

9. Кедринский В.К., Бесов А.С., Гутник И.Э. Инверсия двухфазного состояния жидкости при импульсном нагружении // Докл. РАН. 1997. Т. 352, N-о 4. С. 477–479.
10. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус
11. Гусева М.А., Игнатова О.Н., Раевский В.А., Целиков И.С. Динамическая модель роста и схлопывания пор в жидкостях и твердых веществах // ФГВ. 2017. №1
12. Kedrinskii V.K. Arch. Mech. 1974. V26. #3. P.535-540.
13. Г.И. Канель, А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов: «Динамическая прочность расплавов олова и свинца»; Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия (2015).
14. А.А. Богач, А.В. Уткин ПМТФ 41(4), 198(2000): «Прочность воды при импульсном растяжении»; Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка.
15. С.В. Разоренов, А.С. Савиных, Е.В. Zaretsky: «Особенности упругопластического деформирования и разрушения ударно-сжатой монокристаллической и поликристаллической меди вблизи плавления»; Институт проблем химической Физики РАН, 142432 Черноголовка, Московская область, Россия (2012).
16. Alexander V.Utkin, Vasilij A.Sosikov, Andrey A.Bogach, Vladimir E.Fortov: «Tension of liquids dy shock waves»; Institute of Problems of Chemical Physics RAS, 142432, Chernogolovka, Russia(2003).
17. Strand, Oliver T., et al., "Velocimetry using heterodyne techniques," 26th Int. Conf. on High-speed Photography and Photonics, Proc. of SPIE 5580, Alexandria, 2004.
18. Strand, Oliver T., et al., "Compact system for highspeed velocimetry using heterodyne techniques," Rev. Sci. Instr. 77, 2006.
19. А.В.Фёдоров, А.Л.Михайлов, Л.К.Антонюк, И.В.Шмелёв: «Экспериментальное исследование срывного разрушения капель и струй при их выбросе с поверхности жидкости»; ФГВ, 2016, т.52 ,№4.
20. А.В.Фёдоров, А.Л.Михайлов, С.А.Финюшин, Д.А.Калашников, Е.А.Чудаков, Е.И.Бутусов, И.С.Гнутов: «Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов»; ФГВ, 2016, т.149, вып. 2.

ВЛИЯНИЕ ЧИСТОТЫ, РАЗМЕРА ЗЕРНА И МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ УРАНА УГЛЕРОДОМ ИЛИ КРЕМНИЕМ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Е.А. Козлов, Д.П. Кучко, А.В. Ольховский, А.Е. Ширококов, Д.Г. Панкратов, А.К. Якунин

РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

В дополнение к ранее опубликованным результатам по влиянию квазистатического экструдирования нелегированного урана технической чистоты и его малолегированного молибденом сплава на прочностные свойства при квазистатическом и взрывном нагружении [1-4], в данной работе представлены постановки и результаты первых шести взрывных и ударно-волновых экспериментов по изучению прочностных характеристик образцов из высокочистого мелкозернистого урана, а также урана, микролегируемого углеродом С или кремнием Si, при их низкоинтенсивном нагружении ударом приставных ударников из АМц толщиной 0,5 и 1 мм. Для регистрации временных профилей скоростей $W(x,t)$ и перемещений $S(x,t)$ диагностируемых

участков свободной поверхности исследуемых образцов использовалась многоканальная лазерно-гетеродинная диагностика в семиканальном исполнении. Такой подход позволяет получить статистически представительные результаты в относительно небольшом количестве сравнительных взрывных экспериментов. Как и в металле технической чистоты и его малолегированном сплаве с молибденом, квазистатическое экструдирование, сопровождавшееся измельчением зерна и возрастанием прочностных характеристик при низкоскоростном деформировании, значимо не проявилось при взрывном и высокоинтенсивном ударно-волновом нагружении.

