ60 в исходном состоянии, полученных при $y_{\max} = 90$ МПа ($N = 2,57 \cdot 10^4$ цикл.) и $y_{\max} = 100$ МПа ($N = 6,39 \cdot 10^4$ цикл.) (см. рис. 4).

Все изломы имеют крупнозернистое строение, высокую шероховатость и блестящий вид (рис. 5 а). Зона усталостного роста трещины l_f [6, 7] расположена нормально к поверхности образца (рис. 5 б). Даже при небольшом увеличении на ее поверхности можно наблюдать участки циклического скола. Длина зоны усталостного развития трещины l_f на поверхности излома с увеличением количества циклов нагру-

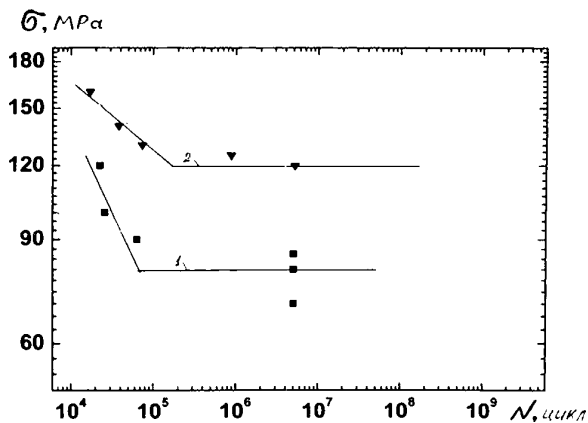


Рисунок 4. Кривая усталости сплава АМ60 в исходном состоянии (1) и после РКУП при температуре 150 °С (2)

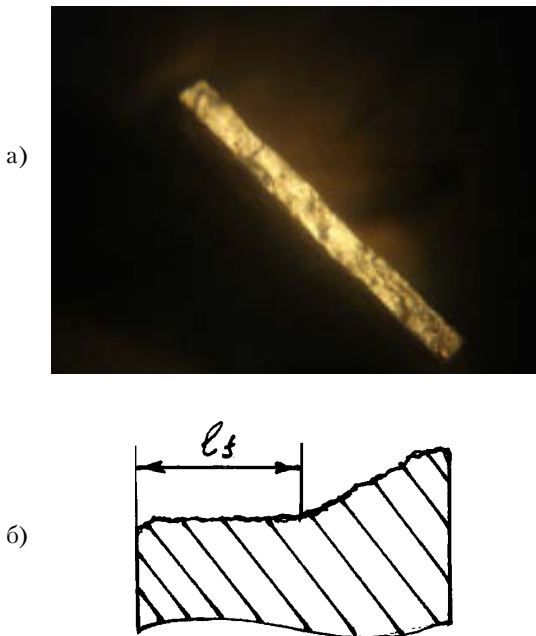


Рисунок 5. Общий вид (а) и профиль (б) усталостных изломов сплава АМ60 в исходном состоянии. l_f – зона усталостного развития трещины

жения до разрушения образцов возрастает и составляет при $y_{\max} = 90$ МПа примерно 6 мм, а при $y_{\max} = 100$ МПа – 4,5 мм.

Зона долома расположена под углом к поверхности образца (на схеме (рис. 5 б) – правая часть). Она отличается большей шероховатостью, а наличие утяжки на боковой поверхности свидетельствует о резком изменении локального напряженного состояния материала у вершины трещины в сторону плоского напряженного состояния [7] при переходе от зоны усталостного роста трещины l_f к зоне долома.

Микрофрактографический анализ усталостных изломов сплава в исходном состоянии, полученных как при $y_{\max} = 90$ МПа, так и при $y_{\max} = 100$ МПа (рис. 6), показал, что в очаге разрушения доминируют фасетки циклического скола (рис. 6 а, б). В зоне усталостного развития трещины l_f просматривается кристаллографическая ориентация излома с участками вязкого микрорельефа, характерного для уже упомянутого древовидного излома (рис. 6 в, г). При переходе к долому и в самой зоне долома преобладают вязкие острые гребни (рис. 6 д).

Рассмотрим строение усталостных изломов сплава АМ60 после РКУП, полученных при $y_{\max} = 130$ МПа ($N = 7,35 \cdot 10^4$ цикл.), $y_{\max} = 140$ МПа ($N = 3,80 \cdot 10^4$ цикл.) и $y_{\max} = 160$ МПа ($N = 1,70 \cdot 10^4$ цикл.) (см. рис. 3).

