

УДК 529.4.019

ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УРАНА И ЕГО СПЛАВА С МОЛИБДЕНОМ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ОДНООСНОМ СЖАТИИ, РАСТЯЖЕНИИ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. П. Большаков, А. С. Гирин, С. А. Новиков,
В. А. Пушков, В. А. Сеницын

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены систематизированные результаты исследований динамических диаграмм одноосного сжатия и растяжения урана-238 и его сплава с молибденом при различных скоростях деформации и температурах. Наличие таких данных позволяет строить зависимости напряжения при одноосном растяжении-сжатии от деформации, скорости деформации и температуры и создавать математические модели, наиболее полно отражающие реальное поведение материала при различных условиях нагружения.

Введение. Интенсивное изучение свойств урана связано с началом создания ядерного оружия [1–3]. В [1–3] содержится большое количество данных о статических механических свойствах урана и его сплавов. Установлено, что некоторые физические свойства урана почти не зависят от его чистоты, микроструктуры и способа обработки. К таким свойствам относятся плотность, теплоемкость, теплопроводность и др. [1, 2]. Для трех имеющихся аллотропических модификаций урана выявлены следующие температуры фазовых превращений: 670; 770; 1130 °С [3].

Механические же свойства урана существенно анизотропны и сильно зависят от характера термомеханической обработки и массовой доли примесей. Поликристаллический уран имеет крупнозернистую структуру (размер зерен достигает 3 мм) и обладает всеми механизмами пластической деформации металлов, в частности такими, как двойникование, скольжение, образование полос излома [1–3]. По данным [3], при статическом растяжении и температуре 20 °С предел текучести урана может меняться от 180 до 600 МПа. Особенностью урана является вязкий характер деформирования, нелинейное сопротивление деформации, ползучесть при повышенных температурах. Высокая чувствительность урана к различным факторам является причиной значительного отличия результатов исследований разных авторов.

Легирование урана таким элементом, как молибден, приводит к заметному измельчению зерен, улучшению микроструктуры, повышению и стабилизации прочностных свойств. Максимальное увеличение прочностных характеристик сплавов обнаружено при массовой доле молибдена 5–6 % [1–3]. Увеличение массовой доли молибдена приводит к росту сопротивляемости сплавов коррозии и ползучести.

Получен также ряд данных о динамических механических свойствах, например результаты сложных экспериментов по ударной сжимаемости и откольной прочности урана при ударно-волновом нагружении. Кроме того, в условиях динамического нагружения при разных скоростях деформации и температурах (но, как правило, без вариации одного из

этих параметров) определены остаточное удлинение при разрыве [3–5], предел текучести [4, 6], предел прочности [5] урана и некоторых его сплавов. Вместе с тем имеющиеся данные о динамических диаграммах деформирования σ – ε урана носят отрывочный характер и получены без вариации температур [3, 4]. Не исследованы также или отсутствуют сведения о ряде других характеристик урана при динамическом нагружении, в частности об эффекте Баушингера и трещиностойкости.

1. Методика испытаний. Использовался известный метод составных стержней Гопкинсона (ССГ), который в настоящее время нашел широкое применение при динамических испытаниях материалов при сжатии, растяжении, кручении, одновременном кручении и сжатии (растяжении) [7, 8]. Кроме того, компактная схема метода оказалась удобной для испытаний токсичных и радиоактивных материалов [9]. Основная характеристика этого метода — постоянство скорости деформации в опытах $\dot{\varepsilon} = \text{const}$, что является несомненным преимуществом для осуществления различного рода обработки результатов включая сравнительный анализ и моделирование.

В настоящей статье остановимся лишь на особенностях методики [9]. Возбуждение импульса давления на свободном торце нагружающего стержня осуществлялось взрывным способом при обжатии перфорированного демпфера из сплава алюминия с марганцем. Импульсы давления имели длительность 120–200 мкс и форму, близкую к трапеции, с фронтом нарастания 40–50 мкс. При этом возникающие волны напряжений имели длину 600–1000 мм, что намного превышает длину образца [10]. Варьирование скорости деформации производилось изменением геометрии демпфера и массы взрывчатки.