Исследования влияния квазистатического экструдированного нелегированного урана и его малолегированного сплава U-0,3%Mo на изменения среднего размера зерна и связанные с этим изменения прочностных свойств $\sigma_{0,2}$, σ_B при квазистатическом и Y , σ_{spall} взрывном нагружении были проведены и опубликованы в работах [1, 3].

Было показано, что несмотря на увеличение в 2 раза прочностных характеристик $\sigma_{0,2}$ и σ_B при квазистатическом нагружении, благодаря уменьшению среднего размера зерна с 200-250 мкм до 1-3 мкм, значимых изменений структуры, формы и параметров упругого предвестника, а также кинетики релаксации на нем напряжений, в мелкозернистом уране и сплаве U-0,3%Mo при взрывном нагружении не выявлено.

На рисунке 1 представлены фотохронограмма (а) и сохранившийся образец (б) из мелкозернистого урана, полученные в эксперименте по нагружению через урановый экран толщиной 2 мм скользящей детонацией слоя пластичного ВВ толщиной $h_{ВВ}=1,9$ мм, оптический рычаг $d=138,1$ мм.

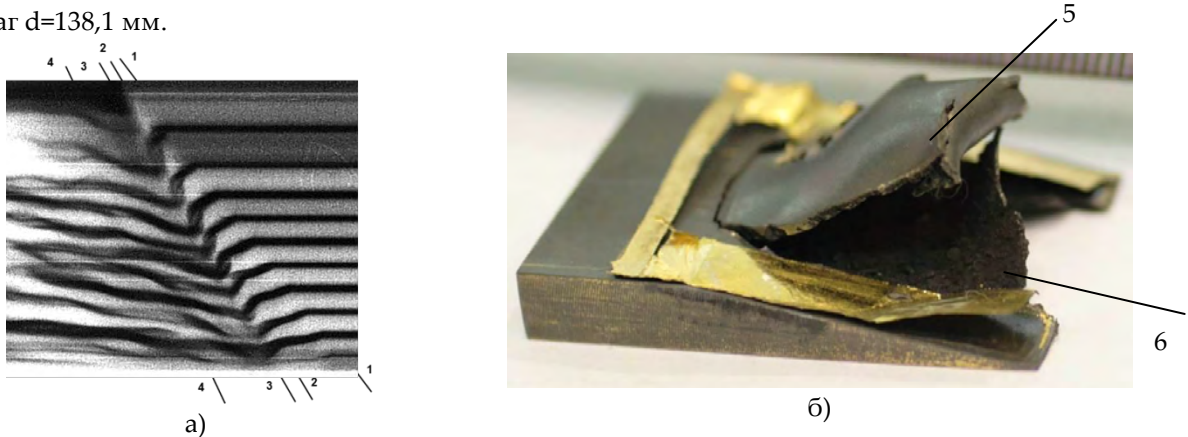


Рисунок 1. Линии: 1-1 – выход первой С₊-характеристики упругого предвестника на свободную поверхность образца; 2-2 – выход последней С₊-характеристики затянутого упругого предвестника на поверхность образца; 3-3 – траектория максимальных скоростей свободной поверхности; 4-4 – траектория откольных сигналов. 5 – отделившийся откол, 6 – поверхность разрушения

На рисунке 2 показаны результаты по релаксации напряжений на упругом предвестнике в литом крупнозернистом и квазистатически экструдированном мелкозернистом уране (а) и литом сплаве U с Mo (б) [3].

