УДК 620.186.4+539.23+539.216.1:531

## ПРОЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМЫ УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

<sup>1</sup>Клевцов Г.В., <sup>2</sup>Валиев Р.З., <sup>1</sup>Клевцова Н.А., <sup>1</sup>Кашапов М.Р., <sup>1</sup>Фесенюк М.В., <sup>2</sup>Ганеев А.В., <sup>2</sup>Рааб А.Г.

<sup>1</sup>Оренбургский государственный университет, Оренбург, e-mail: Klevtsov11948@mail.ru; <sup>2</sup>Институт физики перспективных материалов Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, e-mail: RZValiev@mail.rb.ru

Исследовали прочность и механизм ударного разрушения материалов с ОЦК структурой (сталь 10), ГЦК структурой (аустенитную сталь AISI 321 и сплав Д16) и ГПУ структурой (титановый сплав ВТ6) в исходном состоянии и после равноканального углового прессования (РКУП). Средний размер зерна всех материалов после РКУП составлял примерно 300 нм. Показано, что РКУП прессование повышает твердость и прочностные характеристики металлических материалов в 1,5–2,5 раза по сравнению с исходным состоянием, однако снижает их пластические свойства и ударную вязкость, повысить которую предлагается последующим отжигом. В материалах с ОЦК структурой РКУП практически не изменяет порог хладноломкости, однако сужает интервал вязко-хрупкого перехода.

Ключевые слова: прочность, ударное разрушение, структура, наноструктурированные материалы

# STRENGTH AND IMPACT FRACTURE MECHANISMS OF NANOSTRUCTURED MATERIALS

<sup>1</sup>Klevtsov G.V., <sup>2</sup>Valiev R.Z., <sup>1</sup>Klevtsova N.A., <sup>1</sup>Kashapov M.R., <sup>1</sup>Fesenyuk M.V., <sup>2</sup>Ganeev A.V., <sup>2</sup>Raab A.G.

1 Orenburg State University, Orenburg, e-mail: Klevtsov11948@mail.ru; 2 Institute of Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, e-mail: RZValiev@mail.rb.ru

Investigated the strength and impact fracture mechanism of materials with a bcc structure (steel 10), fcc structure (austenitic steel AISI 321 and alloy D16) and HCP structure (titanium alloy BT6) at baseline and after equal-channel angular pressing (ECAP). The average grain size of all materials after ECAP was about 300 nm. It is shown that ECAP pressing increases the hardness and strength characteristics of metallic materials in 1,5–2,5 times in comparison with the initial state, but reduces their plastic properties and impact strength, which can be increased by the subsequent annealing. In materials with a bcc structure ECAP practically no effect on the brittleness transition temperature, but narrows the range of ductile-brittle transition.

Keywords: strength, impact fracture, structure, nanostructured materials

В последнее время интенсивно разрабатываются технологии получения наноструктурированных объемных металлических материалов с субмикрокристаллической структурой. Для получения данного класса материалов широко используют технологии интенсивной пластической деформации (ИПД), например, путем равноканального углового прессования (РКУП) [1]. Материалы, полученные с использованием технологий ИПД, привлекают внимание специалистов благодаря ряду уникальных свойств, многие из которых имеют непосредственное практическое применение. Однако широкое использование таких материалов предполагает расширение наших представлений о физической природе прочности и механизмах их разрушения на различном масштабном уровне [2].

Целью настоящей работы является изучение прочности и механизмов разрушения материалов с ОЦК, ГЦК и ГПУ структурой в исходном состоянии и после равноканального углового прессования (РКУП) в субмикрокристаллическом состоянии.

#### Материалы и методики исследования

В качестве материала с ОЦК структурой использовали углеродистую сталь  $10\ (0.11\%\ C)$  со средним размером зерна  $45\$ мкм; в качестве материалов с ГЦК структурой — аустенитную сталь AISI  $321\ (0.06\%\ C; 1.2\%\ Mn; 17.5\%\ Cr; 9.4\%\ Ni; 0.48\%\ Ti)$  со средним размером зерна  $60\$ мкм и алюминиевый сплав Д16,а вкачествематериалов с ГПУ структурой — титановый сплав BT6  $(6\%\ Al; 4\%\ V)$ . После РКУП средний размер зерна всех материалов составлял примерно  $300\$ нм. Исследование структуры стали  $10\$ после РКУП и РКУП + отжиг проводили в просвечивающем электронном микроскопе JEOLJEM2 $100\$ .