В опытах на сжатие реализована классическая схема испытаний, впервые предложенная Г. Кольским. Испытывались образцы в виде сплошного цилиндра $a \times b = 8 \times 8$ мм (a — диаметр, b — длина), нагружающий и опорный стержни были изготовлены из закаленной стали ШХ15 $a \times b = 12 \times 600$ мм. Расчетным путем установлено, что при указанном соотношении диаметра и длины образца распределение напряжений по его сечениям близко к однородному.

В опытах на динамическое растяжение использовались нагружающий стержень из закаленной стали 30ХГСА $a \times b = 13,6 \times 500$ мм и опорный из той же стали в форме трубки $a \times b = 20 \times 400$ мм. Образцы реверсивного типа имели форму наперстка $a \times b = 20 \times 18$ мм (длина рабочей части 10 мм, толщина 1 мм).

Эксперименты при повышенных температурах до 600 °С проводились с применением малогабаритной электропечи, размещенной в общем кожухе со стержнями [9]. Особенностью является нагрев образца на удалении от мерных стержней порядка 150 мм. По достижении требуемой температуры образец дистанционно приводится в рабочее положение между стержнями и автоматически нагружается. При этом время задержки от момента контакта образца со стержнями до начала нагружения составляет примерно 0,02 с. За это время благодаря наличию контактного термического сопротивления температурное поле образца практически не меняется. Для создания равномерного температурного поля образца между ним и спиралями нагрева устанавливался медный экран и при заданной температуре опыта производилась выдержка образца в течение 5–7 мин. Температура нагрева контролировалась хромель-копелевой термопарой. При мощности электропечи 1 кВт скорость нагрева составляла примерно 1 °С/с [10].

Эксперименты с нагревом выполнялись только при динамическом сжатии. В опытах на растяжение образцы имели большой вес и сложную конфигурацию, что не позволяло проводить температурные испытания в описанной постановке с дистанционной доставкой нагретых образцов в рабочее положение.

Отметим, что без значительных поправок на изменение упругих свойств материала стержней возможны испытания со стационарным нагревом образца в печи до 200–400 °С

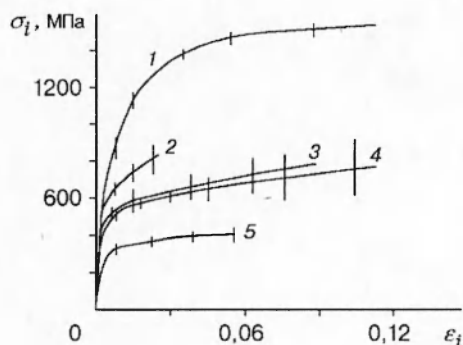


Рис. 1. Диаграммы динамического сжатия урана:

1 — $\dot{\epsilon} = 1300 \div 1600 \text{ c}^{-1}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 — $\dot{\epsilon} = 100 \div 420 \text{ c}^{-1}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 — $\dot{\epsilon} = 520 \div 1040 \text{ c}^{-1}$, $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 — $\dot{\epsilon} = 160 \div 1440 \text{ c}^{-1}$, $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; 5 — $\dot{\epsilon} = 540 \div 890 \text{ c}^{-1}$, $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$

в рабочем положении между стержнями [10, 11]. Однако в опытах на динамическое растяжение рабочая часть образца по отношению к печи располагается между сплошным нагружающим и трубчатым опорным стержнями, что значительно затрудняет как прямое, так и расчетное определение температуры образца.

Диаграммы σ – ϵ строились исходя из соотношений теории упругих волн напряжений обработкой импульсов деформаций, зарегистрированных на стержнях [7, 10]. Погрешность определения напряжений и деформаций по описанному методу составляет около 12% [10].

2. Результаты исследований. В данной статье под скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ подразумевается ее значение на пластическом участке диаграмм деформирования. Сами диаграммы деформирования приведены в координатах интенсивность напряжений — интенсивность деформаций σ_i – ϵ_i и получены из диаграмм σ – ϵ в условных координатах пересчетом по известным зависимостям [12], учитывающим изменение эффективного коэффициента Пуассона μ в области упругопластического перехода:

$$\sigma_i = \sigma / [1 - \mu' \ln(1 + \epsilon)]^2, \quad \epsilon_i = (2/3) (1 + \mu') \ln(1 + \epsilon),$$

где $\mu' = 1/2 - (1/2)(\sigma/(E\epsilon))(1 - 2\mu)$.