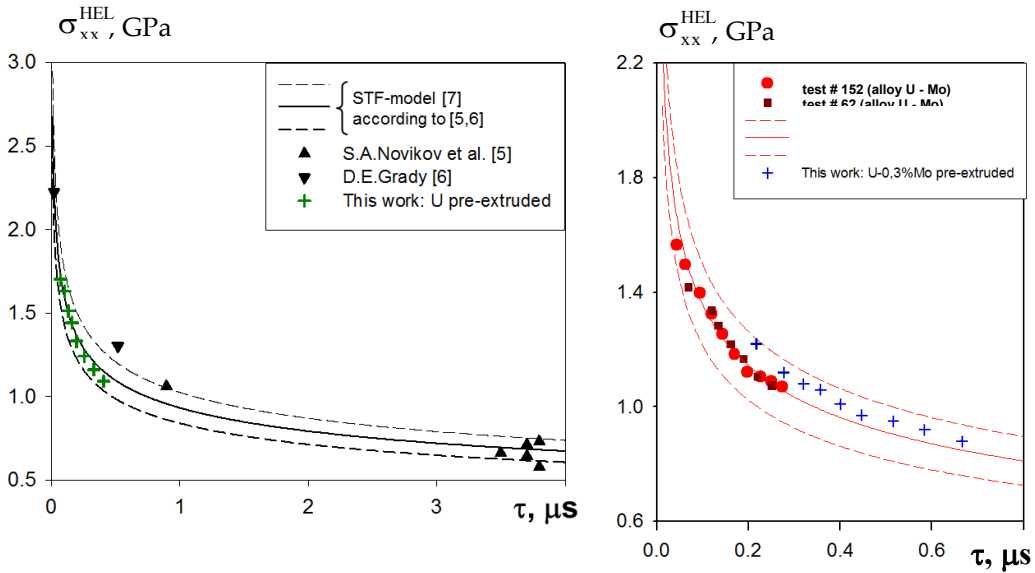


Рисунок 2. Релаксация напряжений на упругом предвестнике

Ниже приведены (рисунок 3) сравнительные данные по откольной прочности экструдированного урана и сплава U-0,3%Mo, а также литого сплава U с Mo при низко- и высокоинтенсивном взрывном нагружении [3].

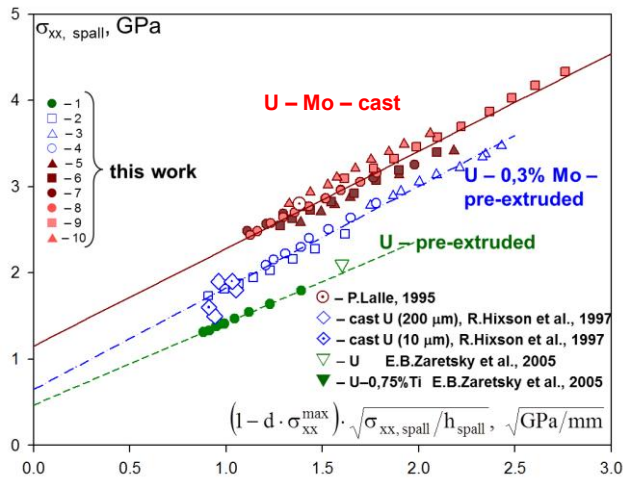


Рисунок 3. Зависимость величины растягивающих напряжений в плоскости откола $\sigma_{xx,spall}$ от градиента напряжений в импульсе растяжения $(\sigma_{xx,spall}/h_{spall})^{1/2}$ и амплитуды предшествующего растяжению ударно-волнового сжатия σ_{xx}^{max}

При изучении сохраненных образцов методом СЭМ [4] при реализованном режиме взрывного нагружения выявлено зарождение и развитие откольных и сдвиговых повреждений на неметаллических включениях – оксикарбонитридах, содержание которых в объеме исследованной заготовки было оценено равным $1,5 \pm 0,2$ об%. Как правило, в начале всех зарегистрированных трещин присутствуют включения (Рис. 5а), либо след от выпавшего включения (Рис. 5б).

Ранее при изучении откольного разрушения крупнозернистого литого урана при нормальной температуре и низкоинтенсивном ударно-волновом нагружении с характерной длительностью импульса нагрузки 1,5 мкс также отмечалось, что зарождение откольных трещин происходило, в основном, возле карбонитридных включений. В меньшей мере наблюдалось зарождение микротрещин вдоль двойников и межзеренное растрескивание.

