

УДК 621:539.43.001.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВА Д16АТ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В. И. Капустин, В. П. Гилета

Новосибирский государственный технический университет, 630092 Новосибирск
E-mail: macler06@mail.ru

Представлены методика и результаты экспериментального исследования кинетики деформированного состояния материала в процессе его периодического одноосного нагружения. Приводятся диаграммы главных компонент тензора полных деформаций при асимметричном периодическом “мягком” режиме растяжения-сжатия образцов. Закономерности деформирования образцов, выявленные при периодическом асимметричном нагружении, могут быть использованы при разработке критерия усталостного разрушения материала и выявлении механизма деформационного упрочнения зон предразрушения деталей машин.

Ключевые слова: напряжение, деформация, компакция, усталость, зона предразрушения, деформационное упрочнение.

Введение. При разработке критерия усталостного разрушения важно знать зависимость деформированного состояния материала в зоне предразрушения от нагружения. В тех случаях, когда в качестве зоны предразрушения принимается область в вершине трещины, возникает необходимость определения состояния в малых объемах материала. Существующие средства измерения деформаций не позволяют получать полные сведения о деформированном состоянии неразрушенного материала в малой зоне предразрушения, например в окрестности вершины трещины.

В данной работе зоной предразрушения считается рабочая часть образца без концентраторов напряжений, имеющая размеры, достаточные для размещения экстензометров. В рабочей части образца деформированное состояние является однородным, а разрушение — равновероятным.

Периодическое нагружение, вызывающее разрушение рабочей части образца вследствие усталости, даже в случае одноосного напряженного состояния является сложным нагружением [1]. Анализ известных современных моделей упрочняющихся пластических материалов [2, 3] и результатов исследования на их основе [4] показывает, что для изучения поведения неупругого материала в процессе его усталости недостаточно знаний о поведении только первой главной компоненты тензора деформаций. В то же время имеющуюся обширную базу данных о деформированном состоянии материала в случае одноосного нагружения нельзя считать достаточной, так как в большинстве случаев исследовалось поведение только первой главной компоненты тензора деформаций, деформированное состояние не исследовалось в полном объеме.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-08-00220) и в рамках Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (госконтракт № 02.740.11.0819).

Наиболее полные верификации моделей деформирования проведены для случаев квазистатического нагружения по сложным траекториям в пространстве главных напряжений в предположении сплошности материалов, их статистической однородности и неизменности структуры, причем в различных исследованиях (см., например, [4]) априори считается, что независимыми являются только две главные компоненты тензора деформаций. Применение подходов [1–4] в случае периодического нагружения позволяет аналитически описать поведение циклически стабильных упрочняющихся и разупрочняющихся материалов [5], но при этом для верификации моделей требуется использовать экспериментальные данные. В работе [6] описывается эксперимент, в котором предпринималась попытка измерить три компоненты тензора деформаций в случае циклического нагружения, но надежные экспериментальные данные получить не удалось.

Необходимость дополнительной верификации моделей деформирования, описывающих поведение материала при периодических нагрузках, обусловлена также тем, что в настоящее время не определена область применимости моделей в тех случаях, когда гипотезы о структурной однородности и сплошности материала неверны. Указанное обстоятельство имеет большое значение, так как экспериментально установлено, что в процессе усталости структура металла претерпевает изменения, при этом дезинтеграция материала может выявляться на различных масштабных уровнях, а сам материал теряет свойство сплошности [7–9].

Целью данной работы является экспериментальное изучение закономерностей деформирования материала в зоне предразрушения образца при его периодическом нагружении.

1. Образцы, оборудование, методика измерений. В экспериментах испытывались плоские образцы из сплава Д16АТ с рабочей частью без концентраторов напряжений. Такие образцы используются при испытании материалов на сопротивление усталостному разрушению. Образцы изготавливались из листового проката. Длина рабочей части образца составляла 30 мм, ширина — 12 мм, толщина листа — 3 мм.

Для получения достоверных экспериментальных данных исследования проводились на двух испытательных сервогидравлических машинах фирм MTS (Сибирский научно-исследовательский институт авиации) и Instron (Новосибирский государственный технический университет). Максимальное усилие машин составляло 100 кН. Указанные машины обеспечивали деформирование образцов без кинематических ограничений при “мягком” режиме нагружения.

