

Исследование накопления повреждений в листовом материале при сложном напряженном состоянии

Н. Р. Музыка

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

Приведены результаты исследования влияния вида напряженного состояния на накопление рассеянных повреждений в условиях повторно-статического двухосного растяжения конструкционной углеродистой листовой стали. Показано, что наиболее низкая способность металла к накоплению повреждений наблюдается при двухосном растяжении с показателем двухосности 0,25...0,3.

Ключевые слова: двухосное растяжение, плоское напряженное состояние, упрочнение, накопление повреждений, коэффициент гомогенности.

Введение. Известно, что величина разрушающей конструкцию нагрузки зависит не только от физико-механических характеристик материала, но и от его способности к накоплению повреждений при данном виде напряженного состояния [1]. При этом главным фактором, влияющим на интенсивность накопления повреждений в материалах в условиях деформирования, является вид напряженного состояния [2]. Так, при двухосном растяжении значения прочностных характеристик более высокие, деформационных – более низкие по сравнению с таковыми при одноосном. Это связано с различием механизмов деформационного упрочнения металлов при одно- и двухосном растяжении, проявляющихся при холодной пластической деформации из-за увеличения дефектов кристаллической решетки (вакансии, дислокации), количества дислокаций одного знака и угла разориентировки между блоками. Упрочнение металла происходит на фоне разной интенсивности накопления рассеянных повреждений в материале [3, 4], механизмы которых при пластическом деформировании недостаточно изучены, особенно при сложном напряженном состоянии.

Для описания поврежденности материала при сложном напряженном состоянии используются различные гипотезы, однако оценить повреждения структуры металла при одновременном протекании процессов накопления рассеянных повреждений и упрочнения известными методами, в том числе по диаграммам растяжения или твердости, достаточно сложно [5]. Это обусловлено тем, что в большинстве известных прямых и косвенных методов оценки состояния материала в конструкции отсутствует устойчивая корреляция измеряемых величин с механическими характеристиками и его реальным структурным состоянием [1]. Наиболее приемлемыми методами, позволяющими провести такую оценку, являются метод построения деструкционных диаграмм, представляемых в виде зависимостей истинное напряжение – остаточная деформация, по которым определяют “точку деструкции” [6], и метод акустической эмиссии [7]. Однако метод построения деструкционных диаграмм не получил распространения ввиду его сложности, а метод акустической

эмиссии – из-за трудоемкости и необходимости применения дорогостоящей аппаратуры.

В связи с этим представляют интерес результаты исследований, направленных на разработку удобных в практическом использовании методов неразрушающего контроля состояния материала при наработке, которые чувствительны к виду напряженного состояния и позволяют исследовать процесс накопления повреждений в условиях плоского напряженного состояния.

Методика испытаний. В настоящей работе процесс накопления повреждений в листовой конструкционной углеродистой качественной стали 25 в условиях плоского напряженного состояния исследовали по методике испытаний дисковидного образца [8]. Методика позволяет при исследовании углеродистых конструкционных сталей (ГОСТ 1050-88) достичь уровня деформации до 5%, металлических материалов с повышенными свойствами пластичности – до 8%.

Подвергаемый испытанию дисковидный образец (рис. 1) с помощью равномерно расположенных по периферийной части отверстий крепится к отдельным секторам кольцевидного захвата. Сектора образуют конус, наружная боковая поверхность которого опирается на расположенные по окружности регулируемые в радиальном направлении упоры, составляющие круговую опору. К секторам кольцевидного захвата в центральной части посредством цилиндрического пуансона прикладывается нагрузка F [9].