Твердость исследуемых материалов определяли по методу Роквелла (HRC) и Бринелля (HB). Определение стандартных характеристик материалов при статическом растяжении проводили на круглых образцах диаметром 3 мм. Испытание проводили на разрывной машине P-10. Ударные испытания образцов с V-образным концентратором напряжения проводилина копре МК-30 в широком интервале температур.

Изломы исследовали методами макро- и микрофрактографии. Микрофрактографические исследования проводили в растровом электронном микроскопеJSM-6092. Глубину пластических зон под поверхностью изломов и структурные изменения материала в данных зонах определяли рентгеновским

методом [3].Съемку изломов проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4-07.

# Результаты исследований и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что РКУП, формируя субмикрокри-

сталлическую структуру, в 1,5–2,5 раза повышает твердость и прочностные характеристики материалов по сравнению с исходным состоянием, однако снижает пластические свойства. Свойства некоторых материалов представлены в табл. 1.

 Таблица 1

 Среднее значение механических свойств материалов в исходном состоянии и после РКУП

Материал	Состояние	HB (HRC)	$σ_{_{\rm B}}$ , ΜΠ $a$	$σ_{r}$ , $(σ_{0,2})$ , ΜΠα	δ,%
Сталь 10	Исходное состояние	121 HB	460	350	25
	После РКУП, 4 прохода	235 HB	1028	989	8
Сталь AISI 321	Исходное состояние	24 HRC	766	673	35
	После РКУП	37 HRC	917	869	25
Сплав ВТ6	Исходное состояние	33 HRC	1050	920	15
	После РКУП	42 HRC	1450	1380	12

В материалах с ОЦК структурой, как видно на примере стали 10 (рис. 1), РКУП практически не изменяет порог хладнолом-кости стали, однако сужает интервал вязкохрупкого перехода.

Доминирующими микромеханизмами низкотемпературного ударного разрушения образцов из стали 10 в исходном состоянии является микроскол, а после РКУП – квазискол (рис. 2 а). В интерва-

ле вязко-хрупкого перехода данная сталь в исходном состоянии разрушается вязко-хрупко (микроскол и ямочный микрорельеф), а после РКУП — с образованием гребней и ступенек или малорельефных участков (рис. 2 б). В верхней области вязко-хрупкого перехода сталь 10 в исходном состоянии и после РКУП разрушается вязко с образованием ямочного микрорельефа (рис. 2 в).

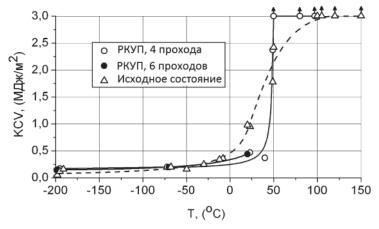


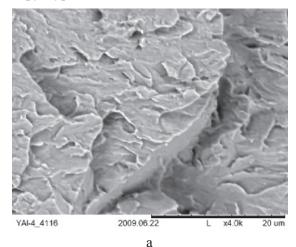
Рис. 1. Температурная зависимость ударной вязкости (КСV) стали 10 в исходном состоянии и после РКУП с 4 и 6 проходами

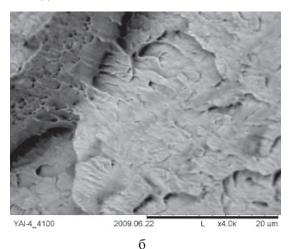
Под поверхностью изломов,полученных при испытании образцов из стали 10 в исходном состоянии и после РКУП при низких и комнатной температурах,рентгеновским методом обнаружена одна пластическая зона. Наличие одной пластической зоны под поверхностью изломов и результаты макро- и микрофрактографического анализа свидетельствуют о том, что ударное разрушение образцов при вышеуказанных температурах произошло в условиях плоской деформации (ПД).

