

Влияние размеров зерна сплава Д16Т на неоднородность его деформирования при статическом и динамическом нагружении

**В. И. Зубов,^а А. Н. Олисов,^а Г. В. Степанов,^а Н. Г. Чаусов,^б
А. В. Широков^а**

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина

Исследовано влияние размеров зерна на однородность деформации листового алюминиевого сплава Д16Т при статическом и динамическом растяжении. Установлено, что увеличение размеров зерна приводит к существенному возрастанию неоднородности деформирования. Это способствует более быстрому разрушению образцов из крупнозернистого сплава и развитию в них локализованной деформации вне зоны разрушения. Показано, что с ростом скорости нагружения снижается влияние размеров зерна на уровень остаточных деформаций, особенно в зоне разрушения.

Ключевые слова: динамическое нагружение, размеры зерна, сплав Д16Т, неоднородное деформирование.

Введение. Металлические конструкционные материалы, как правило, имеют поликристаллическую структуру. Деформирование представительного объема такого металла, содержащего достаточно большое число зерен, можно принять однородным. Однако на микроуровне процесс пластической деформации всегда неоднороден. Сначала происходят локальные сдвиги по отдельным, наиболее выгодно ориентированным кристаллографическим плоскостям, что вызывает повышение уровня деформации только в локальных объемах материала. Дальнейшее деформирование приводит к закреплению микрообластей с повышенным и пониженным уровнями деформации, появлению и развитию новых областей локальной деформации [1]. При дальнейшем деформировании происходит локализация деформации, образование и слияние микротрещин, приводящее к разрушению материала [2–5]. Наибольшее влияние на пластические и прочностные свойства металлических материалов на макроуровне оказывают локальные области материала с повышенным уровнем деформации, так как разрушение является следствием увеличения уровня микронеоднородной деформации и исчерпания ресурса пластичности в этих микрообъемах. Как показано в [6], даже в условиях однородного (на макроуровне) напряженного состояния наблюдается рассредоточенное образование микротрещин в зонах максимальных пластических деформаций.

Начальная неоднородность физико-механических свойств в объеме материала, схема нагружения, геометрия образца и другие факторы влияют на расположение областей с повышенным и пониженным уровнями пластической деформации, а следовательно, и на дальнейшее деформирование и разрушение материала.

Так в [1, 3, 5, 7, 8] показано, что размеры зерна оказывают значительное влияние на деформирование различных металлических материалов. Данные, приводимые в литературе, носят несистематический характер, что и определяет актуальность дальнейших исследований в этом направлении.

В данной работе, в развитие [9], выполнена качественная оценка влияния размеров зерна на разрушение тонколистового алюминиевого сплава Д16Т при статическом и динамическом (ударном) растяжении. Цель настоящего исследования – установить основные закономерности деформирования и разрушения мелко- и крупнозернистого алюминиевого сплава в указанных условиях нагружения.

Образцы. Образцы вырезали из листов алюминиевого сплава Д16Т в состоянии поставки и после термообработки. Термообработка, обеспечивающая увеличение размеров зерна, описана в [7] и включает следующие операции: снятие лакирующего слоя электрохимическим методом (для раскрытия кристаллической структуры сплава), отжиг при температуре 540°C в течение 8 ч, растяжение до деформации ~5.2%, повторный отжиг при температуре 560°C в течение 4 ч. Размеры зерна материала в состоянии поставки составляли 0,3...0,8 мм. В результате термообработки получены зерна, вытянутые вдоль направления растяжения со средними размерами осей около 4 и 8 мм (рис. 1).

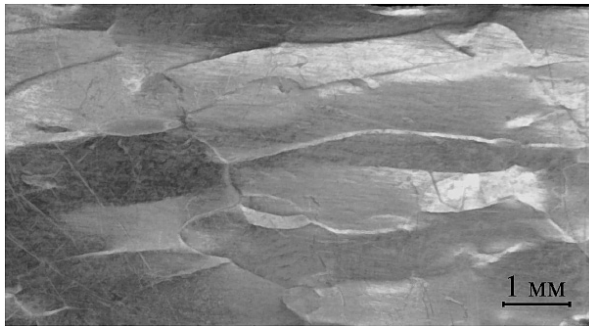


Рис. 1. Структура образцов из крупнозернистого сплава.

Для испытаний мелкозернистого алюминиевого сплава были использованы образцы с укороченной рабочей частью (рис. 2,а) [9].

Образец из крупнозернистого алюминиевого сплава представлен на рис. 2,б. Для уменьшения влияния боковых границ на деформирование его рабочей части ее ширину увеличивали до 24 мм. Такая ширина содержит 5-6 зерен.

