

УДК 669.295:621.785

ЭФФЕКТ БАУШИНГЕРА В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МЕТАЛЛАХ

В. В. Столяров

Аннотация

Представлены результаты исследования эффекта Баушингера при одноосном растяжении-сжатии в массивных ультрамелкозернистых образцах из технической чистой меди и титана, полученных методом интенсивной пластической деформации - равноканальным угловым прессованием. Показано, что классический эффект Баушингера зависит от размера зерен в микроструктуре и является максимальным в ультрамелкозернистом состоянии. Знак эффекта в ультрамелкозернистом титане и меди различен и определяется типом кристаллической решетки, условиями нагружения и внутренними напряжениями.

Ключевые слова: титан, медь, ультрамелкозернистая структура, эффект Баушингера

1. Введение Ультрамелкозернистые материалы привлекают внимание специалистов и исследователей в связи с их высокими механическими свойствами. Особый интерес связан с усталостными характеристиками таких материалов, высокий уровень которых определяется не только высокими прочностными характеристиками (пределы прочности и текучести), но и их способностью к накоплению повреждений и рассеянию энергии при знакопеременном нагружении в пластической области. Последнее относится к явлениям неупругости, одним из которых является эффект Баушингера (ЭБ). “Классический” ЭБ - хорошо известное явление, которое заключается в уменьшении сопротивления материала малым пластическим деформациям после предварительной пластической деформации противоположного знака [1,2]. Обычно, кривая повторного нагружения в прямом направлении располагается ниже кривой прямого нагружения после предварительной деформации в обратном направлении. Величина этого отклонения по деформации или по напряжению служит мерой ЭБ. Исследование ЭБ и его количественная оценка дают важную информацию о механизме микропластической деформации и структурном состоянии материала, полученного в результате определенной деформационно-термической обработки. Одним из важных вопросов в этой связи остается влияние размера зерен в структуре материала на величину ЭБ.

Для крупнозернистых металлов и сплавов с размером зерен от 20 до 150 мкм выполненные исследования дают представление о величине ЭБ и его зависимости от структуры и различных внешних параметров [3-5]. Показано, что укрупнение зерен в данном размерном интервале приводит к снижению и даже исчезновению ЭБ [4]. В тоже время область микро- и субмикроструктурных материалов с размером зерен значительно меньше 20 мкм оставалась не исследованной, что было связано с трудностями испытаний малых образцов, какими в большинстве случаев являются ультрамелкозернистые материалы. Развитие нового метода интенсивной пластической деформации – равноканального углового прессования (РКУП) позволило получить массивные образцы ультрамелкозернистых материалов [6, 7] и впервые определить параметр энергии Баушингера β_E при малоцикловом нагружении ультрамелкозернистой меди [8].

Цель настоящей статьи оценить и сравнить эффект Баушингера при растяжении-сжатии в металлах с различным типом кристаллической решетки, находящихся в обычном крупнозернистом и ультрамелкозернистом состоянии.

2. Материалы и методика. Для испытаний применяли цилиндрические образцы технически чистого титана ВТ 1-0 (99.9%) и меди М1 (99,99%), вырезанные в продольном направлении исследуемых прутков размером $\varnothing 20 \times 100$ мм. Эти материалы были выбраны для исследования в связи с заметным различием в их уровне прочности и разным типом кристаллической решетки. Выбранные размеры и форма образца (рис.1а) позволили проводить испытания на растяжение и сжатие на одном и том же образце без изменения его формы при переходе от одного направления нагружения к другому. Структурные состояния с разным размером зерен и уровнем внутренних напряжений были получены комбинацией РКУП и постдеформационного отжига, режимы которого даны в таблице. РКУП меди и титана выполнено при 20 и 450°C, соответственно [6,7]. В качестве примера на рис.1б показана типичная структура титана в УМЗ состоянии.