С целью повышения ударной вязкости стали 10 после РКУП исследовали влияние температуры последующего нагрева на твердость и ударную вязкость стали после 4 проходов РКУП. Результаты исследования показали, что интенсивное снижение твердости стали 10 начинается при температуре нагрева выше 500–550 °С. При температуре нагрева до 550 °С твердость и прочностные свойства стали практически не изменяются. Образцы, испытанные на ударную вязкость (КСV) после такой обработки, полностью

не разрушались. Это свидетельствует о том, что ударная вязкость стали 10 возросла более чем в 6 раз, превышая ударную вязкость стали в исходном состоянии более чем в 3 раза (табл. 2). Результаты исследования структуры стали в ПЭМ показали, что в

стали 10 после РКУП (4 прохода) даже при температуре нагрева 550°C размер зерен практически не изменился; в структуре отсутствует явно выраженная полосчатость, наблюдаемая после РКУП, а границы зерен выглядят более тонкими.





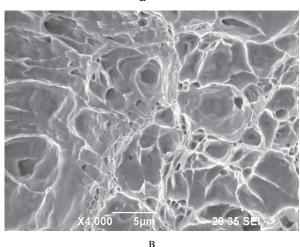


Рис. 2. Микрорельеф поверхности ударных изломов стали 10 (РКУП, 4 прохода), испытанной при температурах  $-196\,^{\circ}\mathrm{C}$  (a),  $20\,^{\circ}\mathrm{C}$  (б),  $50\,^{\circ}\mathrm{C}$  (в): a, b, b, b

Таблица 2 Механические свойства стали 10 в различном состоянии

Вид обработки	HB	σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>г</sub> , ΜΠα	δ,%	КСV, МДж/м²
Исходное состояние		460	350	25	0,95
РКУП, 4 прохода	235	1028	989	8	0,45
РКУП, 4 прохода + нагрев 550°C	218	612	504	40	3,00↑
					(образцы не разрушились)

Рассмотрим прочность и механизмы разрушения материалов с ГЦК структурой при ударном нагружении в исходном состоянии и после РКУП на примере образцов из аустенитной стали AISI 321 и алюминиевого сплава Л16.

Из табл. 3 видно, что РКУП привело к уменьшению ударной вязкости (КСV) аустенитной стали AISI 321 примерно на 60–70% как при комнатной, так и при низкой температуре.

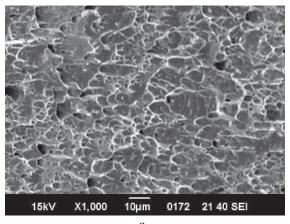
Ударные изломы стали AISI 321 в исходном состоянии, полученные как при комнатной, так и при низкой температуре, волокнистые, матовые, серого цвета. Вблизи очага разрушения на поверхности изломов можно выделить С-образную зону L [3], имеющую более светлую поверхность, состоящую из параллельных гребней и расположенную за микрозоной сдвига  $\theta$ . Микрорельеф зоны L состоит из вытянутых ямок; микрорельеф центральной части изломов — из мелких неглубоких ямок.

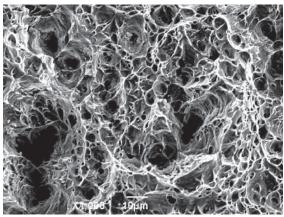
Таблица 3 Ударная вязкость (КСV) и общий вид изломов аустенитной стали AISI 321

Состояние		дное ояние	После РКУП		
t, °C	20	-196	20	-196	
КСV, МДж/м <sup>2</sup>	2,48	2,25	1,65	1,54	

Изломы стали после РКУП, полученные как при комнатной, так и при низкой

температуре, волокнистые, матовые, серого цвета. Как и в предыдущем случае, изломы содержат зону L, состоящую из вытянутых ямок (рис. 3, а). Центральная часть изломов состоит из глубоких равноосных различного размера ямок, чередующихся с порами (рис. 3, б, в). Они более глубокие по сравнению с ямками, наблюдаемыми на поверхности изломов стали в исходном состоянии.