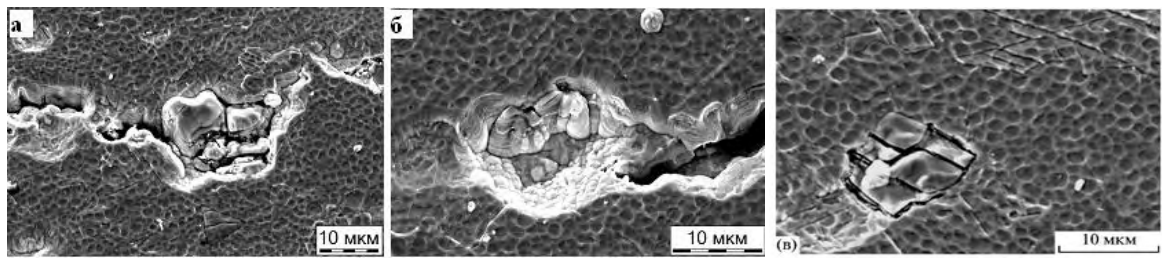


Рисунок 5. Влияние включений на прочность материала, СЭМ. а – включение в начале трещины, б – след от включения в начале трещины, в – разрушенное включение

По результатам исследований влияние квазистатического экструдирования урана и сплава U-0,3%Mo с целью дальнейшего уменьшения среднего размера зерен и улучшения их прочностных характеристик был сделан вывод о:

- необходимости более глубокой очистки материала до его квазистатического экструдирования с целью дальнейшего уменьшения среднего размера зерен и улучшения прочностных характеристик не только при квазистатическом, но и при взрывном нагружении;
- целесообразности дальнейшего совершенствования диагностических методик в части повышения их временного, пространственного и амплитудного разрешения по скорости движения свободной поверхности образцов.

Представляло интерес получить данные по сдвиговой и откольной прочности материала трех заготовок при их низко- и высокоинтенсивном ударно-волновом нагружении для сопоставления с имеющимися данными:

- квазистатически экструдированному мелкозернистому нелегированному урану и сплаву U-0,3%Mo [1, 3],
- квазистатически экструдированному урану [4].

Цель исследования

Получение с использованием многоканальной лазерно-гетеродинной методики новых сравнительных данных по сдвиговой и откольной прочности образцов из высокочистого мелкозернистого урана, а также урана, микролегированного углеродом или кремнием, при их нагружении в низком диапазоне продольных напряжений – области существования в них двухволновой упруго-вязко-пластической конфигурации и реализации откольных повреждений.

Исследуемые материалы

Исследуемые образцы были изготовлены из заготовок высокочистого мелкозернистого урана, в котором сумма массовых долей примесей составила $22 \cdot 10^{-3}\%$, а также урана, микролегированного углеродом ($84 \cdot 10^{-3}\%$) или кремнием ($130 \cdot 10^{-3}\%$). Увеличение долей примесей в случае второй и третьей заготовок привело к снижению плотности материала примерно на 1%.

По результатам статических испытаний физико-механических характеристик заготовок, проведенных предприятием-изготовителем, отметим, что:

- средние значения условных пределов упругости при квазистатическом растяжении составляли в относительном виде 1, 1,29 и 1,43;
- средние значения $\sigma_{0,2}$ для высокочистого мелкозернистого урана превышало аналогичную характеристику нелегированного урана примерно в 3 раза(!);
- средние значения пределов прочности при статическом растяжении для образцов из высокочистого урана и урана, легированного углеродом, совпадали, а для образцов, легированных кремнием, были выше в 1,25 раза;
- средние значения $\sigma_{ВРСТ}$ для высокочистого мелкозернистого урана превышало аналогичную характеристику нелегированного урана примерно в 3 раза(!).

Образцы и условия их ударно-волнового нагружения

Были изготовлены образцы размерами – $\varnothing 30 \times 3$ мм и $\varnothing 30 \times 5$ мм. Все образцы были подвергнуты шлифованию и полированию. До проведения взрывных экспериментов образцы хранились в гермоконтейнере в среде сухого аргона.