Изломы образцов из сплава АМ60 после РКУП резко отличаются по строению от изломов образцов сплава в исходном состоянии. Зона усталостного роста трещины l_f на всех изломах матовая, мелкозернистая, светлого цвета, имеет небольшую шероховатость и расположена в центральной части излома (рис. 7) нормально к по-

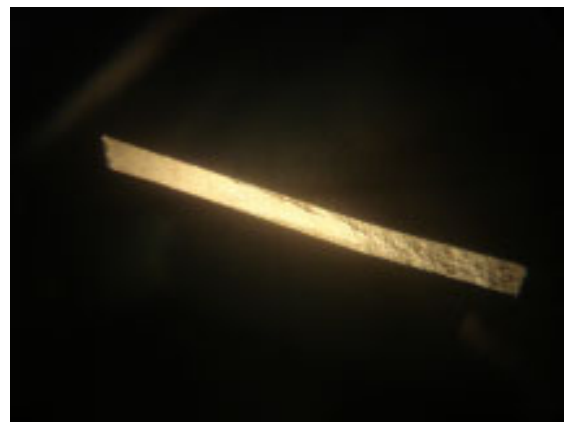


Рисунок 7. Общий вид усталостного излома сплава АМ60 после РКУП при 150 °С

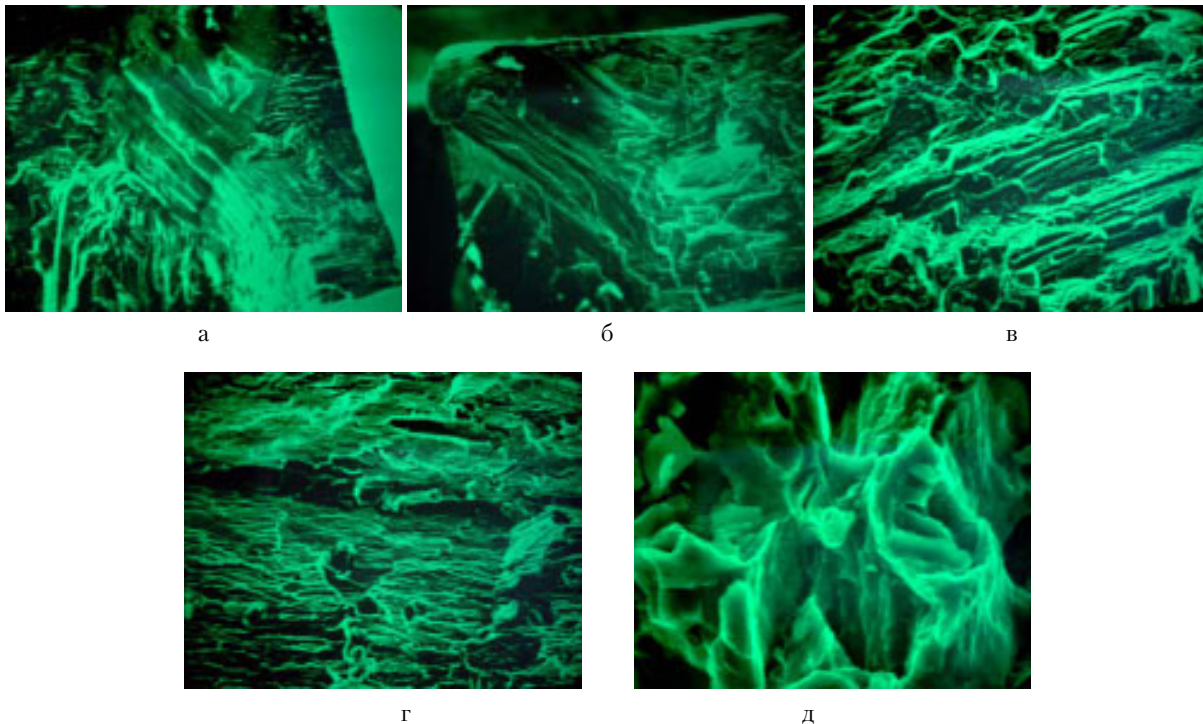


Рисунок 6. Микрорельеф усталостного излома сплава в исходном состоянии, полученного при $\sigma_{max} = 90$ МПа (а, в, д) и $\sigma_{max} = 100$ МПа (б, г): а, б - очаг разрушения (x100); в, г - зона l_f (x350); д - долом (x2000)

верхности образца. На поверхности излома образца, испытанного при $\sigma_{max} = 140$ МПа, можно наблюдать очаг разрушения длиной 0,3 мм, имеющий большую шероховатость и несколько иное макростроение. На поверхности излома образца, испытанного при $\sigma_{max} = 130$ МПа, в очаге разрушения виден технологический дефект (заусенец) от обработки поверхности образца.

