

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.178.15/179.119

Кинетика накопления повреждений в листовом материале при двухосном деформировании по нелинейным траекториям

А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка

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

Исследовано упругопластическое деформирование листового материала при нагружении по криволинейным траекториям в двумерном пространстве деформаций. Установлено влияние параметров траектории деформирования на процесс накопления повреждений в листовом материале. Показано, что экспресс-оценку трещиностойкости материала можно проводить с помощью параметра рассеяния значений твердости.

Ключевые слова: двухосное растяжение, траектория деформирования, накопление повреждений, коэффициент гомогенности, трещиностойкость.

Введение. Силовые элементы конструкций различного назначения, изготовленные из листовых материалов, часто работают в условиях изменяющегося во времени напряженного состояния. Для выполнения расчетов таких элементов необходимо знать основные закономерности накопления повреждений в зависимости от параметров траектории деформирования, на основании которых при наличии тарировочной кривой устанавливается возможность продления ресурса действующих элементов конструкций. С учетом этого и отмеченного в ряде исследований заметного снижения долговечности с ростом сложности процесса деформирования материалов [1, 2] представляет интерес изучение влияния параметров траектории деформирования на процесс накопления повреждений в листовом материале. Такая информация существенно дополнит понимание механизма деградации материала, работающего в условиях сложного деформированного состояния.

Количество простых траекторий деформирования, при которых компоненты деформации увеличиваются пропорционально некоторому параметру, ограничено, существенно больше сложных траекторий: траектории малой кривизны, траектории с изломами и др. [3]. Кроме того, анализ диаграмм деформирования свидетельствует о зависимости величин пределов прочности и текучести, а также относительного удлинения от деформированного состояния, что связано с изменениями структуры материала при упрочнении. Можно предположить, что поврежденность материала зависит от истории деформирования. Заметим, что известно небольшое количество исследований по влиянию истории деформирования на процесс деградации листовых материалов при двухосном растяжении. Представленные в литературных источниках данные [4, 5] не освещают в полной мере процесс

накопления повреждений при деформировании листового материала по различным траекториям, реализуемым при эксплуатации тонкостенных деталей и технологии изготовления элементов конструкции, что определяет необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Методика и результаты испытаний. Исследования проводили по методике испытаний дисковидных образцов [6]. Плоские образцы изготавливали из листа качественной конструкционной стали 20 толщиной 2 мм в состоянии поставки.

Образцы подвергали двухосному растяжению на прецизионном устройстве [7] при различных изначально установленных соотношениях между перемещениями W_1 и W_2 по главным осям деформирования. Схема испытаний следующая (рис. 1). Дисковидный образец прикрепляли горизонтально по периметру к 12 секторам захвата, образующим полый разрезной усеченный конус. Захват размещали на опорных элементах круговой опоры и нагружали в центральной части пуансоном. При этом каждый сектор поворачивается в вертикальной плоскости вокруг опорных элементов, в результате чего рабочая часть образца подвергается двухосному растяжению. Размещая опорные элементы на разных расстояниях от оси пуансона, можно устанавливать необходимое соотношение между перемещениями W_2/W_1 контура исследуемой области по ортогональным осям образца, а следовательно, изменять напряженно-деформированное состояние в его рабочей части.

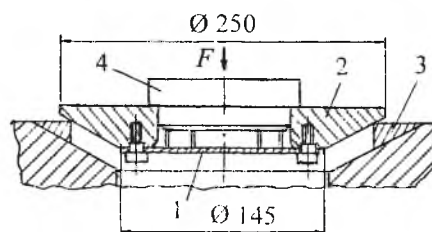


Рис. 1. Схема испытаний дисковидного образца: 1 – дисковидный образец; 2 – сектор захвата; 3 – опорный элемент; 4 – пуансон.

Исходной анизотропии механических свойств исследуемой стали по результатам испытаний на одноосное растяжение плоских стандартных образцов в продольном и поперечном направлении к оси проката листа, а также под углом 45° не обнаружено, так как полученные кривые деформаций практически совпали (рис. 2). Аналогичный по анизотропии результат получен при испытании дисковидных образцов на одноосное растяжение. Образцы ориентировались таким образом, чтобы направление прикладываемой нагрузки совпадало с направлением прокатки или было перпендикулярно к ней.