Ударно-волновое нагружение образцов осуществлялось высокоскоростным ударом ($W=2,55$ км/с) тонких приставных ударников из алюминиевого сплава АМц. Ударники разгонялись в воздухе через экран из стали 12Х18Н10Т толщиной 5 мм и основным зарядом октогенсодержащего ВВ $\varnothing 60 \times 20$ мм. В качестве генератора плоской волны использовалась взрывная линза $\varnothing 60$ мм с пенопластовой проставкой.

Результаты измерений многоканальной лазерно-гетеродинной методики

В работе использовались два четырехканальных лазерно-гетеродинных модуля. В качестве источника излучения использовался оптоволоконный лазер, генерирующий излучение на длине волны 1550 нм и шириной спектральной линии <1 кГц. Детектирование гетеродинных сигналов осуществлялось при помощи быстродействующих фотодетекторов, выходные сигналы с которых регистрировались 4-х канальным осциллографом.

Профили скоростей и перемещений свободной поверхности образцов приведены в таблице. В таблице 2 представлены расчеты уровней откольных напряжений в приближениях Забабахина.

Таблица 1. Профили скоростей и перемещений свободной поверхности образцов при реализованных условиях их ударно-волнового нагружения

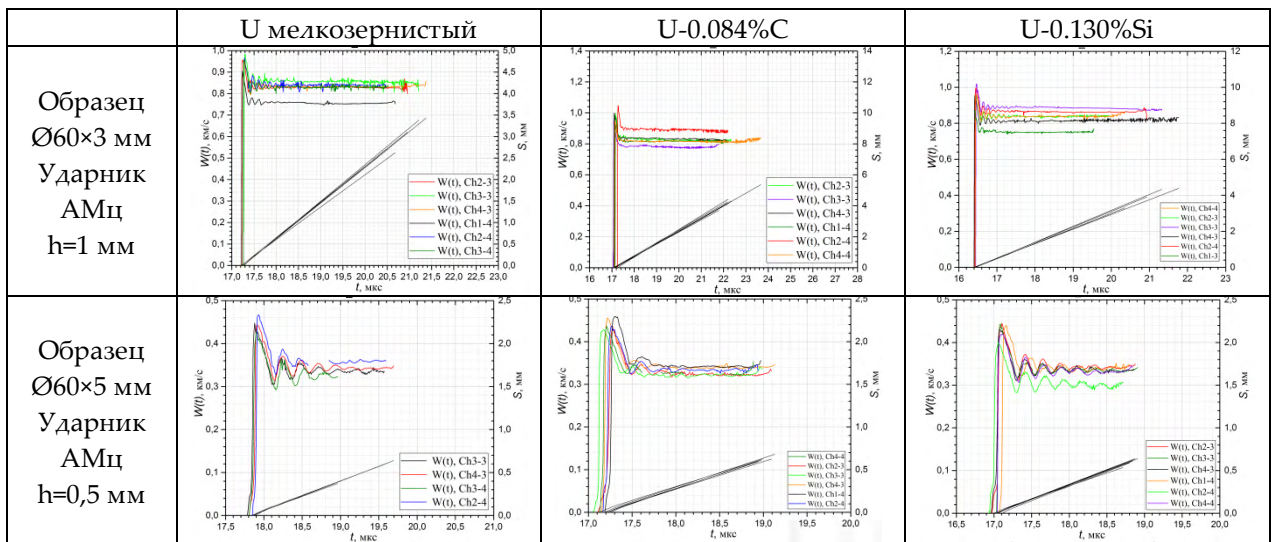


Таблица 2. Абсолютные ($\pm 2\sigma$) и относительные данные по откольной прочности

		U мелкозернистый	U-0.084%C	U-0.130%Si
Образец $\varnothing 60 \times 3$ мм Ударник АМц h=1 мм	$\sigma_{spall1} / \sigma_{spall1}^{max}$	1	0.95	0.97
Образец $\varnothing 60 \times 5$ мм Ударник АМц h=0,5 мм	$\sigma_{spall1} / \sigma_{spall1}^{max}$	1	0.82	0.91

Выводы

- Приведены постановки и первые результаты лазерно-гетеродинной диагностики откольного разрушения образцов $\varnothing 30 \times 5$ и $\varnothing 30 \times 3$ мм из высокочистого мелкозернистого урана, а также урана, микролегированного углеродом и кремнием при их нагружении ударом приставных ударников из АМц толщиной 0,5 и 1 мм.