Для измерения компонент тензора полных деформаций использовались экстензометры, входящие в комплекты поставки машин MTS и Instron. Для измерения продольных деформаций применялись экстензометры с базой размером 25 мм, для измерения поперечных деформаций — экстензометры с регулируемыми размерами базы, которые были равны поперечным размерам рабочей части образца, составляющим 12 и 3 мм. Для записи диаграмм деформирования при испытании образцов на машине MTS использовался двухкоординатный самописец MTS, позволяющий регистрировать одновременно два параметра и задавать масштабы этих параметров в широком диапазоне. При проведении опытов на машине Instron данные, зарегистрированные датчиками в режиме реального времени, сохранялись в компьютере для последующего анализа.

В работе принята следующая ориентация ортогональных осей x, y, z : ось x направлена вдоль продольной оси симметрии рабочей части образца, ось y — по толщине (перпендикулярно плоскости листа), ось z — по ширине рабочей части (в плоскости листа).

При экспериментальном изучении деформированного состояния материала принимались следующие допущения и обозначения:

1. Рабочая часть образца деформируется однородно, истинная деформация может быть измерена с помощью экстензометров, размещенных на рабочей части образца.

2. Истинные деформации образца определялись с использованием экспериментальных данных по формулам

$$\varepsilon_x = \int_{l_{0x}}^{l_x} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_x}{l_{0x}}, \quad \varepsilon_y = \int_{h_{0y}}^{h_y} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_y}{h_{0y}}, \quad \varepsilon_z = \int_{b_{0z}}^{b_z} \frac{db}{b} = \ln \frac{b_z}{b_{0z}},$$

где dl — приращение длины в направлении приложения нагрузки; dh , db — приращения толщины и ширины образца соответственно; $l_{0x} = 25$ мм, $h_{0y} = 3$ мм, $b_{0z} = 12$ мм — базы экстензометров, используемых при измерении деформаций в направлениях осей x , y , z соответственно.

3. Относительное изменение объема ε_V рабочей части образца вычислялось по формуле

$$\varepsilon_V = \frac{V - V_0}{V_0} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z, \quad (1)$$

где V , V_0 — текущий и начальный объемы соответственно.

4. Интенсивность деформаций ε_i вычислялась по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2}. \quad (2)$$

2. Основные результаты экспериментов. Изучалось деформированное состояние образцов при периодическом асимметричном одноосном “мягком” режиме нагружения (растяжения-сжатия). Нагружение образцов осуществлялось в области положительных значений коэффициентов асимметрии циклов напряжений.

В опытах на испытательной машине MTS выполнялись следующие операции [10]. Образец нагружался с постоянной скоростью до заданного напряжения. В процессе нагружения с помощью самописца непрерывно и одновременно регистрировались показания экстензометров. Путем подачи сигналов с экстензометров на входы X и Y двухкоординатного самописца регистрировались зависимости каждой компоненты тензора деформаций от времени, на основе которых строилась диаграмма деформирования.