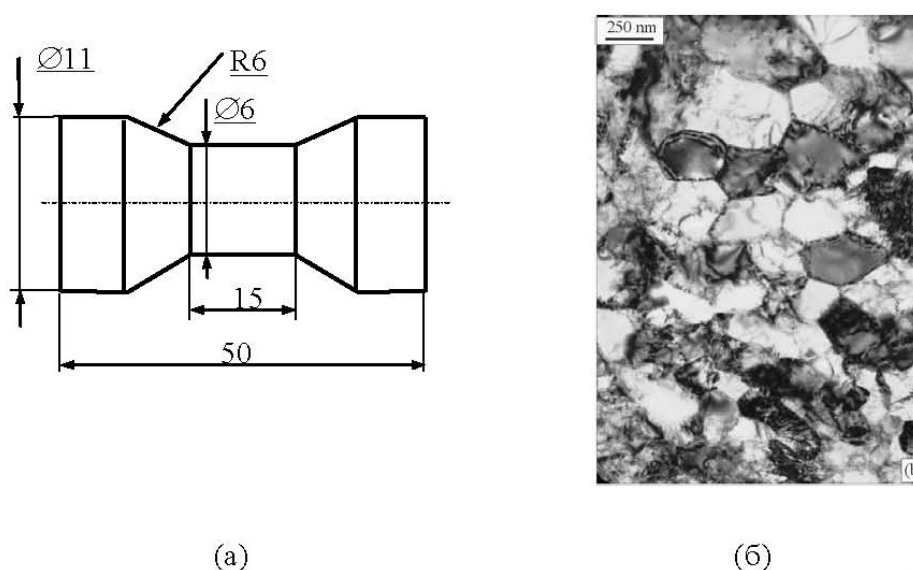


Рис.1. Геометрия образца для испытания (а) и микроструктура УМЗ Тi (б).

Испытания образцов производили на разрывной машине ИР 5047-50 с компьютерным управлением при комнатной температуре со скоростью движения подвижной траверсы 1 мм/мин., нагрузка и деформация фиксировались с помощью тензодатчика и экстензометра, соответственно. Образец сначала деформировали растяжением до достижения им условного предела текучести σ_{02}^{p1} , затем подвергали деформации сжатием и повторному растяжению до σ_{02}^{p2} . Степень предварительной деформации при сжатии была выбрана минимальной (0.2, 1 и 2%), поскольку известно, что величина ЭБ в этом случае является максимальной [1]. За исключением особо оговоренных случаев время выдержки между первичным и повторным растяжением составляло 1 час. Величина ЭБ оценивалась отношением разности условных пределов текучести при первом (σ_{02}^{p1}) и повторном (σ_{02}^{p2}) растяжении к условному пределу текучести при первом растяжении:

$$B = (\sigma_{02}^{p2} - \sigma_{02}^{p1}) \times 100\% / \sigma_{02}^{p1}$$

3. Результаты эксперимента. Результаты эксперимента представлены в таблице и на рис.2. Эффект от предварительной деформации сжатием на механическое поведение материала при последующем растяжении для меди и титана различен по знаку (таблица). Если в меди для состояний №1, 2, 3 повторное растяжение происходит при меньших напряжениях течения, чем первичное ($B < 0$), то в титане для состояний №1, 2, 3 наоборот, при больших ($B > 0$). Т.е. предварительная деформация сжатием вызывает эффект разупрочнения при растяжении в меди и эффект упрочнения в титане.

Рассмотрим, как влияет средний размер зерен в микроструктуре исследованных образцов на ЭБ (рис.2). В меди уменьшение размера зерен от 50 до 0.2 мкм приводит к повышению “классического” ЭБ (усилению разупрочнения) от -3.7% до -19.4%. Более того, если сжатие и растяжение проводятся по времени непосредственно друг за другом, а величина предварительной деформации минимальна, то ЭБ усиливается и достигает максимального значения $B = -26.1\%$ (состояние № 4). Для сравнения, в таблице и на рис. 2, приведены литературные данные для крупнокристаллической меди, отожженной при 800 и 1000°C, с размером зерен 60 и 150 мкм (состояния № 5, 6), которые свидетельствует об аналогичной зависимости ЭБ от размера зерен, хотя при этом знак ЭБ положителен [4]. Это сравнение также показывает, что знак ЭБ в меди при близких размерах зерен (50 и 60 мкм) сильно зависит от предварительной степени деформации. Уменьшение степени деформации на порядок приводит к смене знака ЭБ с положительного на отрицательный.