Размеры образцов обеспечивают напряженно-деформированное состояние, близкое к однородному (на макроуровне), при деформировании рабочей части образцов вплоть до начала локализованного течения.

Методика испытаний. Испытания на статическое растяжение выполняли на стандартной испытательной машине Instron. Испытания на ударное растяжение со скоростью нагружения $V \approx 10$ м/с проводили на вертикальном копре со свободно падающим (под действием силы тяжести) нагружающим бойком (60 кг). Схема крепления образца представлена на рис. 3. Методика динамических испытаний подробно описана в [10].

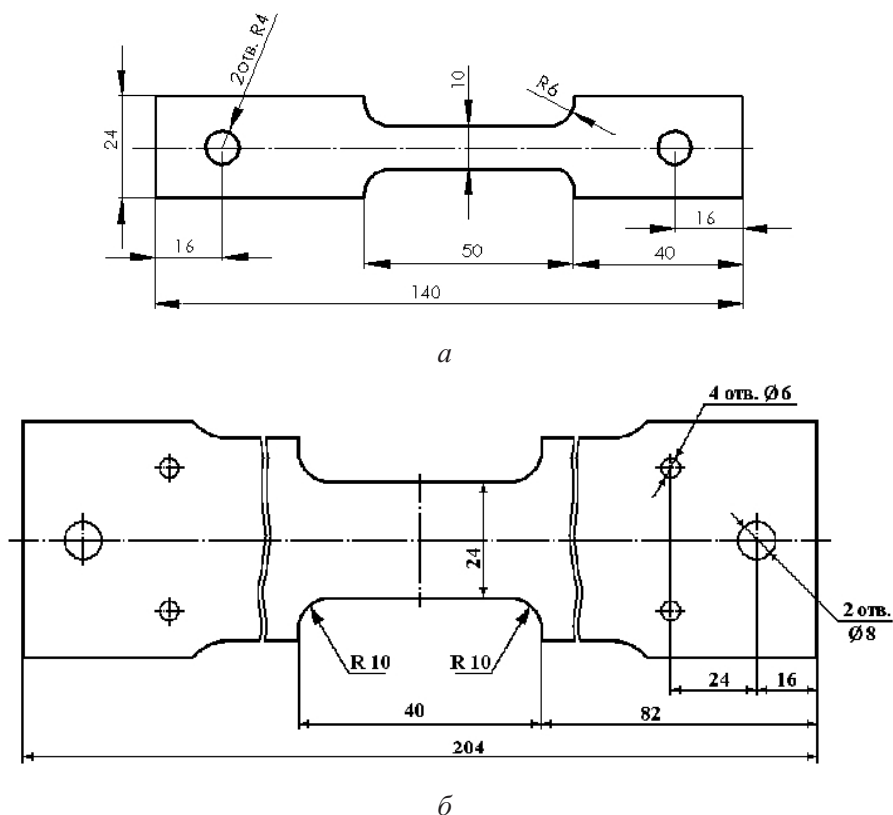


Рис. 2. Образцы для испытаний на растяжение из мелко- (а) и крупнозернистого (б) алюминиевого сплава Д16Т.

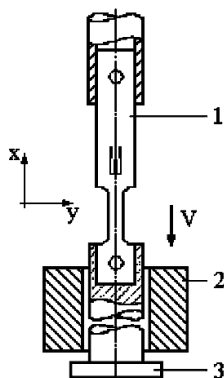


Рис. 3. Схема ударного растяжения: 1 – образец; 2 – нагружающий боек; 3 – наковальня.

Распределение остаточных деформаций оценивали по деформации делительной сетки. Для этого на поверхность рабочей части образца методом фотопечати наносили прямоугольную сетку с шагом между реперными линиями 1,0 мм. Изменение размеров ячеек сетки определяли с помощью инструментального микроскопа с погрешностью не более 0,01 мм. Сопоставляя результаты измерений в ячейках вдоль продольных (в направлении нагружения) и поперечных (перпендикулярно направлению нагружения) линий сетки

до и после разрушения образцов, определяли распределение остаточных деформаций.

В образцах из крупнозернистого сплава на каждое зерно приходится 4-8 ячеек сетки (в поперечном и продольном направлениях соответственно), что позволяет оценивать неоднородность деформирования зерна.

Вследствие малой величины остаточных поперечных деформаций (ось y) они не оказывают значительного влияния на разрушение образца. Ниже приведены результаты анализа распределения только для продольных остаточных деформаций (ось x).

Как правило, линия разрушения разделяет ячейку сетки на две части. Различие деформаций в частях разрушенной ячейки затрудняет анализ результатов. Поэтому деформация разрушенной ячейки представлена суммой деформаций составляющих ее частей.