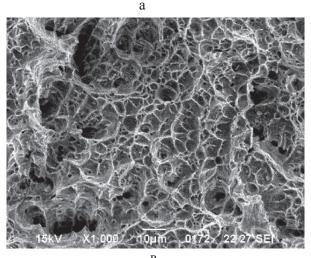


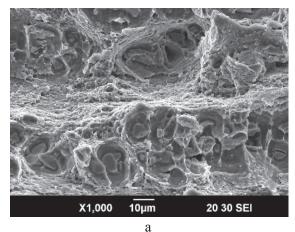
Рис. 3. Микрорельеф поверхности ударных изломов стали AISI 321 после РКУП, испытанной при температуре  $20\,^{\circ}\mathrm{C}$  (а, б) и  $-196\,^{\circ}\mathrm{C}$  (в): а - в очаге разрушения; б, в - в центральной части изломов: а, б, в - х1000

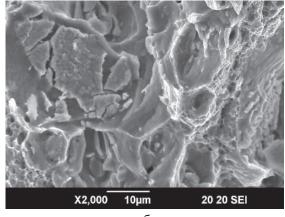
Рентгеновские исследования позволили выявить под поверхностью всех изломов стали AISI 321 две пластические зоны [3]: сильнодеформированную микрозону  $h_{vh}$  и слабодеформированную макрозону  $h_{v}$  Глубина пластических зон под поверхностью изломов стали AISI 321 после РКУП меньше по сравнению с исходным состоянием. Следовательно, состояние материала после РКУП характеризуется большей локализацией пластической деформации при ударном нагружении. Разрушение стали во всех случаях произошло в условиях плоского напряженного состояния (ПН) [3].

Испытания образцов из сплава Д16 на ударную вязкость показали, что самую высокую ударную вязкость сплав Д16

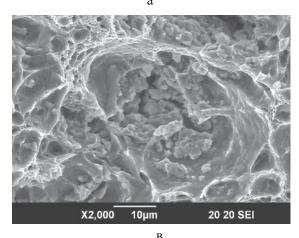
имеет после РКУП, чуть ниже после закалки + старения, а низкую ударную вязкость - в случае отжига (табл. 4).

Все ударные изломы сплава Д16 однородные, волокнистые. На изломах, полученных после отжига и закалки + старения, утяжка и губы среза практически отсутствуют. Излом сплава после РКУП волокнистый, имеет большие губы среза (35%) и утяжку. Механизм разрушения сплава Д16 после РКУП в субмикрокристаллическом состоянии отличается от механизма разрушения сплава в исходном состоянии после различных видов термической обработки отсутствием крупных хрупких фрагментов в микрорельефе ямочного излома (рис. 4).





б



О степени искаженности кристаллической структуры алюминиевого сплава Д16 на поверхности изломов свидетельствует значение физического уширения рентгеновской дифракционной линии (311) Ка, полученной с поверхности изломов (табл. 4). Из табл. 4 видно, что самая высокая искаженность кристаллической структуры имеет место в случае разрушения сплава после РКУП, чуть меньше — после закалки + старения, а самая низкая — после отжига сплава. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными ударной вязкости и фрактографического анализа.

Таблица 4

Твердость, ударная вязкость сплава Д16 после различных видов обработки, а также значение физического уширения рентгеновской дифракционной линии (311)  $K\alpha_1$ , полученной с поверхности изломов

Состояние	Отжиг	Закал- ка + ста- рение	После РКУП
Твердость (НВ)	60	121	78
КСV, МДж/м²	0,23	0,31	0,39
Δβ, рад.	$6,83\cdot10^{-3}$	8,423·10 <sup>-3</sup>	$9,36\cdot10^{-3}$

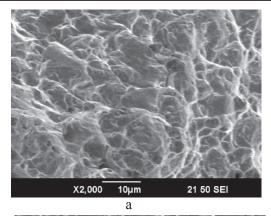
Рис. 4. Микрорельеф поверхности ударных изломов сплава Д16 после отжига (а), закалка + старение (б) и РКУП (в): a - x1000, б, в - x2000

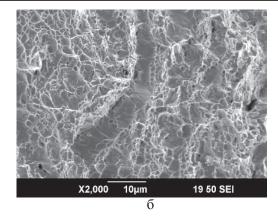
Механизм ударного разрушения материалов с ГПУ структурой рассмотрим на примере титанового сплава ВТ6. Как видно из табл. 5, твердость и ударная вязкость титанового сплава в значительной степени зависят от его состояния (исходное состояние, РКУП + экструзия, РКУП + экструзия + изотермическая штамповка (ИЗШ) + отжиг).