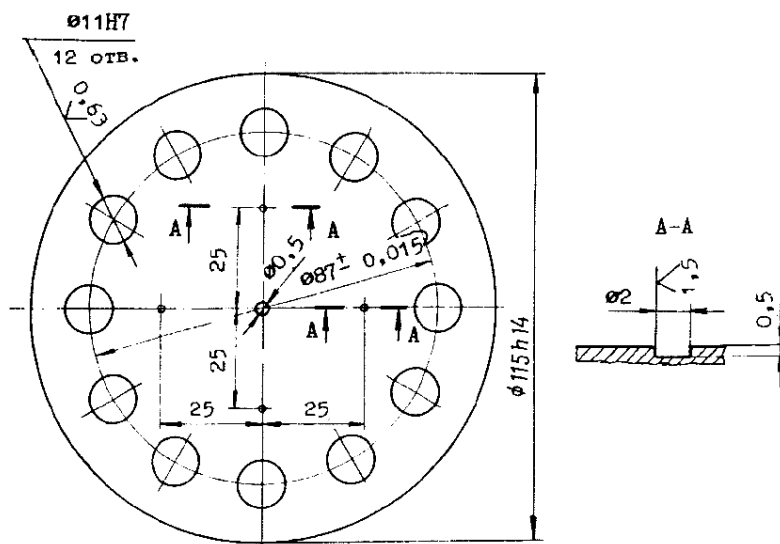


Рис. 1. Плоский дисковидный образец (в сечении А–А показаны отверстия для установления тензометра).

При нагружении каждый сектор горизонтально расположенного захвата поворачивается в вертикальной плоскости относительно упоров круговой опоры, в результате чего в рабочей части дисковидного образца реализуется двухосное растяжение с заданным коэффициентом двухосности. Размещая упоры на разном расстоянии от оси пуансона, можно устанавливать необходимое соотношение между перемещениями контура исследуемой области по

ортогональным осям образца, а следовательно, изменять напряженно-деформированное состояние в его рабочей части. Скорость нагружения образца составляет 1,0 кН/мин.

Величину деформации определяли по результатам тензометрических измерений перемещений W_1 и W_2 в рабочей части дисковидного образца в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Деформирование образца осуществляется при пропорциональном изменении линейных перемещений W_1 и W_2 при показателе двухосности $B = W_1/W_2 = 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4$.

Обычно влияние вида напряженного состояния на изменение структуры в процессе пластического деформирования оценивают в зависимости от уровня интенсивности деформаций по изменению таких параметров, как плотность дислокаций, физические уширения рентгеновских линий и др. [10, 11]. Однако для проведения подобных исследований требуется специальная аппаратура. В данной работе для контроля состояния металла на разных стадиях его деформирования используется чувствительный к трансформации структуры метод ЛМ-твердости [12], который может быть реализован непосредственно на диагностируемых элементах конструкций [13].

Метод основан на связи степени рассеяния значений измеряемой характеристики механических свойств со степенью однородности структуры материала [14, 15], т.е. с уровнем его поврежденности, о которой судят по параметрам закона распределения значений измеряемой характеристики, в рассматриваемом случае – твердости. Оценка поврежденности материала с использованием коэффициента гомогенности m по рассеянию значений твердости не требует установления причин протекания процессов деформационного упрочнения (образование текстуры, изменения направленности зерен и их размеров, дислокационных механизмов, повышение плотности структурных дефектов и др. [16]) и накопления повреждений, поскольку рассеяние значений твердости как интегральной характеристики является следствием происходящих процессов в структуре материала. Предполагается, что накопление рассеянных повреждений в материале в рабочей части дисковидного образца происходит безградиентно. Измерения твердости проводили по методу Виккерса [17] в рабочей части образца – в зоне однородного поля напряжений, размеры и форму поля определяли по наносимой сетке и результатам тензометрирования малобазными тензорезисторами.

Результаты исследования и их обсуждение. Экспериментальные исследования процессов накопления повреждений в термообработанной листовой стали 25 толщиной 1 мм проводили при деформировании в условиях одно- и двухосного растяжения методом ЛМ-твердости. На рис. 2 приведена типичная диаграмма деформирования стали, полученная путем обработки результатов испытаний на одноосное растяжение (согласно ГОСТ 1497-84) серии образцов, вырезанных вдоль и поперек направления проката листового материала. Отметим, что независимо от направления вырезки образцов диаграммы их деформирования совпадают, что свидетельствует об отсутствии заметной анизотропии механических свойств испытываемого металла. На рис. 2 также представлена диаграмма изменения твердости образцов из стали 25 при одноосном растяжении. Видно, что с развитием процесса деформирования имеет место незначительное повышение твердости.