Результаты экспериментов и их анализ. Типичные распределения полей деформации в рабочей части разрушенных образцов при статическом и динамическом нагружении представлены на рис. 4. Линия разрушения на всех приведенных графиках проходит через центр рабочей части образца по ячейкам с максимальными деформациями.

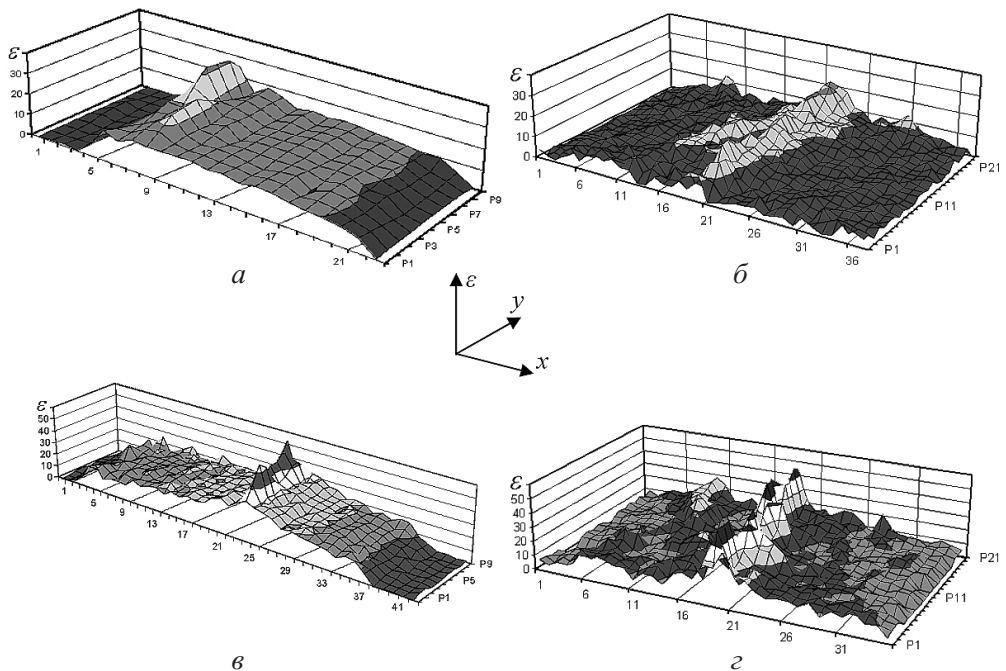


Рис. 4. Распределение остаточных деформаций в рабочей части образцов из мелко- (а, в) и крупнозернистого (б, з) алюминиевого сплава Д16Т при статическом (а, б) и ударном (10 м/с) (в, з) растяжении.

Анализ полей распределения остаточных деформаций в ячейках сетки свидетельствует о существенно большей неоднородности деформирования образцов из крупнозернистого алюминия. Это объясняется тем, что пластическое деформирование крупнозернистых образцов начинается и в дальней-

шем развивается по границам зерен и в местах их тройных стыков [8], что способствует неоднородному деформированию всего объема образца. С ростом скорости нагружения наблюдается увеличение уровня неоднородности деформирования для обоих образцов (рис. 4). Это связано с уменьшением времени, необходимого для выравнивания напряжений в объеме материала, что приводит к более интенсивному возникновению ряда областей с повышенными и пониженными локальными напряжениями. В результате происходит формирование и дальнейшее развитие областей с повышенным и пониженным уровнями деформации во всех исследуемых образцах.

Для качественной оценки влияния размеров зерна и режимов нагружения рассчитали средние значения деформации рабочей части образцов (исключая разрушенные ячейки) и среднюю деформацию разрушенных ячеек. Полученные результаты представлены в таблице.

Средние значения остаточных деформаций

| Область деформации | Статическое нагружение | | Динамическое нагружение (10 м/с) | |
|-----------------------|------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| | Мелкозернистый | Крупнозернистый | Мелкозернистый | Крупнозернистый |
| Рабочая часть образца | 12,9 | 6,0 | 19,7 | 12,8 |
| Разрушенные ячейки | 24,7 | 17,3 | 45,7 | 42,2 |

Анализ данных показывает, что увеличение размеров зерна приводит к разрушению при более низких значениях пластической деформации и, как следствие, более низким значениям средних остаточных деформаций в рабочей части образца. Так при статическом нагружении средняя остаточная деформация в разрушенных ячейках мелкозернистого образца на 30% выше, чем в крупнозернистом. Различие в значениях средней деформации рабочей части образца достигает 50%.