Испытуемые дисковидные образцы подвергали двухосному деформированию в плоскости листа по двум взаимно перпендикулярным направлениям до достижения по одному из них заданного уровня перемещений. Согласно условиям эксперимента это перемещение при выбранной базе измерений 48 мм составляло 0,84 мм, что соответствовало деформации листа 1,75% в направлении деформирования, т.е. около 30% максимально достигаемой де-

формации при одноосном растяжении ($B = 0$) – 5,8%. Таким образом, опыты проводили на начальном участке кривой деформирования дисковидного образца, где происходит наиболее интенсивное упрочнение материала. Скорость перемещения захватов образца при испытаниях составляла $1 \cdot 10^{-4}$ м/с.

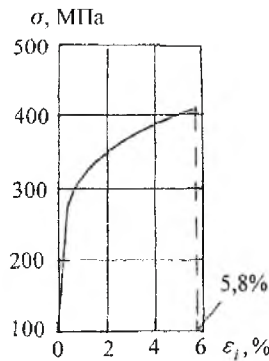


Рис. 2. Диаграмма деформирования дисковидного образца при одноосном растяжении.

На рис. 3,а приведены кривые деформирования образцов в координатах усилие на пуансоне F – перемещение W_1 на базе измерений в направлении реализации наибольшей деформации. В момент остановки опыта (при $W_1 = 0,84$ мм) для деформированного состояния характерны следующие значения интенсивностей деформаций: $\epsilon_i = 3,5\%$ при $B = W_2/W_1 = 0,3$; $3,2\%$ при $B = 0,5$ и $3,0\%$ при $B = 1,0$ (рис. 3,б) и длины пути деформирования (длина диаграмм $F - \epsilon_i$): $l = 260$ усл. ед. при $B = 0,3$; $l = 206$ усл. ед. при $B = 0,5$ и $l = 148$ усл. ед. при $B = 1,0$ (рис. 3,в).

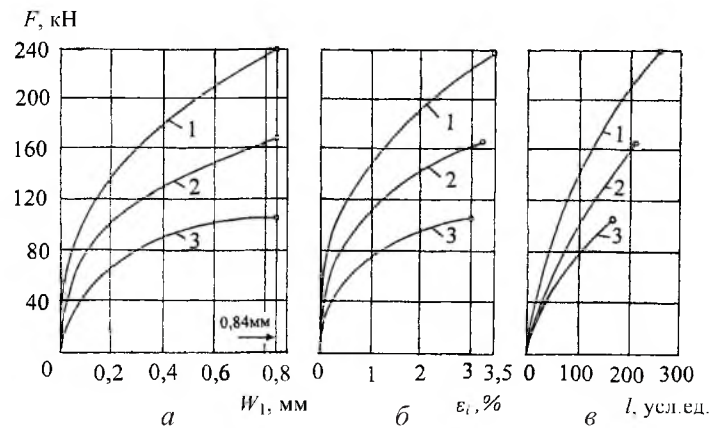


Рис. 3. Диаграммы испытаний дисковидных образцов на двухосное растяжение: а – реализованные машинные диаграммы; б – диаграммы деформаций; в – траектории деформирования: 1 – $B = W_2/W_1 = 0,3$; 2 – $B = W_2/W_1 = 0,5$; 3 – $B = W_2/W_1 = 1,0$.