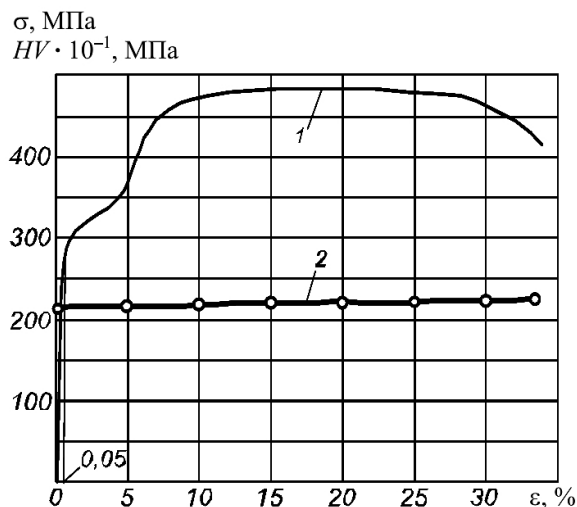


Рис. 2. Диаграммы деформирования (1) и изменения твердости (2) стандартных образцов из листовой стали 25 при одноосном растяжении.

Поскольку исследуемый материал склонен к упрочнению, принято считать, что точка на диаграмме деформирования, отвечающая пределу прочности, характеризует переход от стадии упрочнения к стадии его разупрочнения и разрушения вследствие активного накопления повреждений. Эта стадия соответствует ниспадающему участку кривой деформирования [5]. Однако такая оценка будет условной, поскольку не характеризует в полной мере процесс накопления повреждений в металле. Изменение характеристики твердости (рис. 2) также не отражает происходящие изменения в структуре металла из-за слабочувствительности ко многим видам трансформации структуры, т.е. к степени поврежденности [13].

Накопление рассеянных повреждений в материале можно оценить с помощью чувствительного к изменению структуры коэффициента гомогенности Вейбулла m , определяемого по данным статистической обработки результатов измерений твердости [14].

Для этого образцы подвергали растяжению до различных уровней деформации. При каждом уровне деформации проводили 25 измерений твердости, отпечатки были ориентированы по окружности в центральной части образца в зоне однородного напряженного состояния. Расстояние между двумя соседними отпечатками составляло не менее 1,5 мм в соответствии с требованиями стандарта на метод измерения твердости по Виккерсу [17].

На рис. 3 приведены кривые накопления повреждений в листовой стали 25 при одноосном растяжении вдоль и поперек направления проката листа.

Видно, что на начальном участке кривых пластического деформирования при уровне деформации до $\epsilon_i = 0,01\%$ наблюдается резкое уменьшение коэффициента гомогенности Вейбулла m , что свидетельствует об активном накоплении рассеянных повреждений в материале образца. При дальнейшем деформировании образца коэффициент уменьшается монотонно. Это говорит о том, что наряду с протеканием процесса накопления повреждений про-

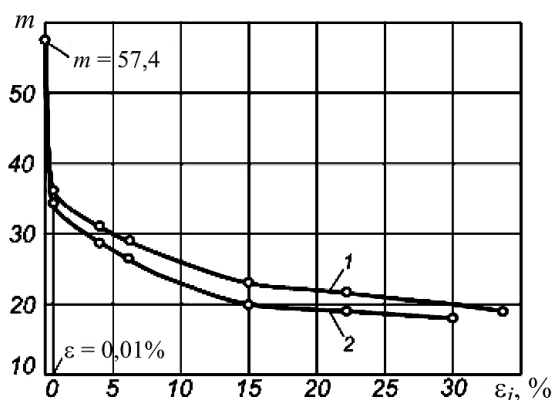


Рис. 3. Оценка повреждаемости структуры стали 25 при одноосном растяжении вдоль (1) и поперек (2) направления проката листа.