В условиях ударного нагружения влияние неоднородности деформирования, вызванной размерами зерна, уменьшается, но тенденция остается прежней, и остаточные деформации в образце из мелкозернистого сплава выше, чем у крупнозернистого. Различие в уровне средней остаточной деформации разрушенных ячеек мелкозернистого и крупнозернистого образцов составляет менее 10%. В то же время средний уровень остаточных деформаций в рабочей части образца из мелкозернистого алюминия выше на 35%.

Кроме того, при ударном нагружении уровень средней деформации в рабочей части мелкозернистого образца повышается на 50%, а уровень средней деформации разрушенных ячеек возрастает на 85% по сравнению со статическим нагружением. В крупнозернистом образце эти значения составляют 110 и 140% соответственно. Таким образом скорость нагружения оказывает существенно большее влияние на деформирование крупнозернистого сплава.

Отметим, что размеры зерна также оказывают существенное влияние на характер распределения остаточных деформаций. При статическом и динамическом нагружении в образцах из крупнозернистого алюминиевого сплава присутствуют области с повышенным уровнем деформации, лежащие вне зоны разрушения (рис. 4, б, г). Это указывает на возможность существования альтернативных путей развития разрушения. При динамическом нагружении области с повышенным уровнем деформации носят более выраженный характер. В образцах из мелкозернистого алюминиевого сплава подобные области не обнаружены.

Заключение. Полученные результаты подтверждают, что деформирование мелкозернистого материала как при статическом, так и при динамическом нагружении протекает более однородно. Скорость нагружения оказывает существенно большее влияние на деформирование образцов из крупнозернистого сплава. Влияние неоднородности деформирования, вызванной различием в размерах зерна, снижается в условиях динамического нагружения. Разрушение образцов из мелко- и крупнозернистого сплавов происходит при различных уровнях локальной остаточной деформации. Для крупнозернистых образцов существуют альтернативные пути развития разрушения при обоих видах нагружения.

Резюме

Досліджено вплив розмірів зерна на однорідність деформації листового алюмінієвого сплаву Д16Т при статичному і динамічному розтягуванні. Встановлено, що збільшення розмірів зерна призводить до суттєвого зростання неоднорідності деформування. Це сприяє більш швидкому руйнуванню зразків з крупнозернистого сплаву і розвитку в них локалізованої деформації поза зоною руйнування. Показано, що із зростанням швидкості навантаження знижується вплив розмірів зерна на рівень залишкових деформацій, особливо в зоні руйнування.

1. *Кукса Л. В.* Механика структурно-неоднородных материалов на микро- и макроуровнях. – Волгоград: Волгоградская государственная архитектурно-строительная академия, 2002. – 160 с.
2. *Зубов В. И., Степанов Г. В., Широков А. В.* Деформирование и разрушение образцов из высокопрочных металлов при высокоскоростном нагружении // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2004. – № 2. – С. 17–22.
3. *Нестеренко В. Ф., Бондарь М. П.* Локализация деформации при схлопывании толстостенного цилиндра // Физика горения и взрыва. – 1994. – № 4. – С. 99 – 111.
4. *Shih-Chieh Liao and Duffy J.* Adiabatic shear bands in a Ti–6Al–4V titanium alloy // J. Mech. Phys. Solids. – 1998. – 46, No. 11. – P. 2201 – 2231.
5. *Бондарь М. П., Первухина О. Л., Нестеренко В. Ф., Лукьянов Я. Л.* Особенности развития структуры титана при взрывном коллапсе толстостенных цилиндров // Физика горения и взрыва. – 1998. – 34, № 5. – С. 122 – 129.

6. *Романов А. Н., Гаденин М. М.* Особенности рассредоточенного трещинообразования в связи с неоднородностью развития деформаций при малоцикловом нагружении // Структурные факторы малоциклового разрушения металлов. – М.: Наука, 1977. – С. 39 – 50.
7. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О., Недосека С. А.* Влияние размеров зерна на рост поврежденности металла при пластическом деформировании // Пробл. прочности. – 1997. – № 5. – С. 5 – 13.
8. *Романова В. А., Балохонов Р. Р.* Моделирование пластической деформации как процесса генерации и эстафетной передачи пластических сдвигов от границ раздела // Физическая мезомеханика. – 2001. – № 2. – С. 21 – 27.
9. *Степанов Г. В., Зубов В. И., Олисов А. Н., Токарев В. М.* Прочность тонколистовых металлов при ударном растяжении // Пробл. прочности. – 2000. – № 4. – С. 62 – 69.
10. *Степанов Г. В.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.

Поступила 10. 02. 2011