Приведенные на рис. 3 результаты представлены на рис. 4 в виде зависимостей параметров ϵ_i и l , характеризующих деформированное состояние упругопластического материала, от соотношения ϵ_2/ϵ_1 в плоскости

листа. Видно, что по мере повышения второй компоненты деформаций до $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$ интенсивность процесса деформирования замедляется, а длина траектории l с увеличением двухосности деформирования в исследованном диапазоне деформаций уменьшается. Изменение вида деформированного состояния материала влияет, очевидно, и на структурно-чувствительные характеристики его механических свойств, в частности на степень их рассеяния как признака накопления повреждений в материале и его деградации. К сожалению, исследования состояния материала после деформирования по различным схемам, судя по данным литературных источников [5, 7], практически не проводились, хотя их результаты очень важны как для развития кинетических теорий накопления повреждений, так и для разработки экспресс-методов оценки степени деградации материала реальных конструкций после наработки. В этом отношении могут оказаться полезными опытные данные, полученные при дальнейшем исследовании методом ЛМ-твердости [8, 9] состояния металла уже испытанных при описанных выше схемах деформирования листовых дисковидных образцов. Метод ЛМ-твердости выбран как достаточно опробованный и удобный при массовых механических испытаниях металлов.

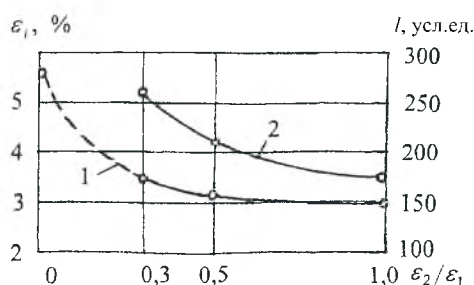


Рис. 4. Влияние двухосности деформирования на деформацию образца (l) и длину траектории (2).

Измерения твердости по Виккерсу [10] проводили по 25 отпечаткам, наносимым в центральной части образца по окружности диаметром 10 мм.

Зависимость твердости стали 20 от двухосности деформирования показана на рис. 5. Видно, что характеристика твердости слабо чувствительна к структурным изменениям материала вследствие изменения вида деформированного состояния. Как и следовало ожидать, параметр рассеяния значений твердости – коэффициент гомогенности Вейбулла m [11], являющийся статистическим критерием процесса накопления повреждений, более чувствителен к изменениям структуры.

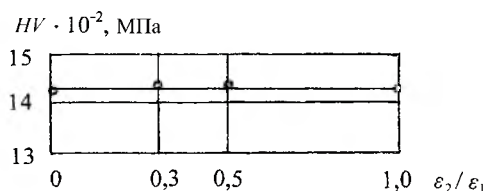


Рис. 5. Твердость стали в зависимости от двухосности деформирования.

На рис. 6 приведены данные о накоплении повреждений в стали в зависимости от двухосности деформирования. Установлено, что при изменении условий деформирования материала от одноосного растяжения до двухосного с соотношением $B=0,3$ коэффициент гомогенности Вейбулла m увеличивается. Это свидетельствует о снижении уровня рассеяния характеристик твердости в этом диапазоне двухосности и, следовательно, об упорядочении структуры металла, низкой степени поврежденности. При дальнейшем увеличении двухосности коэффициент гомогенности уменьшается. Таким образом, лучшая организация структуры наблюдается при $B=0,2...0,5$, худшая – при одноосном растяжении и равномерном двухосном растяжении, которое, судя по удлинению, является наиболее жестким из всех исследованных деформированных состояний. Рассматривая темп накопления повреждений, т.е. стойкость металла к процессу накопления повреждений, к более предпочтительным условиям работы тонкостенных элементов конструкции следует отнести деформированное состояние, характеризующееся значениями показателя двухосности в диапазоне $0,2 < B < 0,5$.

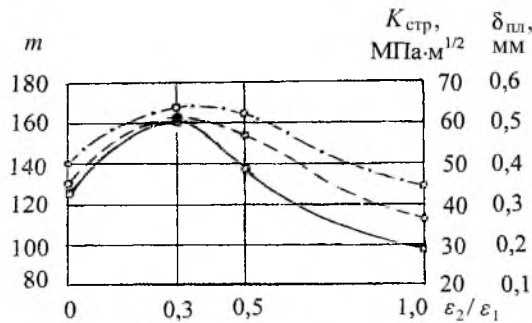


Рис. 6. Накопление повреждений в металле в зависимости от двухосности деформирования в оценке коэффициентом гомогенности m (сплошная линия), коэффициентом интенсивности напряжений $K_{стр}$ (штриховая линия) и деформационным критерием $\delta_{пл}$ (штрихпунктирная линия).