Указанные на диаграммах σ_i – ϵ_i разбросы значений σ_i , а также интервалы разброса средних значений динамических пределов текучести $\sigma_{-0,2}$, $\sigma_{+0,2}$ и прочности σ_{+B} определены с доверительной вероятностью 0,95.

Сжатие урановых образцов. В опытах на динамическое сжатие испытывались образцы, изготовленные из литых стержней. Температура испытаний $T = 20 \div 400 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость деформации $\dot{\epsilon} = 100 \div 1600 \text{ c}^{-1}$. На рис. 1 представлены усредненные диаграммы сжатия σ_i – ϵ_i урана при различных T и $\dot{\epsilon}$. Диаграммы усреднены по результатам 4–9 опытов.

На рис. 1 видно, что при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ диаграммы σ_i – ϵ_i имеют нелинейный характер, а динамическое деформационное упрочнение существенно зависит от $\dot{\epsilon}$. Предел текучести слабо зависит от $\dot{\epsilon}$. Аналогичные данные, полученные Мейденом для литого урана при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, приведены в [3].

В опытах при $T \geq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ для урана обнаружена потеря устойчивости процесса равномерной пластической деформации, при котором на образующих поверхностях образцов появлялись дефекты типа «апельсиновой корки». Согласно [13] такие дефекты появляются на образцах из металлов с размерами зерен более 50 мкм. Микроструктурные исследования урановых образцов показали, что средний размер зерен составляет 0,2 мм. Деформация материала происходила как двойникованием, так и скольжением со сложным характером их распределения по объему образца. Вследствие потери устойчивости диаграммы сжатия и пределы текучести фактически не зависят от $\dot{\epsilon}$ и имеют значительный экспериментальный разброс. В то же время с повышением температуры деформационное упрочнение урана уменьшается и нелинейность диаграмм снижается (рис. 1).

Усредненные значения динамических пределов текучести $\sigma_{-0,2}$ урана, соответствующие диаграммам 1–5 на рис. 1, составляют (660 ± 80) , (565 ± 42) , (446 ± 48) , (440 ± 30) ,

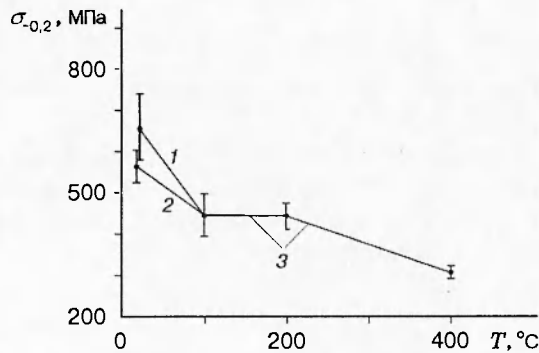


Рис. 2

Рис. 2. Температурная зависимость динамического предела текучести $\sigma_{-0,2}$ урана:
 1 — $\dot{\epsilon} = 1300 \div 1600 \text{ с}^{-1}$; 2 — $\dot{\epsilon} = 100 \div 420 \text{ с}^{-1}$; 3 — $\dot{\epsilon} = 160 \div 1440 \text{ с}^{-1}$

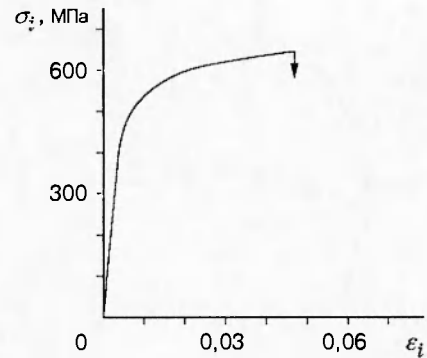


Рис. 3

Рис. 3. Диаграмма динамического растяжения урана при $T \cong 0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\dot{\epsilon} = 1000 \text{ с}^{-1}$

(300 ± 13) МПа. Температурная зависимость динамического предела текучести представлена на рис. 2.