- Отмечена тенденция к снижению откольной прочности мелкозернистого высокочистого урана при его микролегировании углеродом и кремнием. При реализованных условиях ударно-волнового нагружения отличия в величине спада скорости, характеризующей способность материала сопротивляться действию растягивающих напряжений, при микролегировании образцов углеродом и кремнием находятся на уровне 2σ -интервала измерений ΔW .
- Будет продолжено исследование влияния чистоты, размера зерна и микролегирования урана на прочностные характеристики при разных режимах взрывного и ударно-волнового нагружения, а также проведение взрывных экспериментов с использованием, оконных материалов для получения новых данных по откольной прочности урана.

Список литературы

1. Е.А.Козлов, Д.Г.Панкратов, В.И.Таржанов, И.В.Теличко, Релаксация упругого предвестника при взрывном нагружении предварительно квазистатически экструдированного мелкозернистого нелегированного урана// ДАН, 2008, том 421, № 3, с. 332-334 [Doklady Physics (Engl. transl.), 2008, Vol. 53, No. 7, pp.368-370].
2. Е.А.Козлов, Д.Г.Панкратов, В.И.Таржанов, И.В.Теличко, Динамическая сдвиговая и откольная прочности предварительно квазистатически экструдированных мелкозернистого урана и сплава U – 0,3% Мо// ДАН, 2009, том 424, № 6, стр. 769-773 [Doklady Physics (Engl. transl.), 2009, Vol. 54, No. 2, pp.88-92].
3. Е.А.Козлов, Д.Г.Панкратов, В.И.Таржанов, И.В.Теличко, Динамическая сдвиговая и откольная прочности предварительно квазистатически экструдированных мелкозернистого урана и сплава U – 0,3% Мо// ФММ, 2009, том 108, № 4, стр.424–438 [The Physics of Metals and Metallography 10/2009; 108(4):401-414].
4. Е.А.Козлов, С.В.Бондарчук, Ю.Н.Зуев, С.М.Новгородцев, Механизмы высокоскоростной деформации и разрушения мелкозернистого нелегированного урана при взрывном нагружении// ФММ, 2011, т.111, вып.4, стр.428-438 [The Physics of Metals and Metallography (Engl. transl.), 2011, Vol. 111, No. 4, pp.410-420].

EFFECT OF PURITY, GRAIN SIZE, AND CARBON-OR-SILICON MICROALLOYING OF URANIUM ON ITS STRENGTH CHARACTERISTICS UNDER QUASI-STATIC AND SHOCK-WAVE LOADING

E.A. Kozlov, D.P. Kuchko, A.V. Olkhovsky, A.E. Shirobokov, D.G. Pankratov, A.K. Yakunin

RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia

In addition to earlier published results how quasi-static extrusion of unalloyed technical-purity uranium and its lean molybdenum alloy influences strength characteristics under the quasi-static and explosive loading [1-4], this paper presents experimental setups and results of explosive and shock-wave experiments to study strength characteristics of the high-purity fine-grained uranium samples, as well as the C-or-Si microalloyed uranium samples under low-intensity loading by adjacent AMTs aluminum alloy impactors having 0.5 and 1 mm thicknesses. The multi-channel PDV diagnostics in the seven-channel configuration was used to record profiles of time-dependent velocity $W(x,t)$ and time-dependent displacements $S(x,t)$ of examined free-surface portions on the samples. This approach allows that few comparative explosive experiments can give statistically representative results. Just as in the technical-purity metal and its lean molybdenum alloy, quasi-static extrusion, accompanied by grain refinement and strength characteristics improvement under low-rate deformation, was not observed to seriously manifest itself under explosive and high-intensity shock-wave loading.