Полученные результаты (рис. 6) находятся в хорошей корреляционной связи с данными по вязкости разрушения при двухосном растяжении листовой стали Ст. 10 [7], физико-механические характеристики которой близки к исследуемой стали. Согласно этим данным вязкость разрушения стали Ст. 10, оцениваемая силовым и деформационным критериями разрушения материала, существенно зависит от вида напряженного состояния. При ориентации трещины перпендикулярно к направлению максимального нормального напряжения с ростом второй растягивающей компоненты критическое значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{стр}$, соответствующее страгиванию трещины и пластической составляющей критического раскрытия трещины $\delta_{пл}$, сначала увеличивается, достигая максимума при $B=0,3...0,5$, а затем плавно уменьшается, принимая минимальные значения при $B=1$. Таким образом, полученные экспериментальные данные показывают, что по результатам определения рассеяния значений твердости с помощью структурно-чувствительного коэффициента гомогенности Вейбулла m можно проводить экспресс-оценку вязкости разрушения материала.

Поврежденность материала зависит от длины траектории деформирования. С ее увеличением коэффициент гомогенности повышается (рис. 7). Наименьшая длина траектории деформирования отвечает двухосному напряженному состоянию $B = 1$. Приведенные данные свидетельствуют, что параметры траектории деформирования и двухосность деформирования в исследованном диапазоне деформаций существенно влияют на процесс накопления повреждений в листовом материале, причем при статическом двухосном растяжении тонких пластин в диапазоне двухосности $0,2 < B < 0,5$ зависимость поврежденности структуры материала от длины траектории коррелирует с зависимостью поврежденности от уровня пластической деформации.

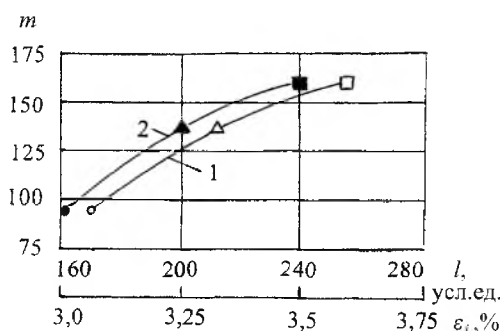


Рис. 7. Оценка поврежденности структуры металла при предельных значениях траектории деформирования (1) и соответствующих им деформациях (2): \circ, \bullet – $B = \varepsilon_2/\varepsilon_1 = 1$; $\triangle, \blacktriangle$ – $B = \varepsilon_2/\varepsilon_1 = 0,5$; \square, \blacksquare – $B = \varepsilon_2/\varepsilon_1 = 0,3$.

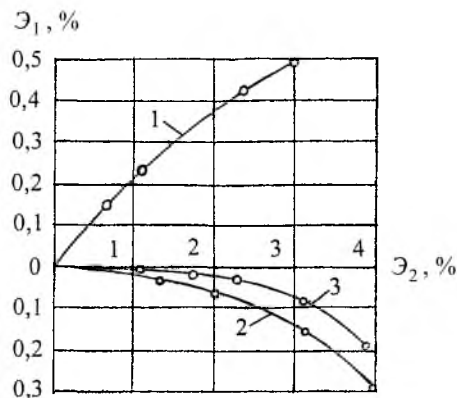


Рис. 8. Траектории деформирования металла при двухосном растяжении: 1 – $B = \varepsilon_2/\varepsilon_1 = 1$; 2 – $B = \varepsilon_2/\varepsilon_1 = 0,5$; 3 – $B = \varepsilon_2/\varepsilon_1 = 0,3$.