В титане, уменьшение размера зерен приводит к уменьшению упрочнения. Так, с уменьшением размера зерен от 20 до 0.2 мкм (состояния № 1, 2, 3) величина B снижается и даже становится отрицательной для испытания, при котором предварительная деформация на порядок ниже, а выдержка между прямым и обратным нагружениями отсутствует (состояние № 4). Т.е. упрочнение в титане сменяется разупрочнением (“классический” ЭБ), и оно зависит как от размера зерен, так и от условий нагружения. Особый интерес представляет ЭБ в ультрамелкозернистом титане в состоянии № 5, полученном низкотемпературным отжигом образца в состоянии № 3.

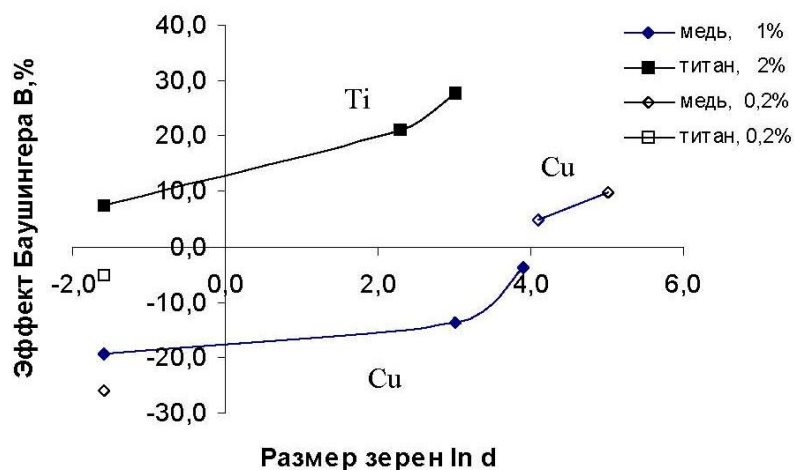


Рис.2. Влияние размера зерен на эффект Баушингера в меди и титане.

Проведенные ранее структурные исследования [10] показали, что при такой обработке размер зерен практически не меняется, а уровень упругих внутренних напряжений заметно снижается. Сравнение состояний № 3 и № 5 показывает, что отжиг при 300⁰С в течение 1 час сильнодеформированного титана повышает величину В с +7.4 до +11.2% и тем самым подавляет проявление ЭБ.

Отметим, что во всех случаях, кроме состояния № 1 в титане, напряжения при сжатии $\sigma^{сж}$ меньше напряжений при растяжении σ^{pl}_{02}

Таблица. Эффект Баушингера (B_1 и B_2) и пределы текучести при растяжении до (σ^{pl}_{02}) и после (σ^{p2}_{02}) предварительной деформации сжатием ($\sigma^{сж}_{02}$) для титана и меди в крупнозернистом и наноструктурном состояниях.

| Металл | Состояние | Средний размер зерен, мкм | Степень предв-ой деф-ции ϵ , % | σ^{pl}_{02} МПа | $\sigma^{сж}_{02}$ МПа | σ^{p2}_{02} МПа | B_1 % | B_2 % |
|--------|------------------|---------------------------|---|------------------------|------------------------|------------------------|---------|---------|
| Cu | 1.РКУП+600 С-1ч | 50 | 1 | 81 | 71 | 78 | - 3.7 | -12.3 |
| | 2.Горячекат-ое | 5 | 1 | 294 | 235 | 254 | -13.6 | -20.0 |
| | 3а.РКУП (20 С) | 0.2 | 1 | 384 | 364 | 371 | - 3.4 | - 5.2 |
| | 3б. РКУП (20 С) | 0.2 | 0.2* | 375 | 269 | 277 | -26.1 | -28.2 |
| Ti | 1. РКУП+600 С-2 | 50 | 1 | 318 | 344 | 406 | +27.7 | - 8.1 |
| | 2. Горячекат-ое | 10 | 5 | 401 | 380 | 486 | +21.0 | - 5.2 |
| | 3а. РКУП (450 С) | 0.2 | 2 | 636 | 530 | 683 | + 7.4 | - 16.7 |
| | 3б. РКУП (450 С) | 0.2 | 0.2* | 550 | 500 | 522 | - 5.1 | - 9.1 |
| | 4а. РКУП+300-1ч | 0.2 | 2 | 616 | 530 | 685 | +11.2 | - 14 |
| | 4б. РКУП+300-2ч | 0.2 | 1 | 715 | 663 | 707 | - 1.1 | - 7.2 |

Примечания: -* деформация осуществлялась без выдержки между прямым и обратным нагружениями;

- приведены средние значения по трем образцам

- знаки + и - означают повышение и снижение пределов текучести.