Данных о статическом сжатии урана, в частности при различных температурах, в литературе мало. Лишь в [1], по данным зарубежных авторов, в пределах $100\text{--}750 \text{ }^\circ\text{C}$ для урана с двумя степенями предварительной деформации отмечено: $\sigma_{-0,2} = 620 \div 770 \text{ МПа}$ при $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; $\sigma_{-0,2} = 480 \div 665 \text{ МПа}$ при $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; $\sigma_{-0,2} = 270 \div 370 \text{ МПа}$ при $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Отметим, что для литого урана при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\dot{\epsilon} = 1000 \text{ с}^{-1}$ значение $\sigma_{-0,2} = 670 \text{ МПа}$, полученное в [6] методом ССГ, хорошо согласуется с нашими данными, а в [3] значение $\sigma_{-0,2} = 380 \text{ МПа}$ (определено нами из диаграмм $\sigma\text{--}\epsilon$) отличается в 1,7 раза.

Растяжение урановых образцов. В опытах на динамическое растяжение испытывались образцы из литых стержней. При $T \cong 0 \text{ }^\circ\text{C}$ скорость деформации составила 1000 с^{-1} . На рис. 3 представлена усредненная по пяти опытам диаграмма растяжения $\sigma_i\text{--}\epsilon_i$. Аналогично опытам на сжатие (см. рис. 1) диаграмма растяжения на рис. 3 показывает нелинейное сопротивление деформации. В указанных условиях нагружения пластичность урана относительно мала, и при деформации 4,0–4,2% образцы разрываются. При этом средние значения предела текучести $\sigma_{+0,2} = (470 \pm 78) \text{ МПа}$, предела прочности $\sigma_{+в} = (650 \pm 83) \text{ МПа}$. Для урана из этой же партии заготовок при статическом растяжении и $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ получено: $\sigma_{+0,2} = 350 \text{ МПа}$, $\sigma_{+в} = 606 \text{ МПа}$, остаточное удлинение при разрыве $\delta = 5,3\%$.

По данным [1, 3], при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и статическом растяжении для урана $\sigma_{+0,2} = 180 \div 600 \text{ МПа}$, $\sigma_{+в} = 380 \div 1000 \text{ МПа}$, $\delta = 1,2 \div 35\%$.

Данные о динамическом растяжении урана приведены в [3, 4]. В [3] для прокатанного и затем отожженного α -урана приведены значения δ при $T = 20 \div 250 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\dot{\epsilon} = 150 \text{ с}^{-1}$. По данным [3], при нормальной температуре $\delta = 4 \div 8\%$. В [4] для α -урана в состоянии поставки и отожженном состоянии при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \div 2,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ получены диаграммы растяжения $\sigma\text{--}\epsilon$. Эксперименты при $\dot{\epsilon} > 5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ проведены по методу ССГ. Диаграммы имеют нелинейный характер. Согласно [4] для указанных материалов при $\dot{\epsilon} = 1400 \div 1600 \text{ с}^{-1}$ предел текучести $\sigma_{+0,2} = 500 \div 650 \text{ МПа}$, а остаточное удлинение $\delta = 12 \div 18\%$ (при этом значения, вычисленные по кривым $\delta = \delta(\dot{\epsilon})$, могут различаться в 1,7 раза).

