

Динамическое интерметаллидное старение при механическом сплавлении урана и железа

К.А. Козлов, В.А. Шабашов, Н.В. Катаева, В.В. Сагарадзе, В.П. Пилюгин, А.Е. Заматовский

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

В исследованиях по созданию термо- и радиационно стойких материалов привлекаются данные по влиянию на структуру сверхвысоких деформаций. Методами зондовой мессбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe и электронной микроскопии исследовано динамическое деформационное старение при механическом синтезе ^{238}U с ^{57}Fe . Установлено, что в результате сдвига под давлением во вращающихся наковальнях Бриджмена при комнатной температуре образцов (типа «сэндвич») металлических урана и железа формируются интерметаллические соединения U_6Fe , UFe_2 и «прекурсор» в виде дефектных интерметаллических фаз $\text{UFe}_2(\text{D})$, $\text{UFe}_3(\text{D})$ и механической смеси $\text{Fe}(\text{D})$ и $\text{U}(\text{D})$, см. рис. 1. Образующиеся после деформации фазы имеют сверхтонкие параметры аналогичные полученным при скоростной закалке расплавов U-Fe близкого состава, что подтверждает общность вакансионных механизмов превращения при сверхвысокой пластической деформации и скоростной закалке. Наблюдаемые фазовые переходы являются следствием большой плотности подвижных точечных дефектов. Полученный результат согласуется с данными по увеличению термической стабильности урана, легированного железом.

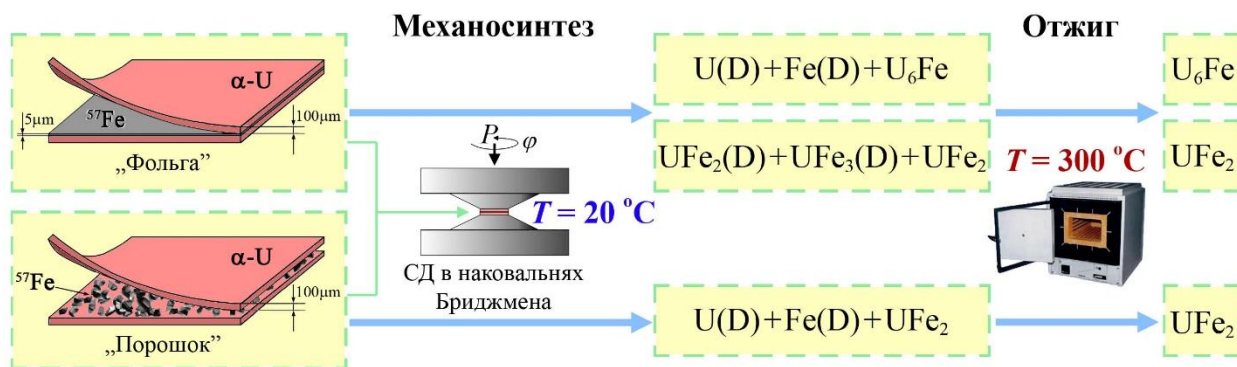


Рисунок - 1 Схема фазовых превращений при механическом синтезе $\alpha\text{-U}$ с ^{57}Fe методом сдвига под давлением во вращающихся наковальнях Бриджмена образцов по типу “фольга” и по типу “порошок” и последующем отжиге при 300°C .

Публикация:

1. [Deformation-induced mechanical synthesis of U and Fe](#) / K. Kozlov, V. Shabashov, N. Kataeva, V. Sagaradze, V. Pilyugin, A. Zamatovskii // Metals.—2024.—V.14.—Art.55.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России по теме «Структура» (№ г.р. 122021000033-2).

Актуальность обусловлена развитием науки неравновесных процессов в применении к принципам твердофазного механического синтеза и необходимостью создания термически, деформационно и радиационно устойчивой структуры материалов в атомной промышленности и в том числе ядерного топлива на основе урана.

Цель: исследование структурно-фазовых переходов при механическом сплавлении урана и железа, а также деформационной и термической устойчивости образующихся фаз.