4. Обсуждение результатов. Все наблюдаемые изменения напряжений течения при смене направления деформации в меди и титане относятся к эффекту Баушингера, поскольку выполняется необходимое условие его проявления $|\sigma^{сж}| < |\sigma^{pl}_{02}|$. Параметр В, характеризующий эффект Баушингера, отражает комбинированное влияние деформационных процессов разупрочнения и упрочнения материала при растяжении-сжатии-растяжении. Преимущественный вклад любого из процессов определяет суммарный эффект и его знак.

Настоящее исследование позволило установить ряд особенностей в проявлении ЭБ в чистых ультрамелкозернистых металлах - меди и титане. Прежде всего, это различие в знаке ЭБ: разупрочнение в меди, которое наиболее типично и характерно для многих отожженных крупнозернистых металлов [1-5, 9] и сплавов [4, 11], и упрочнение в титане, которое наблюдается для ряда сталей [10]. Поскольку это различие проявилось для большинства ультрамелкозернистых состояний (кроме состояния № 4 в титане) можно было бы предположить, что оно связано только с разным типом кристаллической решетки исследованных металлов. Действительно, пластическая деформация в ГЦК-меди и ГПУ-титане сильно отличается. Число действующих систем скольжения (двойникования) в гексагональных металлах значительно меньше, а анизотропия решетки выше, чем в ГЦК - металлах. Деформация

при растяжении и сжатии в ГПУ титане с отношением параметров $c/a < 1.63$ происходит по разным плоскостям и потому по разным механизмам: скольжением - при растяжении и двойникованием - при сжатии.

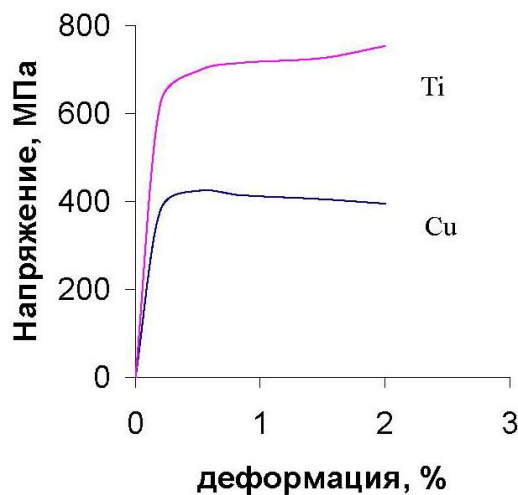


Рис.3. Кривые "напряжение-деформация" для ультрамелкозернистых Cu и Ti.

Вместе с тем известно, что напряжение сдвига при двойниковании заметно выше, чем при скольжении. Кроме того, ультрамелкозернистый титан после РКУП обладает ярко выраженной кристаллографической текстурой аксиального типа, которая усиливает различия в напряжениях сдвига при смене направления деформации. Все эти факторы способствуют ослаблению проявления ЭБ в ультрамелкозернистом титане по сравнению с медью. Об этом же свидетельствует сравнение вида первичных кривых "напряжение-деформация" ультрамелкозернистых титана и меди (рис.3). Видно, что характер деформационного упрочнения в области малых пластических деформаций различен. Для меди практически сразу после достижения напряжения течения происходит разупрочнение, связанное с локализацией деформации. В титане упрочнение имеет более протяженную стадию. Поэтому, при знакопеременном нагружении, по крайней мере, в нескольких первых циклах переход в пластическую область при каждом следующем полцикле будет происходить в титане при больших напряжениях, а в меди при меньших.