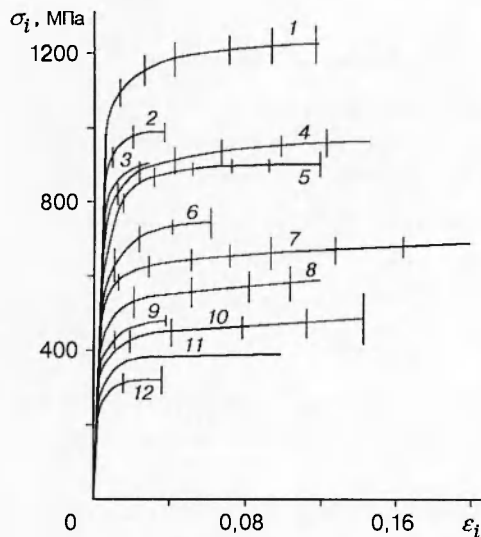


Рис. 4

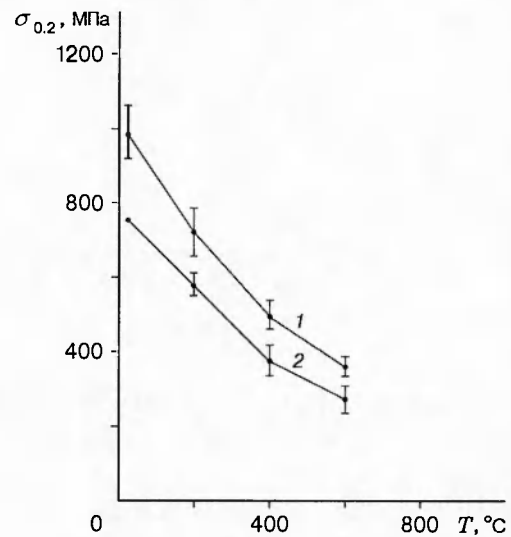


Рис. 5

Рис. 4. Диаграммы динамического сжатия сплава урана с молибденом (массовая доля 1,3 %):

1 — $\dot{\epsilon} = 1000 \div 1400 \text{ с}^{-1}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 — $\dot{\epsilon} = 600 \div 880 \text{ с}^{-1}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 — $\dot{\epsilon} = 280 \div 360 \text{ с}^{-1}$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 — $\dot{\epsilon} = 1300 \div 1800 \text{ с}^{-1}$, $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; 5 — $\dot{\epsilon} = 800 \div 1100 \text{ с}^{-1}$, $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; 6 — $\dot{\epsilon} = 350 \div 510 \text{ с}^{-1}$, $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$; 7 — $\dot{\epsilon} = 1200 \div 1700 \text{ с}^{-1}$, $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$; 8 — $\dot{\epsilon} = 800 \div 1000 \text{ с}^{-1}$, $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$; 9 — $\dot{\epsilon} = 200 \div 520 \text{ с}^{-1}$, $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$; 10 — $\dot{\epsilon} = 1200 \div 1400 \text{ с}^{-1}$, $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$; 11 — $\dot{\epsilon} = 850 \div 1000 \text{ с}^{-1}$, $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$; 12 — $\dot{\epsilon} = 200 \div 500 \text{ с}^{-1}$, $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 5. Температурная зависимость динамического предела текучести $\sigma_{-0,2}$ сплава урана с молибденом (массовая доля 1,3 %):

1 — $\dot{\epsilon} = 1000 \div 1800 \text{ с}^{-1}$; 2 — $\dot{\epsilon} = 200 \div 520 \text{ с}^{-1}$

Приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что нестабильность механических свойств при сжатии и растяжении урана, характерная для статических испытаний, проявляется и при динамических испытаниях. При этом наблюдается нелинейное сопротивление урана пластической деформации.

Сжатие образцов из сплава урана с молибденом. В опытах на динамическое сжатие испытывались образцы из сплава урана с молибденом (массовая доля 1,3 %), изготовленные из литых стержней. Температура испытаний $T = 20 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость деформации $200 \div 1800 \text{ с}^{-1}$. На рис. 4 представлены усредненные диаграммы сжатия $\sigma_i - \epsilon_i$ сплава при различных T и $\dot{\epsilon}$. Каждая диаграмма усреднена по результатам 2–6 опытов. В случае двух опытов определялось среднеарифметическое значение. Диаграммы $\sigma_i - \epsilon_i$ сплава при $T = 20 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$ на пластическом участке имеют слабонелинейный характер, менее выраженный, чем у урана (см. рис. 1). При $T = 400 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$ нелинейность не проявляется. Динамическое деформационное упрочнение сплава с ростом температуры уменьшается, а при $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ практически отсутствует. Усредненные значения динамических пределов текучести $\sigma_{-0,2}$ сплава, соответствующие диаграммам 1–12 на рис. 4, составляют (990 ± 70) , (868 ± 54) , 760, (720 ± 67) , (665 ± 18) , (580 ± 30) , (500 ± 35) , (426 ± 52) , (370 ± 40) , (360 ± 26) , 330, (275 ± 35) МПа. На рис. 5 приведены зависимости $\sigma_{-0,2}$ от температуры, показывающие в целом линейное уменьшение $\sigma_{-0,2}$ с ростом T .