исходит процесс упрочнения металла (до $\varepsilon_i = 15\%$) вследствие дробления, поворота и ориентировки зерен, перестройки несовершенной структуры в более упорядоченную текстуру [18].

Происходит так называемая концептуальная деградация материала без нарушения его сплошности [19], переходящая при $\varepsilon_i > 15\%$ в стадию активного взаимодействия накопленных микродефектов, вследствие чего начинается процесс разупрочнения материала, что приводит к деструктивной деградации.

Несмотря на то что твердость листовой стали после деформирования в разных направлениях к оси проката описывается одной диаграммой (рис. 2), все же повреждаемость металла при одинаковых значениях деформации различается (рис. 3): накопление повреждений в материале, ориентированном в направлении проката, происходит менее интенсивно, чем в поперечном направлении. Такое накопление повреждений в металле образцов не представляется возможным выявить с помощью штатной аппаратуры при испытаниях на одноосное растяжение и измерении твердости.

Таким образом, одновременно с деформационным упрочнением (рис. 2 и 3), при котором наблюдается упорядочение микроструктуры металла, происходит процесс ее повреждения, накопления несплошностей в виде пустот, ячеек, субмикротрещин и др.

Диаграммы деформирования дисковидных образцов при двухосном растяжении представлены на рис. 4. Как видно, при $B = 1:0, 1:1$ деформационное упрочнение материала происходит при небольших уровнях нагрузки. Увеличение одной из компонент задаваемых перемещений существенно влияет на динамику роста повреждаемости материала по мере его деформирования, о чем свидетельствует уменьшение скорости пластического деформирования с повышением уровня нагрузки.

Предельно достигнутый уровень деформации дисковидного образца при испытаниях на двухосное растяжение зависит от его конструкции и возможностей испытательного оборудования и ограничивается потерей несущей способности образца, разрушающегося либо по крепежным отверстиям, либо по отверстиям, выполненным в его рабочей части для установки тензометров

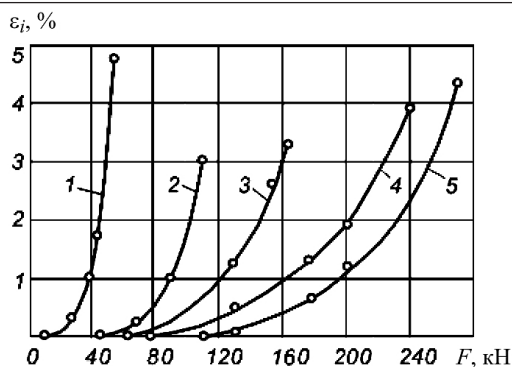


Рис. 4. Деформирование дисковидного образца стали 25 при двухосном растяжении. (Здесь и на рис. 6: 1 – $B = \varepsilon_2/\varepsilon_1 = 1:0$; 2 – $B = 1:1$; 3 – $B = 1:2$; 4 – $B = 1:3$; 5 – $B = 1:4$.)

(рис. 1). Заметим, что значение коэффициента m , соответствующее максимально достигаемой при испытаниях деформации образца, может не в полной мере отвечать реальному состоянию структуры материала при предельной деформации.

Так, при деформировании образца при соотношении $B = 1:1, 1:2$ разрушение происходит по рабочему полю от отверстия под тензометр (рис. 1), что свидетельствует о близости достигнутого уровня деформации к предельному ее значению, при $B = 1:0, 1:3, 1:4$ образец разрушается по крепежным отверстиям, не достигнув того уровня деформации, при котором разрушение начинается от отверстий для установки тензометров.

Зависимость твердости стали от степени двухосности деформирования показана на рис. 5. Видно, что характеристика твердости слабочувствительна к структурным изменениям материала вследствие изменения показателя двухосности.

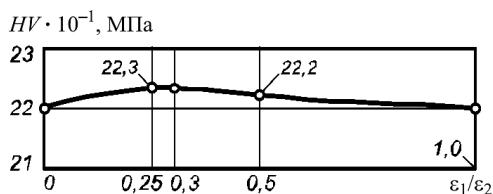


Рис. 5. Твердость стали в зависимости от степени двухосности деформирования.