Поскольку разрушение образцов при различных значениях σ_{max} произошло в разных участках, то и длина усталостного излома оказалась различной. В этом случае есть смысл ввести понятие относительной длины зоны усталостного роста трещины l_f как отношение длины зоны l_f к длине всего излома, т. е. l_f/l (табл. 2). Как видно из приведенной таблицы, увеличение количества циклов нагружения до разрушения об-

разцов (снижение σ_{max}) приводит к возрастанию относительного значения длины зоны l_f .

Зона долома на всех изломах имеет светлый матовый цвет, большую шероховатость, чем зона усталостного развития трещины. Ее поверхность наклонена к плоскости зоны l_f ; в периферийной части излома видны губы среза.

Таблица 2. Строение усталостных изломов образцов из сплава АМ60 после РКУП

Состояние сплава и условия испытания	Схема излома	Длина излома l , мм	Относительная длина зоны, l_f/l
РКУП, 150 °С, $\sigma_{max} = 130$ МПа, $N = 7,35 \cdot 10^4$ цикл.		12,9	0,7
РКУП, 150 °С, $\sigma_{max} = 140$ МПа, $N = 3,80 \cdot 10^4$ цикл.		9,6	0,5
РКУП, 150 °С, $\sigma_{max} = 160$ МПа, $N = 1,70 \cdot 10^4$ цикл.		10,2	0,2