Следует отметить, что эксперименты проводились в трех диапазонах скоростей деформации: $\dot{\epsilon} = 200 \div 520$; $600 \div 1000$; $1000 \div 1800 \text{ с}^{-1}$, в которых проявлялись характерные

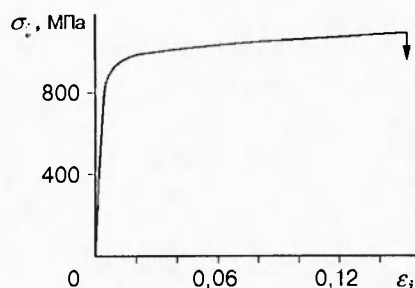


Рис. 6. Диаграмма динамического растяжения сплава урана с молибденом (массовая доля 1,3 %) при $T \cong 0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\dot{\epsilon} = 1200 \text{ c}^{-1}$

свойства сплава. На рис. 5 приведены зависимости в 1-м и 3-м диапазонах (кривые 2 и 1 соответственно), зависимость во 2-м диапазоне занимает среднее положение и на рис. 5 не приведена.

Из полученных результатов следует, что при каждой температуре испытаний с ростом $\dot{\epsilon}$ от 1-го диапазона ко 2-му и от 2-го к 3-му величина $\sigma_{-0,2}$ возрастает в 1,1–1,2 раза, что говорит о линейной зависимости $\sigma_{-0,2}$ от $\dot{\epsilon}$.

В литературе характеристик сплавов урана с молибденом при статическом сжатии не обнаружено. Однако при статическом растяжении и $T = 20 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. [14]) для сплава урана с молибденом (массовая доля 9,2 %) уменьшение $\sigma_{+0,2}$ с ростом T имеет в целом линейный характер. При динамическом растяжении с $\dot{\epsilon} = 20 \div 100 \text{ c}^{-1}$ и $T = 20 \div 320 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. [5]) для различно изготовленных сплавов урана с молибденом (массовая доля 10 %) $\sigma_{+в}$ линейно растет и линейно уменьшается с ростом $\dot{\epsilon}$ и T соответственно. Таким образом, данные [5, 14] хорошо согласуются с нашими данными (рис. 5).

Данные о динамическом сжатии сплава урана с молибденом приведены в [6]. Здесь для литого сплава с молибденом (массовая доля 2,2 %) при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\dot{\epsilon} = 1000 \text{ c}^{-1}$ получено значение $\sigma_{-0,2} = 1050 \text{ МПа}$, что также хорошо согласуется с нашими данными.

Растяжение образцов из сплава урана с молибденом. В опытах на динамическое растяжение испытывались образцы из сплава урана с молибденом (массовая доля 1,3 %), также изготовленные из литых стержней. При $T \cong 0 \text{ }^\circ\text{C}$ скорость деформации составила 1200 c^{-1} . На рис. 6 представлена усредненная по четырем опытам диаграмма растяжения $\sigma_i - \epsilon_i$, на которой участок пластического деформирования обладает линейным упрочнением. В указанных условиях образцы разрывались при $\delta = 15 \%$, при этом средние значения предела текучести $\sigma_{+0,2} = (900 \pm 56) \text{ МПа}$, предела прочности $\sigma_{+в} = (1080 \pm 62) \text{ МПа}$. При статическом растяжении и $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ для сплава из этой же партии заготовок $\sigma_{+0,2} = 620 \text{ МПа}$, $\sigma_{+в} = 910 \text{ МПа}$, $\delta = 19 \%$.

Согласно [15] для сплавов урана с близким содержанием молибдена (массовая доля 2 %), но различного состава и разной термической обработки при статическом растяжении и $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\sigma_{+0,2} = 400 \div 1350 \text{ МПа}$, $\sigma_{+в} = 770 \div 1350 \text{ МПа}$, $\delta = 0,2 \div 21 \%$. В [5] при аналогичных условиях статического нагружения для сплава урана с молибденом (массовая доля 10 %) $\sigma_{+в} = 820 \div 1180 \text{ МПа}$, $\delta = 5 \div 23 \%$.