Материал исследования: фольга α -U на основе ^{238}U с примесью естественного железа в количестве 3 масс. %; фольга и порошок железа, обогащенного резонансным (мессбауэровским) изотопом ^{57}Fe до 96 %.

Методы исследования: зондовая мессбауэровская спектроскопия; трансмиссионная электронная микроскопия.

Авторский вклад сотрудников ИФМ: идея исследования, постановка задачи, проведение расчёта, анализ результатов исследования, написание текста статьи.

1. Впервые выполнено механическое сплавление при комнатной температуре не обладающих взаимной смешиваемостью металлических ^{238}U и ^{57}Fe .

В качестве метода большой пластической деформации использованы вращающиеся наковальни Бриджмена, обеспечивающие степень деформации 6.2 и 6.6 при 8 ГПа и скорости 0.3 об/мин в двух вариантов смесей типа «сэндвич»: «пластина ^{238}U + пластина ^{57}Fe » и «пластина ^{238}U + порошок ^{57}Fe ». Формируются интерметаллические соединения U_6Fe , UFe_2 и «прекурсор» в виде дефектных интерметаллидов $\text{UFe}_2(\text{D})$, $\text{UFe}_3(\text{D})$ и механической смеси $\text{Fe}(\text{D})$ и $\text{U}(\text{D})$, см. рис. 1.

2. Получены сверхтонкие параметры фаз твердофазного механического сплавления урана и железа, которые аналогичны результатам скоростной закалки расплавов близкого состава.

Сопоставление полученных данных (рис. 2) с совокупностью данных по сверхтонким параметрам результатов механического сплавления и скоростной закалке расплавов урана и железа, а также имплантации резонансного железа в матрицу алюминия [Preston, R.S.; Gerlach, R. Mössbauer effect in dilute alloys of iron in aluminum. Phys. Rev. B. 1971. V. 3. P. 1519–1526] позволили сделать заключение об общей природе вакансионного механизма механического сплавления и скоростной закалки в системе U–Fe.

3. Показана неравновесность сформированной при деформации структуры.

В результате невысоких термических отжигов (300 °C) структура превращается в стабильные интерметаллические соединения. Морфологическое разнообразие результатов механосплавления (рис. 3) объясняется неоднородностью деформации по степени и скорости, что является спецификой метода сдвига под давлением.

4. Установлен механизм деформационно-индуцированного сплавления урана и железа с формированием интерметаллидов.

Вследствие диссипации большой механической энергии процесс твердофазного механического сплавления проходит по пути насыщения структуры подвижными точечными дефектами. Для системы урана и железа, не обладающих взаимной растворимостью, добавление железа в уран сопровождается снижением ликвидуса, ростом подвижности атомов и приводит к фазовому переходу структуры «прекурсора» в стабильные интерметаллические соединения. Сделан вывод, что низкая гомологическая

температура, при которой механическое сплавление проходит по пути формирования устойчивых фаз, может служить критерием сил связей атомов в фазах и устойчивости структуры (также как температура плавления и теплота образования).