На рис. 6 приведены данные о накоплении повреждений в стали в зависимости от уровня деформации и степени двухосности деформирования. Начальный участок пластического деформирования материала (до $\varepsilon_i = 1\%$), для которого характерно существенное нелинейное упрочнение материала, из рассмотрения исключен. При развитой пластической деформации материала, начиная с $\varepsilon_i = 1\%$, нелинейность упрочнения уменьшается.

С увеличением уровня деформации процессы накопления повреждений и упрочнения материала продолжают до момента равновесного состояния, характеризуемого изломом кривой (например, для $B = 1:1$ точка излома отмечается при $\varepsilon_i = 2\%$, для $B = 1:0$ – при $\varepsilon_i = 4\%$), после которого интенсивность накопления рассеянных повреждений преобладает над упрочнением.

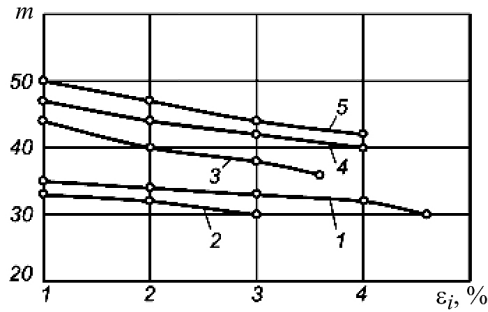


Рис. 6. Накопление повреждений в металле в зависимости от степени двухосности деформирования в оценке коэффициентом гомогенности m .

Лучшая организация структуры вследствие низкого уровня накопленных рассеянных повреждений наблюдается на участке упрочнения при соотношении $B = 1:2, 1:3, 1:4$, худшая – при одноосном ($B = 1:0$) и равномерном двухосном ($B = 1:1$) растяжении, наиболее жестком из исследованных деформированных состояний. Судя по способности стали сопротивляться накоплению повреждений, оцененной коэффициентом гомогенности m , к более приемлемым условиям работы элементов конструкции, изготовленных из листовой стали, следует отнести деформированное состояние с показателем двухосности $B = 0,25 \dots 0,3$.

Анализ процесса накопления повреждений показывает, что основная масса рассеянных повреждений в исследуемой стали зарождается на начальном этапе деформирования при низких уровнях деформации (до $\varepsilon_i = 0,01\%$) – рис. 3. Далее деформация протекает в условиях менее интенсивного накопления повреждений, в основном за счет течения материала. По достижении $\varepsilon_i = 0,2\%$ накопление повреждений в материале увеличивается одновременно с ростом его упрочнения до деформации $\varepsilon_i = 2 \dots 4\%$, затем способность к накоплению повреждений падает, а повреждаемость повышается, главным образом, в результате расширения пор и других несплошностей до достижения деформации, соответствующей пределу прочности, при которой реализуется процесс разрушения перемычек между порами и микротрещинами, их слияние и образование магистральной трещины [5]. Как видно из приведенных на рис. 6 данных, зависимости коэффициента гомогенности m от деформации для различных значений показателя двухосности B , не имеют сингулярностей, что свидетельствует о регулярности процессов накопления повреждений в металле.

Заключение. Несмотря на сложность структурных изменений в материале при низких уровнях деформации и на участке упрочнения в результате накопления повреждений при одно- и двухосном растяжении, можно качественно оценить этот процесс без привлечения сложного аппаратного обеспечения путем статистической обработки данных исследований методом ЛМ-твердости.

На процесс накопления повреждений существенное влияние оказывают величины второй компоненты тензора деформации при плоском напряженном состоянии. Переход от равноосного статического двухосного растяжения к неравноосному затрудняет рост рассеянных повреждений. Если вторая

компонента тензора деформаций составляет менее 30% ($B = 0,25 \dots 0,3$) максимальной деформации, то в этом случае коэффициент гомогенности будет большим, чем при одноосном растяжении, что свидетельствует о большей упорядоченности структуры металла. При дальнейшем увеличении второй компоненты параметр повреждаемости снижается. Методика позволяет определить участок активного накопления повреждений, который наблюдается на начальной стадии деформирования. Полученные данные качественно совпадают с результатами исследования деструкции металлических материалов при одноосном растяжении методом акустической эмиссии [7].