Данные о динамическом растяжении сплава урана с молибденом при различных $\dot{\epsilon}$ и T приведены, как уже отмечалось, в [5]. В частности, для сплава с молибденом (массовая доля 10 %) при $\dot{\epsilon} = 100 \text{ c}^{-1}$ получено: $\sigma_{+в} = 1610 \text{ МПа}$, $\delta = 6,3 \%$ при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma_{+в} = 1200 \text{ МПа}$, $\delta = 9 \%$ при $T = 320 \text{ }^\circ\text{C}$.

Заключение. Авторами получены экспериментальные данные о динамических механических свойствах литого урана и его сплава с молибденом, представляющих научно-практический интерес. Установлено, что при динамическом сжатии у сплава при $T = 20 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$ в отличие от нелегированного урана при $T = 100 \div 400 \text{ }^\circ\text{C}$ предел текучести зависит от $\dot{\epsilon}$.

Приведенные данные об уране и его сплавах с молибденом показывают, что присадка молибдена увеличивает прочностные свойства урана как при статическом, так и при динамическом растяжении или сжатии. Кроме того, при одинаковых температурно-скоростных условиях нагружения сплавы обладают более стабильными механическими свойствами, что подтверждается, например, характером полученных авторами диаграмм деформирования $\sigma_i-\varepsilon_i$.

Поскольку в практике наиболее критичным в большинстве случаев является растяжение, то необходимо расширить знания о динамических диаграммах растяжения урана и его сплавов, в частности при повышенных температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов В. С., Евстюхин А. И. *Металлургия ядерного горючего*. М.: Атомиздат, 1968.
2. Холден А. Н. *Физическое металловедение урана*. М.: Metallurgizdat, 1962.
3. Сокурский Ю. Н., Стерлин Я. М., Федорченко В. А. *Уран и его сплавы*. М.: Атомиздат, 1971.
4. Huddart J., Harding J., Bleasdale P. The effect of strain rate on the tensile flow and fracture of α -uranium // *J. Nuclear Materials*. 1980. V. 89, N 3/4. P. 316-330.
5. Hoge K. G. Some mechanical properties of uranium-10 weight percent molybdenum alloy under dynamic tension loads // *J. Basic Engng. Ser. D*. 1966. V. 88, N 2. P. 509-517.
6. Buchar J., Rolc S., Pechacek J., Krejci J. Behaviour of uranium alloys at high loading rates // *Proc. of the Intern. conf. DYMAT-91*. Strasbourg: Les Ed. de Phys., 1991. V. 1. P. C3/197-C3/202.
7. Музыченко В. П., Кащенко С. И., Гуськов В. А. Применение составного стержня Гопкинсона при исследовании динамических свойств материалов: Обзор // *Завод. лаб.* 1986. № 1. С. 58-66.
8. Albertini C., Montagnani M., Pizzinato E., et al. Mechanical properties in shear at very high strain rate of AISI 316 stainless steel and of a pure iron comparison with tensile properties // *Proc. of the Intern. conf. EXPLOMET-90*, San Diego, Aug. 12-16, 1990. N. Y.: Marcel Dekker, 1992. P. 681-691.
9. Новиков С. А., Диденко В. Г., Пушков В. А. и др. Меры защиты при проведении исследований физико-механических свойств радиоактивных материалов // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Физика ядер. реакторов*. 1994. Вып. 2. С. 36-38.
10. Квасков Г. А., Новиков С. А., Пушков В. А. и др. Механические свойства урана при квазистатическом и ударно-волновом нагружении. Саров, 1997. (Препр. / Ядерный центр РФ: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики; № 54-97).
11. Лошманов Л. П., Нечаева О. А., Руднев В. Д. Высокоскоростные испытания при повышенных температурах // *Завод. лаб.* 1996. № 5. С. 40-42.
12. Малинин Н. Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. М.: Машиностроение, 1975.
13. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. *Механические свойства металлов*. М.: Metallurgia, 1979.
14. Иванов О. С. *Строение и свойства сплавов урана, тория и циркония* // *Сборник статей*. М.: Госатомиздат, 1963. С. 138-143.
15. Сокурский Ю. Н. *Материалы для ядерных реакторов: Пер. с англ.* М.: Госатомиздат, 1963.