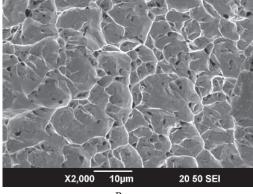
Таблица 5
Твердость и ударная вязкость сплава ВТ6
в различном состоянии

Состоя-	Исходное состоя- ние	РКУП + экструзия	РКУП + экструзия + ИЗШ +отжиг
HRC	33	42	35
КСV, МДж/м²	0,39	0,15	0,32

Разрушение сплава ВТ6 во всех случаях было вязким с образованием ямочного микрорельефа (рис. 5 а-в). После РКУП + экструзии (рис. 5 б) ямки более мелкие и неоднородные по сравнению с исходным состоянием, что свидетельствует о неоднородности структуры сплава после данного вида обработки. После РКУП + экструзии + ИЗШ + отжига (рис. 5 в) ямки неглубокие с гладкой поверхностью.







#### Выводы

- 1. РКУ прессование, формируя субмикрокристаллическую структуру, повышает твердость и прочностные характеристики металлических материалов в 1,5–2,5 раза по сравнению с исходным состоянием, однако снижает их пластические свойства и ударную вязкость (КСV).
- 2. В материалах с ОЦК структурой РКУ прессование практически не изменяет порог хладноломкости (сталь 10), однако сужает интервал вязко-хрупкого перехода.
- 3. На примере стали 10 показано, что последующий после РКУП нагрев до температуры 550°С позволяет более чем в 6 раз повысить ударную вязкость стали без значительного снижения твердости.
- 4. Доминирующими механизмами низкотемпературного ударного разрушения образцов из стали 10 в исходном состоянии является микроскол + межзеренное хрупкое разрушение, а после РКУП квазискол. В интервале вязко-хрупкого перехода сталь 10 в исходном состоянии разрушается вязко-хрупко (микроскол и ямочный микрорельеф), а после РКУП с образованием вязких гребней и ступенек (4 прохода РКУП) или малорельефных вытянутых участков (6 проходов РКУП). В верхней области вязко-хрупкого перехода сталь 10 в исходном состоянии и после РКУП разрушается вязко с образованием ямочного микрорельефа.
- 5. Ударное разрушение материалов с ГЦК структурой (сталь AISI 321, сплав Д16) и с ГПУ структурой (титановый сплав ВТ6) в суб-

Рис. 5. Микрорельеф поверхности ударных изломов сплава ВТ6 в исходном состоянии (а), после РКУП + экструзии (б) и после РКУП + экструзия + ИЗШ + отжиг (в): a, 6, 6-x2000

микрокристаллическом состоянии при всех температурах испытания происходит вязко с образованием ямочного микрорельефа.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП (ГК № 3018)и РФФИ (проект № 11-08-00208).

### Список литературы

- 1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
- 2. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Физматлит, 2000. 224 с.
- 3. Андриевский Р.А., Глезер А.М. Прочность наноструктур // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179, № 4. – С. 337–358.
- 4. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г.В. Клевцов, Л.Р. Ботвина, Н.А. Клевцова, Л.В. Лимарь. М.: МИСиС, 2007. 264 с.
- 5. Р 50-54-52-88. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение глубины зон пластической деформации под поверхностью разрушения / Г.В. Клевцов, Л.Р. Ботвина, М.Н. Георгиев, Л.П. Гранкова, А.Н. Иванов, Л.П. Строк, Д.А. Молодов, С.В. Сафронов, Н.А. Клевцова, Г.Б. Швец, А.Г. Жижерин, Н.К. Шаурова. М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1988. 24 с.
- 6. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. М.: Наука, 1989. 230 с. 7. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р. Макро- и микрозона пластиче-
- 7. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р. Макро- и микрозона пластической деформации как критерий предельного состоянии материала при разрушении // Проблемы прочности. 1984. № 4. С. 24-28.

### Рецензенты:

Кучеренко М.Г., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой радиофизики и электроники ГОУ «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург;

верситет», г. Оренбург; Кушнаренко В.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой деталей машин и прикладной механики ГОУ «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург.

Работа поступила в редакцию 12.08.2011.