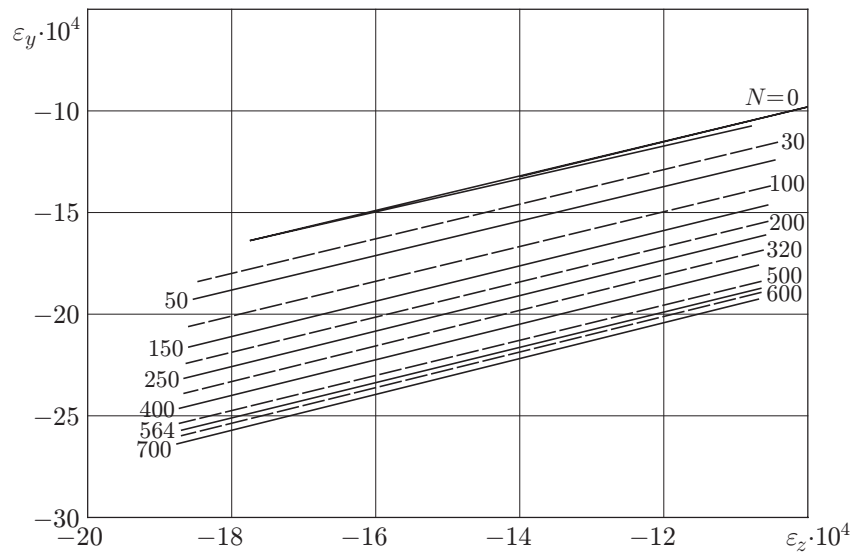
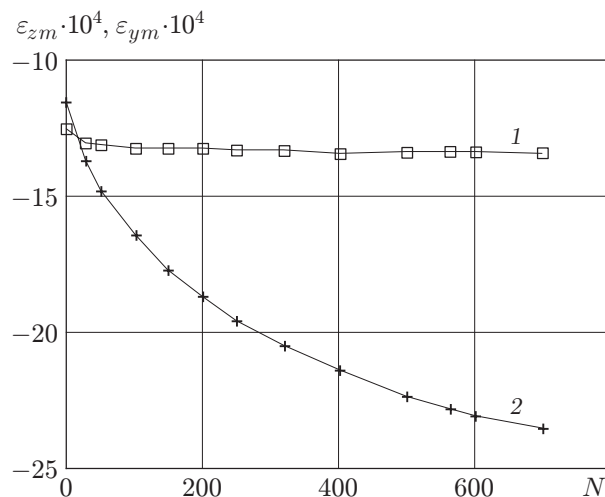
После достижения требуемого напряжения в рабочей части образец нагружался периодически циклами напряжений по заданной программе. В процессе нагружения образца циклами с помощью самописца непрерывно регистрировались показания экстензометров, с использованием которых строилась диаграмма деформирования (параметром являлось число циклов нагружения).

Аналогичные эксперименты проведены на машине Instron. При обработке результатов экспериментов использовалось динамическое программное обеспечение WaveMatrix указанной машины.

В соответствии с описанными выше операциями, выполненными на машине MTS, реализованы три программы испытаний образцов.

При испытании образца по первой программе требовалось получить данные о кинетике деформированного состояния. Для этого при нагружении образца устанавливались постоянные параметры циклов напряжений: форма циклов треугольная, среднее номинальное напряжение в циклах 188 МПа, амплитуда номинальных напряжений в циклах 115 МПа. Результаты испытаний, проведенных по данной программе, представлены на рис. 1, 2 (N — число циклов нагружения).

Результаты опыта, представленного на рис. 1, показывают, что до первой разгрузки деформирование образца в двух поперечных направлениях было практически идентичным. После первой разгрузки с увеличением числа циклов нагружения процесс деформирования

Рис. 1. Диаграмма полных истинных поперечных деформаций образца ε_y и ε_z Рис. 2. Кинетика средних за цикл поперечных деформаций образца ε_{zm} (1) и ε_{ym} (2)

сопровождался накоплением деформаций, но увеличение деформаций в двух поперечных направлениях происходило с разной скоростью.

Зависимости, представленные на рис. 2, позволяют сравнить кинетику средних поперечных деформаций в двух направлениях. Видно, что наиболее интенсивно развиваются поперечные деформации в направлении толщины листа.

В ходе дальнейшего исследования требовалось выяснить соотношение между продольной ε_x и поперечной ε_y полными истинными деформациями. Для этого образцы испытывались по программам нагружения, представленным на рис. 3 (σ_x — номинальное напряжение в образце; t — время).

На рис. 4 представлены результаты испытаний образцов по программам, приведенным на рис. 3 (ε_x , ε_y — полные истинные деформации).