Тем не менее, тип решетки, по-видимому, не является основной причиной различного проявления ЭБ. Об этом свидетельствует заметная чувствительность проявления ЭБ к микроструктуре и внутренним напряжениям исследованных образцов. Именно этим можно объяснить тот факт, что выбором структуры (размера зерен и уровень внутренних напряжений) и внешних условий испытаний (степень предварительной деформации и время релаксации напряжений) в каждом из исследованных металлов реализуются либо положительный, либо отрицательный знак ЭБ. В первую очередь это относится к снижению упрочнения в титане и увеличению разупрочнения в меди при уменьшении размера зерен. Фактически это обозначает, что измельчение структуры усиливает проявление ЭБ. Аналогичная тенденция была обнаружена ранее для чистых металлов Al, Cu, Mg, Zn, но со значительно более

крупнозернистой структурой [4]. Близкий результат был получен в работе [8], где ЭБ оценивался в ультрамелкозернистой меди по результатам циклических испытаний. Таким образом, литературные и экспериментальные данные для крупнозернистых и ультрамелкозернистых металлов подтверждают общий характер существующей зависимости ЭБ от величины зерна. Отметим значительное влияние на ЭБ внутренних напряжений, характерных для ультрамелкозернистых состояний. Действительно, ЭБ снижается при низкотемпературном отжиге в титане и повышается при уменьшении времени выдержки между сжатием и растяжением. В обоих случаях релаксация внутренних напряжений способствует снижению ЭБ.

Механическое поведение технически чистых меди и титана в упругопластической области, конечно, будет зависеть и от содержания и распределения примесей в них. Например, медь М1 по содержанию примесей является более чистой, чем титан ВТ1-0. Однако, этот фактор в настоящей работе не изучался и требует самостоятельного исследования.

Сохранение усиления классического ЭБ со структурным измельчением в широком диапазоне размеров зерен свидетельствует о неизменности природы и механизма ЭБ, который связан с внутризеренным движением дислокаций и их торможением или ускорением в поле действующих внутренних напряжений. Возможность регулирования величины и знака ЭБ позволяет на практике использовать это явление либо для снижения усилий деформирования в процессах ОМД, либо для повышения усталостных характеристик.

Благодарности

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 08-08-00497-а, № 08-08-90403-Укр_а, 08-08-92202-ГФЕН_а)

Выводы

1. В ультрамелкозернистых состояниях медь и титан проявляют максимальный эффект Баушингера, различающийся по знаку. В результате смена направления деформации приводит к разупрочнению в меди, но к упрочнению в титане.
2. Различный знак и величина эффекта Баушингера в ультрамелкозернистых меди и титане связаны с различным типом кристаллической решетки, характером деформационного упрочнения при нагружении и наличием внутренних напряжений.

Литература

1. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. М, Металлургия, 1979, 495с.
2. Золотаревский В.С. - В кн. Механические испытания и свойства металлов, М.: изд. Металлургия, 1974, с.33÷42.
3. Грачев С.В. Термическая обработка и сопротивление сплавов повторному нагружению. М.: Металлургия, 1976, 152с.
4. Данилов Ю.С. Влияние величины зерна на эффект Баушингера. МиТОМ 1964, №9, с. 39÷41.
5. Бобонец И.И., Гиндин И.А., Неклюдов И.М. Влияние программированного упрочнения на эффект Баушингера меди и алюминия, Изв. АН СССР, Металлы, 1967, №6, с.156-159
6. Валиев Р.З., Александров И.В., Нанокристаллические материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, М.: Логос, 272с.

7. Столяров В.В., Валиев Р.З., Получение метастабильных ультрамелкозернистых сплавов равноканальным угловым прессованием, *Металлы*, 2 (2004) 110-115.
8. Vinogradov A., Kaneko Y., Kitagawa K., Hashimoto S., Stolyarov V. and Valiev R., Fatigue behavior of ultrafine-grained copper, *Scripta Mater.*, 36 (1997), 1345-1349
9. Бэкофен В, Процессы деформации, пер.с англ. М.:Металлургия, 1977, 288с.
10. Popov A.A., Pyshmintsev I.Yu., Demakov S.L., Illarionov A.G., Lowe T.G., Sergeeva A.V., Valiev R.Z. Structural and mechanical properties of nanocrystalline titanium processed by severe plastic deformation. *Scripta Mater.*, 37, 7 (1997) 1089-1094.
11. Tan Z., Magnusson C. The Bauschinger effect in compression-tension of sheet metals. *Mater.Sci&Eng.*, A183 (1994) 31-38

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.