Работа выполнена в соответствии с планом научных исследований по программе “Ресурс”.

Резюме

Наведено результати дослідження впливу виду напруженого стану на накопичення розсіяних пошкоджень в умовах повторно-статичного двовісного навантаження конструкційної вуглецевої листової сталі. Показано, що найбільш низька здатність металу до накопичення пошкоджень спостерігається при двовісному розтязі зі ступенем двовісності 0,25...0,3.

1. *Сосновский Л. А., Махутов Н. А., Бордовский А. М., Воробьев В. В.* Статистическая оценка деградации свойств материала нефтепровода // Завод. лаб. – 2003. – № 11. – С. 40 – 49.
2. *Матвийчук В. А.* Математическая модель повреждаемости металлов при сложном двухэтапном деформировании // Вісн. Донбас. держ. машинобудівної академії. – 2008. – № 3Е (14). – С. 127 – 130.
3. *Гордиенко Л. К.* Субструктурное упрочнение металлов и сплавов. – М.: Наука, 1973. – 224 с.
4. *Байков В. М., Бутушин С. В., Городецкий В. Н. и др.* Исследование деградации механических характеристик конструкционного сплава Д16АТ в результате воздействия эксплуатационной наработки // Завод. лаб. – 2003. – № 11. – С. 50 – 54.
5. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2004. – 133 с.
6. *Рыбакова Л. М.* Механические закономерности деструкции металла при объемном и поверхностном пластическом деформировании // Пробл. машиностроения и надежности машин. – 1998. – № 5. – С. 113 – 123.
7. *Буйло С. И., Козинкина А. И.* К вопросу об оценке накопления повреждений и момента перехода от рассеянного к локализованному дефектообразованию по восстановленным значениям потока актов акустической эмиссии // Физика твердого тела. – 1996. – 38, № 11. – С. 3381 – 3384.
8. *Лебедев А. А., Бойко А. В., Музыка Н. Р.* Метод испытаний материалов при равномерном двухосном растяжении // Пробл. прочности. – 1982. – № 2. – С. 105 – 107.

9. Лебедев А. А., Музыка Н. Р. Методы испытаний и механика разрушения листовых материалов при двухосном растяжении. – Луцк: Надстырье, 2004. – 214 с.
10. Истомина Э. С., Нижник С. Б. Влияние вида напряженного состояния на текстуру деформации в аустенитной стали // Физика металлов и металлосведение. – 1972. – № 2. – С. 369 – 376.
11. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 341 с.
12. Пат. № 52107А Україна. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “LM-метод твердості” / Лебедев А. О., Музыка М. Р., Волчек Н. Л. – Чинний з 15.01.2003.
13. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 11.
14. Лебедев А. А., Маковецкий И. В., Музыка Н. Р. и др. Оценка поврежденности материала по рассеянию характеристик упругости и статической прочности // Там же. – 2006. – № 2. – С. 5 – 14.
15. Лебедев А. А., Ламашевский В. П., Музыка Н. Р. и др. Кинетика накопления рассеянных повреждений в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях // Там же. – 2011. – № 5. – С. 32 – 44.
16. Колмаков А. Г. Использование положений системного подхода при изучении структуры, особенностей пластической деформации и разрушения металлов // Металлы. – 2004. – № 4. – С. 98 – 107.
17. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – М: Изд-во стандартов, 1975. – 30 с.
18. Каминский А. А., Бастун В. Н. Деформационное упрочнение и разрушение металлов при переменных процессах нагружения. – Киев: Наук. думка, 1985. – 167 с.
19. Одесский П. Д. О деградации свойств сталей для металлических конструкций // Завод. лаб. – 2003. – № 10. – С. 41 – 48.

Поступила 09. 10. 2012