На диаграмме деформирования, представленной на рис. 4, *a*, видны феноменологически описанные эффекты упругого деформирования, течения и упрочнения материала, которые выявляются при нагружении материала “за предел упругости”. Например, на участке

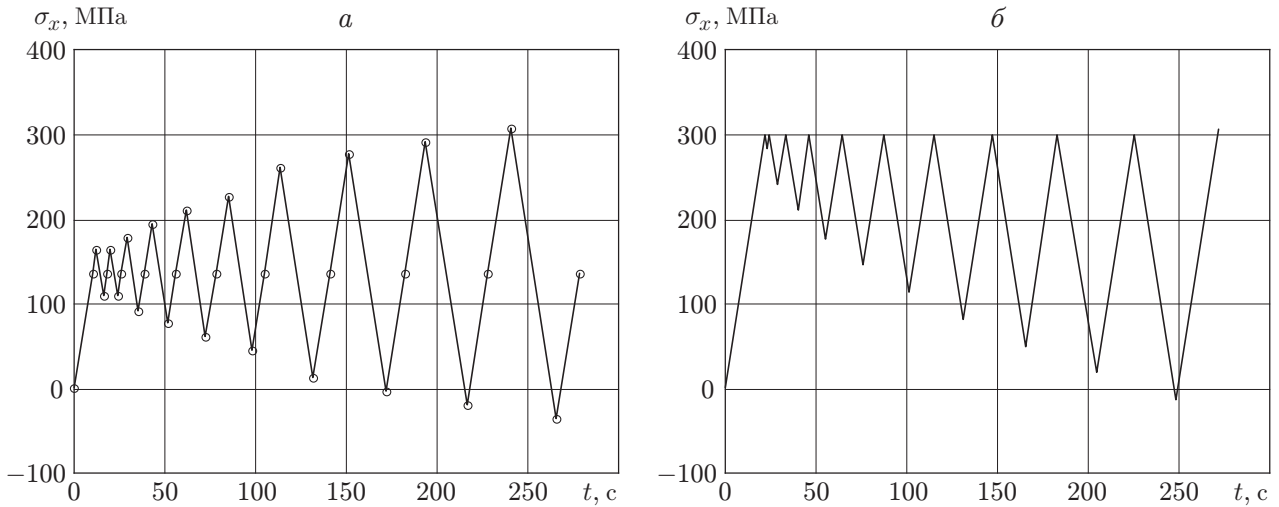


Рис. 3. Программы нагружения образцов:

a — постоянное среднее напряжение в цикле, *б* — постоянное максимальное напряжение в цикле

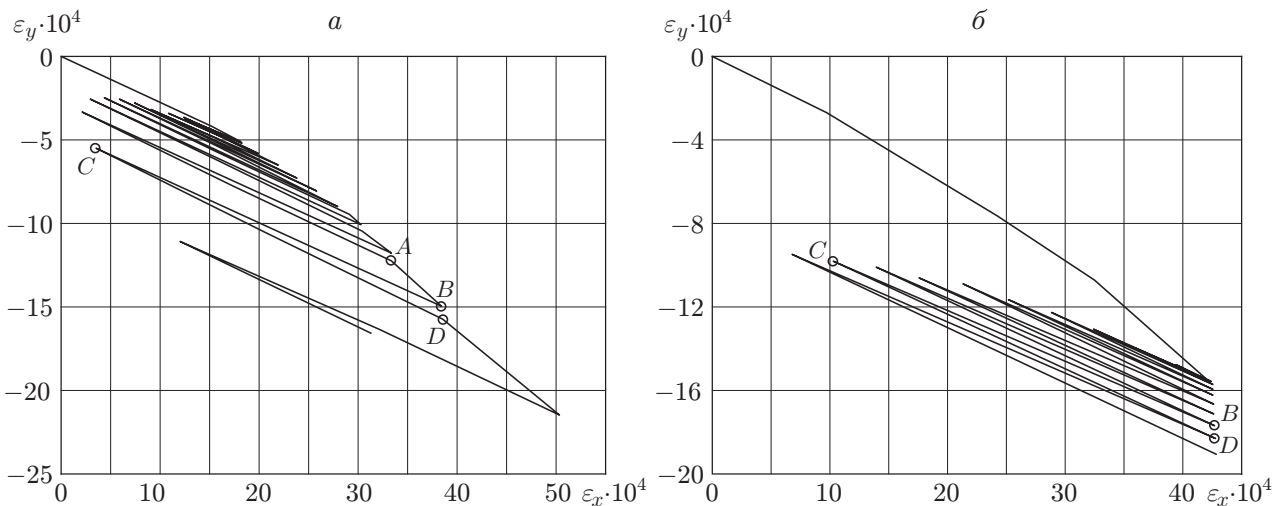


Рис. 4. Диаграммы деформирования образца из сплава Д16АТ при нагружении асимметричными циклами:

a — нагружение по программе, приведенной на рис. 3, *a*; *б* — нагружение по программе, приведенной на рис. 3, *б*