Проведена также оценка влияния длины траектории деформирования (параметр Одквиста) на поврежденность материала. На рис. 8 представлены траектории деформирования в плоскости двумерного вектора $\Delta = \Delta_1 p_1 + \Delta_2 p_2$ (p_1, p_2 – единичные векторы), составляющие которого определяются из выражений [12]

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{3}{2}}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2); \quad \Delta_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}(2\varepsilon_2 + \varepsilon_1 - \varepsilon_0); \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3).$$

На рис. 9 приведено сравнение зависимостей длин траекторий от двухосности деформирования, построенных по данным $\mathcal{E}_1 = f(\mathcal{E}_2)$ и $l = f(F)$. Видно, что кривые качественно коррелируют между собой и при выборе соответствующего масштаба длин траекторий деформирования можно ожидать их совпадения, при этом параметр Одквиста можно считать адекватной характеристикой поврежденности листового материала, работающего в условиях двухосного растяжения.

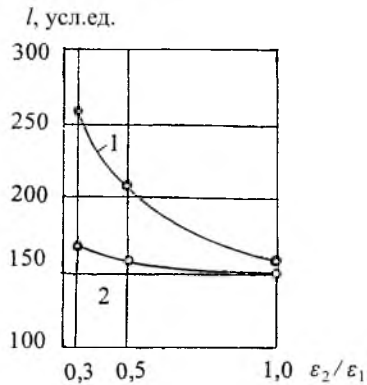


Рис. 9. Сравнение зависимостей длин траекторий от двухосности деформирования: 1 – по $\mathcal{E}_1 = f(\mathcal{E}_2)$, рис. 8; 2 – по $l = f(F)$, рис. 3, в.

Заключение. Проведенные исследования показали, что изменение состояния структуры материала при двухосном нагружении может быть оценено длиной траектории деформирования. Наименьший темп роста повреждений при двухосном растяжении наблюдается при соотношениях деформаций, близких к $B = \varepsilon_2/\varepsilon_1 = 0,3$.

Резюме

Досліджено пружнопластичне деформування листового матеріалу при деформуванні за криволінійними траєкторіями у двовимірному просторі деформацій. Установлено вплив параметрів траєкторії деформування на процес накопичування пошкоджень у листовому матеріалі. Показано, що експрес-оцінку в'язкості руйнування матеріалу можна проводити за допомогою параметра розсіювання значень твердості.

1. Дегтярев В. П. Некоторые методические вопросы исследования критериев разрушения при сложном напряженном состоянии и сложном нагружении // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1978. – № 1. – С. 187 – 191.
2. Kanasawa K., Miller K. J., and Brown M. W. Low-cycle fatigue under out-of-phase loading conditions // Trans. ASME, Ser. D. – 1977. – 98, No. 3. – P. 222 – 228.
3. Зилауц А. Ф. Классификация путей нагружения в теории пластичности // Механика полимеров. – 1978. – № 1. – С. 16 – 21.

4. Можаровский Н. С., Антипов Е. А., Бобырь Н. И. и др. Предельное состояние материала при программном изменении интенсивности напряжений в условиях плоского напряженного состояния при различных траекториях нагружения // Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии: Тр. Всесоюз. совещ. – Киев: Наук. думка, 1978. – С. 171 – 179.
5. Каминский А. А., Бастун В. Н. Деформационное упрочнение и разрушение металлов при переменных процессах нагружения. – Киев: Наук. думка, 1985. – 197 с.
6. Лебедев А. А., Бойко А. В., Музыка Н. Р. Метод испытаний материалов при равномерном двухосном растяжении // Пробл. прочности. – 1982. – № 2. – С. 105 – 107.
7. Лебедев А. А., Музыка Н. Р. Методы испытаний и механика разрушения листовых материалов при двухосном растяжении. – Луцк: Надстырь, 2004. – 214 с.
8. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 12.
9. Патент № 52107А, МКІ7 G 01 N 3/00, G 01 N 3/40. Україна. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання, “LM – метод твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Опубл. 15. 01. 2003. Бюл. № 1.
10. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – М.: Изд-во стандартов, 1975.
11. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л., Недосека С. А. Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты // Пробл. прочности. – 2003. – № 2. – С. 29 – 36.
12. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 341 с.

Поступила 12. 12. 2005