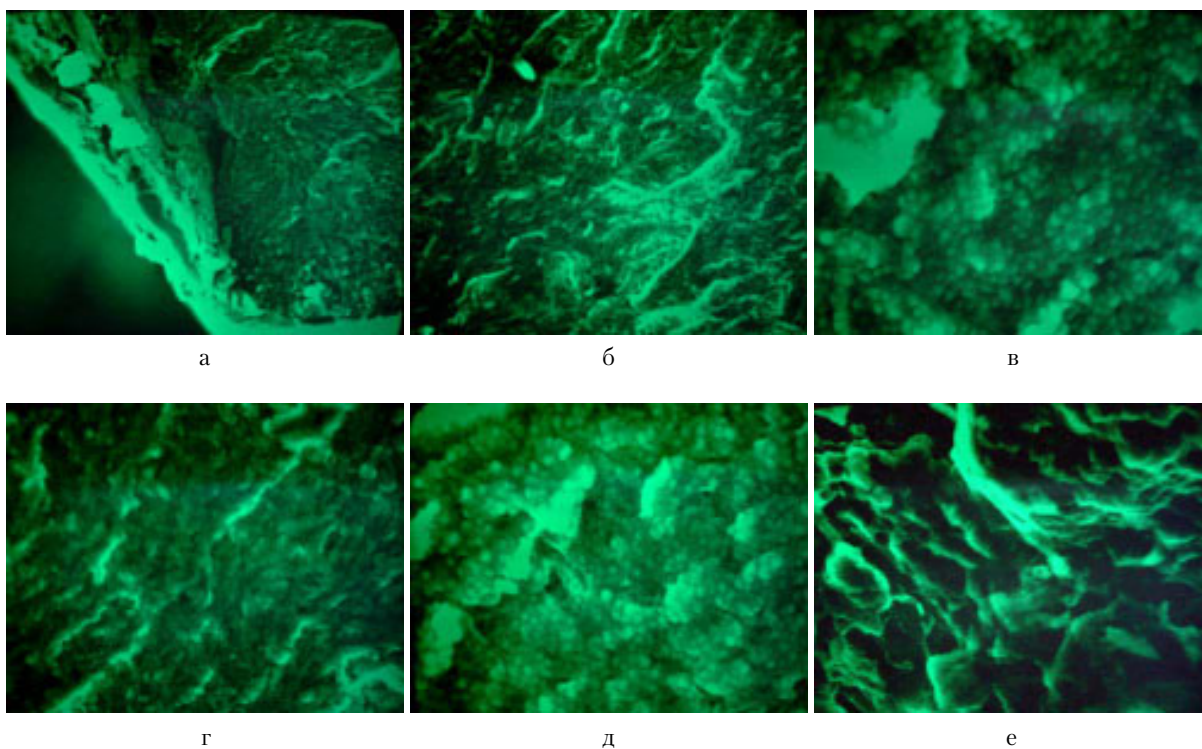


Рисунок 8. Микрорельеф усталостного излома сплава АМ60 после РКУП, полученного при $\sigma_{max} = 130$ МПа на различном расстоянии (l) от очага разрушения: а - очаг разрушения (x350); б - зона I_f ($l=0,5$ мм) (x350); в - зона I_f ($l=0,5$ мм) (x3500); г - зона I_f ($l=1$ мм) (x1000); д - зона I_f ($l=1$ мм) (x3500); е - долом (x2000)

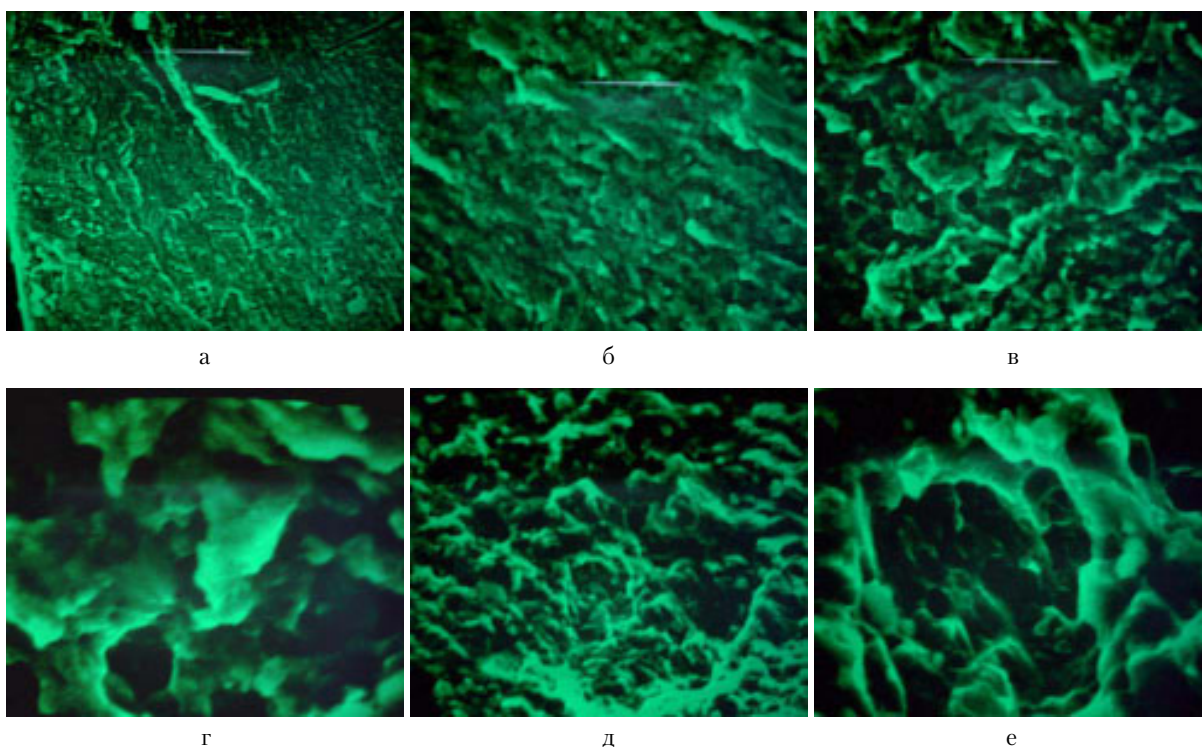


Рисунок 9. Микрорельеф усталостного излома сплава АМ60 после РКУП, полученного при $\sigma_{max} = 140$ МПа на различном расстоянии (l) от очага разрушения: а - очаг разрушения (x350); б - зона I_f ($l=0,5$ мм) (x1000); в - зона I_f ($l=2,5$ мм) (x1000); г - зона I_f ($l=2,5$ мм) (x3500); д - долом (x1000); е - долом (x3500)

Микрофрактографический анализ усталостных изломов сплава после РКУП при 150 °С, полученных как при $y_{\max} = 130$ МПа, так и при $y_{\max} = 140$ МПа, показал существенное различие в микромеханизме разрушения данного сплава от исходного состояния (рис. 8 и 9).