диаграммы *AB* коэффициент поперечных деформаций близок к значению, равному 0,5. Такие участки (участки течения материала) имеются после каждого нагружения “за предел упругости”. Наблюдается также увеличение предела упругости (эффект наклепа или упрочнения материала) в области максимальных напряжений в цикле после каждого последующего нагружения “за предел упругости”.

Кроме того, на рис. 4 видны новые эффекты. Например, видно, что участки диаграмм *BC* и *CD*, соответствующие уменьшению и увеличению нагрузки, не совпадают. При каждом нагружении после разгрузки поперечная деформация ε_y незначительно увеличивается (участок *BD*), при этом продольная деформация ε_x остается практически постоянной. Следует отметить, что увеличение поперечной деформации происходит при нагружении после разгрузки, если величина нагрузки не превышает предшествующую величину.

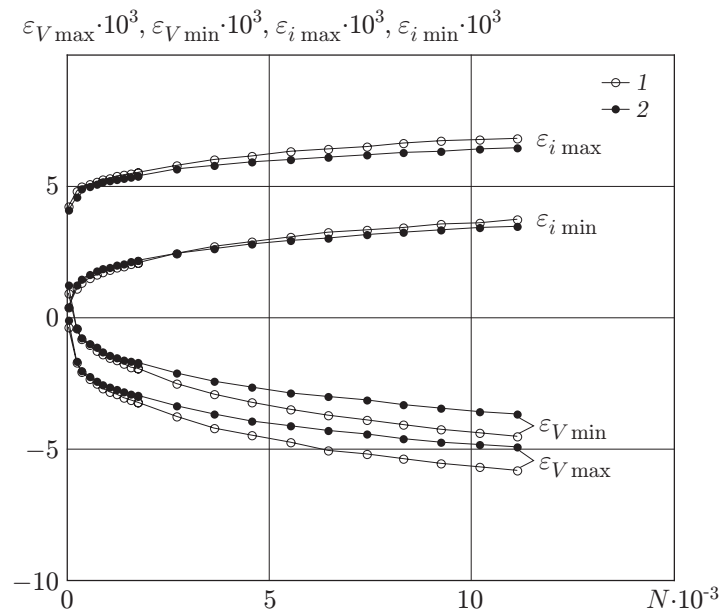


Рис. 5. Кинетические зависимости деформаций образца из сплава Д16АТ от числа циклов нагружения:

1 — $\sigma_{\max} = 300$ МПа, $\sigma_{\min} = 8,3$ МПа; 2 — $\sigma_{\max} = 293$ МПа, $\sigma_{\min} = 15,3$ МПа

Результаты экспериментов, представленные на рис. 3, 4, и результаты расчетов по формуле (1) показывают, что периодическое нагружение приводит к отрицательной дилатансии или компаксии (объемному сжатию) деформируемого материала. Обычно считается, что область деформирования, в которой наблюдается этот эффект, является областью упругих деформаций. Известные модели деформирования материала не описывают процесс компаксии при периодических нагрузках.

Такие же исследования были выполнены на машине Instron. Проверка качественно и количественно подтвердила наличие процесса компаксии материала при периодическом нагружении. Ниже приводятся результаты опытов, проведенных на машине Instron.

На рис. 5 представлены зависимости от числа циклов нагружения относительных максимальных и минимальных объемных деформаций $\varepsilon_{V \max}$, $\varepsilon_{V \min}$ и интенсивностей деформаций $\varepsilon_{i \max}$, $\varepsilon_{i \min}$, рассчитанных по формулам (1) и (2) соответственно.