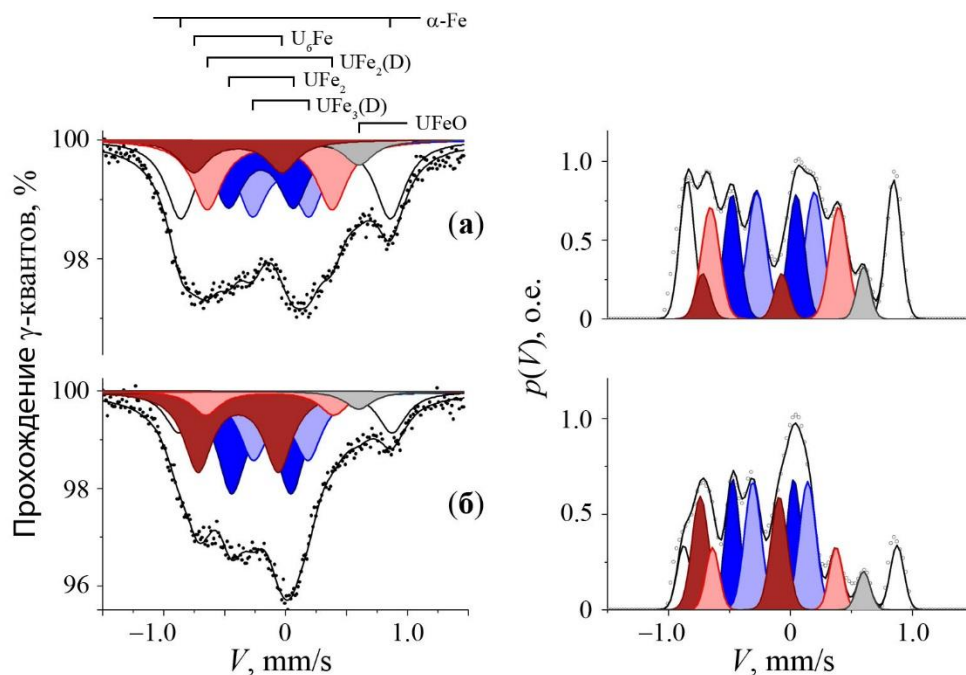


Рисунок - 2 Мессбауэровские спектры и соответствующие функции распределения $p(V)$ сплава α -U и ^{57}Fe , полученного в результате сдвига под давлением ($n = 10$ об.) образца по типу “фольга” (а) и последующего отжига при 300°C в течение 1 ч (б).

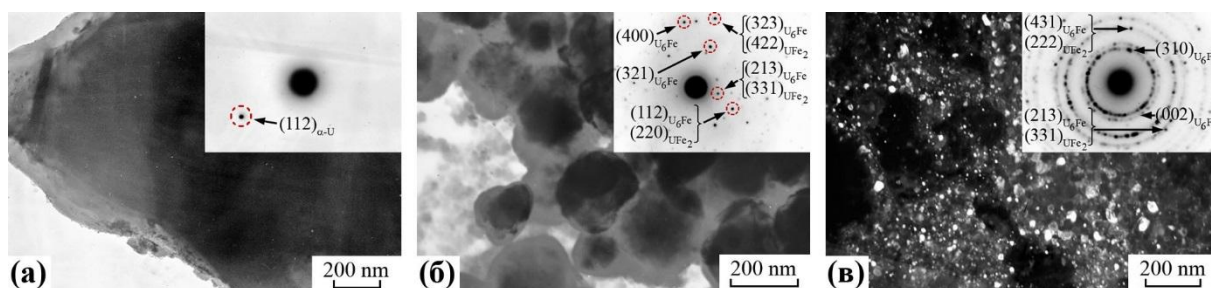


Рисунок - 3 Микроструктура сплава α -U и ^{57}Fe , полученного в результате сдвига под давлением ($n = 10$ об.) образца по типу “фольга” и последующего отжига при 300°C в течение 5 ч. (а, б) – светлопольные изображения, (в) — темнопольное изображение в рефлексах $(431)_{\text{U}_6\text{Fe}} + (222)_{\text{UFe}_2}$.

Выводы:

Показано, что в результате сдвига под давлением осуществляется механическое сплавление урана и железа с образованием интерметаллических соединений U_6Fe , UFe_2 и дефектных фаз, а именно $\text{UFe}_2(\text{D})$ и $\text{UFe}_3(\text{D})$ с мессбауэровскими параметрами, близкими параметрам фаз, полученным сверхбыстрой закалкой расплава урана и железа. Последующие изотермические отжики образцов сопровождаются преимущественным образованием интерметаллидов U_6Fe в образце, синтезированном сдвигом под давлением в образце по типу «фольга» и UFe_2 в образце по типу «порошок». Механическое сплавление урана и железа проходит при комнатной температуре по механизму динамического старения без образования твердых растворов. Динамическое старение при комнатной температуре является следствием малой взаимной растворимости урана и железа, генерации подвижных точечных дефектов и высокого термодинамического стимула образования интерметаллидов U_6Fe и UFe_2 .