Вблизи очага разрушения можно наблюдать малорельефную поверхность излома, по-видимому, со следами коррозии (рис. 8 а, б и рис. 9 а). В пределах зоны усталостного развития трещины l_f квазибороздки, наблюдаемые при малых длинах трещины (рис. 8 в, д и рис. 9 б), переходят при больших длинах трещины в вязкие гребни (рис. 8 ж и рис. 9 в, г). Долом – вязкий (рис. 8 з и рис. 9 д, е).

Обращает на себя внимание, что при небольших длинах усталостной трещины (0,5–1,5 мм) при большом увеличении на поверхности излома (возможно, покрытой слоем окислов) можно наблюдать рельеф в виде отдельных зерен размером, равным размеру зерна (1 мкм) (рис. 8 в, д).

Заключение

Таким образом, сравнивая результаты исследования изломов образцов из сплава АМ60

в исходном состоянии (размер зерна 1 мм) и после РКУП (размер зерна 1 мкм), мы видим существенные различия не только в прочности и долговечности образцов (количество циклов до разрушения), но и в макро- и микростроении изломов. Так статическое разрушение образцов из сплава АМ60 в исходном состоянии происходит путем образования вязких гребней, представляющих собой локальные утяжки, а после РКУП при 150 °С – вязко с образованием ямочного микрорельефа.

При усталостном разрушении сплава АМ60 в исходном состоянии зона усталостного развития трещины имеет крупнозернистое строение, высокую шероховатость и блестящий вид. При этом доминируют циклический скол с участками вязкого микрорельефа, характерного для дровидного излома. После РКУП – квазибороздки и вязкие гребни. Обнаружено, что при небольших длинах усталостной трещины (0,5–1,5 мм) при большом увеличении на поверхности излома (возможно, покрытой слоем окислов) можно наблюдать рельеф в виде отдельных зерен размером, равным размеру зерна.

20.11.2009

Список использованной литературы:

1. Siegel R.W. – In: Proc. Of the NATO ASI. Mechanical properties of ultrafine-grained materials (Wds. M. Nastasi, D.M. Parkin, H. Gleiter). – Dordrecht; Boston; London: Kluwer Head. Publ., 1993. V. 233. P. 509.
2. Морохов И.Д., Трусов Л.Д., Лаповок В.И. Физические явления в ультрадисперсных средах. - М.: Наука, 1984. - 472 с.
3. Valiev R.Z., Tsenev N.K. – In: Hot deformation of aluminum alloys (ed. By T.G. Langdon, H.D. Merchant, J.G. Morris, M.A. Zaidi). TMS. Warrendale, PA, 1991. P. 319.
4. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. - 398 с.
5. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Справ. изд./Энгель Л., Клингеле Г. Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1986. - 232 с.
6. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. - М.: Наука, 1989. - 230 с.
7. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. - М.: МИСиС, 2007. - 264 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (проект АВЦП №1383)

Клевцов Г.В., заведующий кафедрой физики металлов и наноструктур Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор, E-mail – klevtsov11948@mail.ru
Валиев Р.З., директор Института физики перспективных материалов при УГАТУ, доктор физ.-мат. наук, профессор, 450000, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12, УГАТУ, тел.: (342) 2733422, E-mail – RZValiev@mail.rb.ru

Клевцова Н.А., доцент кафедры радиофизики и электроники Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент, E-mail – klevtsov11948@mail.ru

Кулясова О.Б., младший научный сотрудник Института физики перспективных материалов при УГАТУ, кандидат физ.-мат. наук, 450000, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12, УГАТУ, тел.: (342) 2733422, E-mail – RZValiev@mail.rb.ru

Фесенюк М.В., начальник ЦЗЛ ПО «Стрела», тел.: 89058914316

Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Klevtsova N.A., Kulyasova O.B., Phesenyuk M.V.
STATIC AND FATIGUE RUPTURES OF AM60 MAGNESIUM ALLOY SAMPLES WITH DIFFERENT GRAIN SIZES
Summary. The report studied the structure of static and fatigue rupture for the AM60 alloy samples in initial state (1 mm grain size) and after Equal Channel Angular Extrusion (ECAE) at 150 °C (1 mkm grain size). Significant differences were found both in the mechanical alloy properties and macro- and – microstructure of the fractures in the alloy samples in initial conditions and after ECAE.

Key words: static and fatigue loading, destruction, rupture, macro- and micro relief of the rupture surface