На рис. 6 приведены результаты того же эксперимента в виде параметрических кривых (параметр — число циклов). На рис. 6 ε_{ia} , ε_{Va} — амплитуды интенсивности деформаций и объемной деформации; ε_{im} — средняя интенсивность деформаций; ε_{Vm} — средняя объемная деформация.

Из рис. 5, 6 следует, что при циклическом нагружении ε_{Vm} и ε_{ia} связаны с ε_{im} линейными зависимостями; по мере увеличения числа циклов нагружения значения средней составляющей объемной деформации ε_{Vm} изменяются от положительных к отрицательным; средняя составляющая интенсивности деформаций ε_{im} увеличивается; амплитуда интенсивности деформаций ε_{ia} уменьшается; с увеличением амплитуды напряжения в цикле указанные эффекты усиливаются.

С использованием данных, представленных на рис. 5, получена оценка значения параметра N на рис. 6, при котором величина ε_{Vm} меняет знак: $20 < N < 60$.

Следует отметить, что на деформации материала при асимметричном нагружении оказывают влияние амплитудная σ_a и средняя σ_m составляющие цикла напряжений, а также траектория нагружения в плоскости (σ_a, σ_m) . Результаты проведенного исследова-

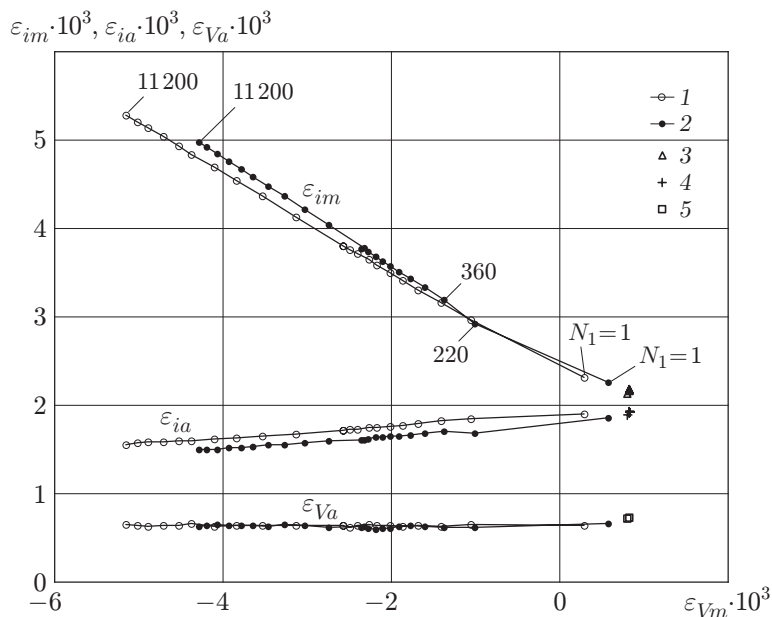


Рис. 6. Диаграммы деформирования образца из сплава Д16АТ асимметричными циклами напряжений:

1 — $\sigma_{\max} = 300$ МПа, $\sigma_{\min} = 8,3$ МПа; 2 — $\sigma_{\max} = 293$ МПа, $\sigma_{\min} = 15,3$ МПа; 3–5 — экспериментальные данные, полученные по методике, используемой при испытаниях материалов на выносливость (3 — ε_{im} , 4 — ε_{ia} , 5 — ε_{Va})

ния показывают, что деформационные характеристики материала зависят от траектории нагружения.

Для сравнения на рис. 6 представлены результаты обработки экспериментальных данных по методике, которая обычно используется при испытаниях материалов на выносливость (точки 3–5). В соответствии с этой методикой используется только деформация ε_x , остальные компоненты тензора деформаций определяются с использованием справочного значения коэффициента Пуассона и предположения о справедливости закона Гука. Значение коэффициента Пуассона принято равным 0,27, деформация ε_x определена в эксперименте со следующими параметрами цикла нагружения образца: максимальное напряжение 293 МПа, минимальное напряжение 15,3 МПа. Данные, полученные по указанной методике (точки 3–5 на рис. 6), не позволяют выявить характеристику, указывающую на изменение состояния материала в процессе циклического деформирования (в результате наложения точек зависимости вырождаются).

По окончании испытания образцов на поверхности рабочей части с помощью оптического микроскопа выявлен микрорельеф поверхности, имеющий сходство с рельефом, описанным в работе [9]. Согласно классификации, предложенной в [9], этот рельеф имеет твидовую структуру.

3. Анализ результатов экспериментов. Результаты проведенных экспериментов показывают, что циклическое нагружение образца в процессе его усталости вызывает монотонное перераспределение деформаций в его рабочей части. Если на этот процесс не оказывать влияния, например, не изменять траекторию нагружения, не оказывать воздействие на структуру материала, то монотонное перераспределение деформаций может продолжаться до тех пор, пока не разрушится образец. Наблюдаемые в опытах изменение параметров деформированного состояния и процесс компактизации при периодическом нагружении не соответствуют существующим в механике сплошной среды представлениям о деформировании реального материала.

Изменение объема подробно изучено в изотермических условиях при исследовании фазовых и структурных превращений, происходящих в материалах в процессе их термообработки и старения. С этой точки зрения процесс компакции, наблюдаемый в проведенных экспериментах в условиях сдвига, можно рассматривать как процесс рекристаллизации материала рабочей части образца под действием переменных нагрузок, а сам процесс усталости материала — как процесс его старения. В общем виде этот процесс описывается уравнением Холла — Петча и заключается в следующем: циклическое нагружение вызывает изменение структуры материала и сопровождается уменьшением размеров элементов структуры и увеличением характеристик прочности, что в процессе усталости реальных металлов приводит к увеличению твердости [7, 8] и уменьшению амплитуды интенсивности деформаций.

Развитие трещин, изучаемое в механике разрушения, происходит в области, находящейся между двумя “усами” пластического течения материала. Из результатов экспериментов, приведенных в данной работе, следует, что в областях интенсивного сдвига (в области “усов” пластического течения) процесс компакции материала происходит наиболее интенсивно. При циклическом нагружении материал, примыкающий к вершине трещины, оказывается упрочненным по обе стороны от нее, а наблюдаемое в опытах разрушение происходит на границе двух плотноупакованных областей, где когерентность связей нарушена. Если при исследовании выносливости материала используется образец без концентратора напряжений, а напряжения относительно невелики, то в рабочей части образца происходит компакция, приводящая к уплотнению структуры. Разрушение материала вследствие усталости происходит не в середине рабочей части образца, а на участке перехода рабочей части в захватную, т. е. на участке изменения структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Москвитин В. В.** Пластичность при переменных нагружениях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1965.
2. **Христианович С. А.** Механика сплошной среды. М.: Наука, 1981.
3. **Шемякин Е. И.** Анизотропия пластического состояния // Численные методы механики сплошной среды. Новосибирск: Вычисл. центр СО АН СССР, 1973. Т. 4, № 4. С. 150–162.
4. **Аннин Б. Д.** Поведение материалов в условиях сложного нагружения / Б. Д. Аннин, В. М. Жигалкин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
5. **Капустин В. И., Степанов В. М.** О связи между напряжениями и деформациями при периодических нагружениях // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 3. С. 92–99.
6. **Новожилов В. В.** О пластическом разрыхлении // Прикл. математика и механика. 1965. № 4. С. 681–689.
7. **Иванова В. С.** Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургиздат, 1963.
8. **Ботвина Л. Р.** Разрушение. Кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008.
9. **Кузнецов В. П., Панин В. Е., Петракова И. В.** Структурно-механические особенности пластической деформации фольг монокристалла $\langle 001 \rangle \{100\}$ алюминия, наклеенных на плоские образцы алюминиевого сплава, при несвободном циклическом растяжении // Физ. мезомеханика. 2008. Т. 11, № 6. С. 103–114.
10. **Пат. 2346257 РФ, М. Кл G 01 N 3/32.** Способ оценки влияния параметров нагружения на процесс деформирования / В. И. Капустин, В. М. Корнев, В. М. Степанов. Оpubл. 10.02.2009. Бюл. № 4.

*Поступила в редакцию 17/XII 2009 г.,
в окончательном варианте — 29/X 2010 г.*