

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620(186.4+179.16)

А.В. Гончар, В.В. Мишакин

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нижегородский филиал ФГБУН Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Исследовано влияние локального термического воздействия (нагрев до температуры 1100°C) на распределение пластической деформации и акустической анизотропии конструкционной углеродистой стали СтЗсп при одноосном растяжении. На основании полученных результатов предложен алгоритм оценки величины пластической деформации структурно-неоднородных металлов по данным металлографических исследований и ультразвуковых измерений.

Ключевые слова: одноосное растяжение, деформация, ультразвук, металлографические исследования, сварной шов, термическое влияние.

Исследование влияние локального термического воздействия на характеристики металла является важной задачей. Локальное термическое воздействие на металл осуществляется, например, при сварке, установке электрозаклепок и других технологических операциях. Воздействие высоких температур на металлические сплавы приводит к изменению дислокационной структуры, среднего диаметра зерна, фазового состава, к существенному изменению характеристик прочности и пластичности [1].

Структурные изменения, связанные как с термическим влиянием, так и с процессом деформирования можно оперативно контролировать современными портативными металлографическими комплексами, например, таким как СПЕКТР МЕТ-М. Этот комплекс позволяет проводить металлографические исследования как на отдельных образцах, так и непосредственно на материалах элементов конструкций. Использование современных портативных металлографических комплексов существенно расширяет возможности оптических методов.

Другим методом, наиболее подходящим в инженерном плане для контроля структурного состояния, является акустический метод. Основное преимущество ультразвукового метода контроля по сравнению с другими методами заключается в его низкой стоимости, возможности исследования практически любых материалов, высокой скорости контроля, возможности измерений при одностороннем доступе к объекту контроля (ОК).

Цель данной работы заключается в разработке алгоритма оценки величины пластической деформации в материале, имеющем зону термического влияния (ЗТВ), на основе ультразвуковых измерений и металлографических исследований.

Для исследования использовался плоско-параллельный образец прямоугольного сечения (рис. 1), изготовленный из листовой горячекатаной стали СтЗсп. Образец локально нагрели до температуры 1100 °С в двух зонах. Схема локального термического воздействия представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема локального термического воздействия

Металлографические исследования проводились в ЗТВ и основном материале. В исследуемых зонах был изготовлен микрошлиф и проведено травление 3% раствором азотной кислотой. Методика расчета среднего диаметра зерна на исследуемом участке ЗТВ заключалась в следующем: параллельно оси Y (рис. 1) проводилось несколько реперных линий; по расстояниям между точками пересечения реперных линий с границами зерен определяли диаметр зерна. Определялся размер зерен феррита на участке перегрева, характеризующийся пониженным пределом текучести вследствие повышенного значения размеров зерен (закон Холла-Петча) и разупрочнения из-за снятия наклёпа. На этом участке наблюдаются наибольшие по величине пластические деформации. На участках материала с видманштеттовой структурой, имеющей пониженные пластические свойства, размер зерна не измерялся. При вычислении среднего значения диаметра зерна на участке ЗТВ исследовалось не менее 100 зерен. Величина пластической деформации определялась в местах проведения реперных линий.

Для проведения акустических исследований образцы условно были разделены на зоны (рис. 1). Ширина каждой зоны в ЗТВ составила 3-5 мм, в основном металле – 10 мм. Акустические исследования проводились ультразвуковым эхоимпульсным методом. Использовались ультразвуковые датчики фирмы Olimpus для возбуждения поперечных упругих волн. Диаметр датчиков – 8 мм, центральная частота – 5 МГц. Измерения повторялись в каждой зоне не менее пяти раз.

В результате акустических исследований регистрировалась амплитудно-временная диаграмма, на основе которой вычислялся параметр акустической анизотропии:

$$A = \frac{2(V_{zx} - V_{zy})}{V_{zx} + V_{zy}} = \frac{2(\tau_{zy} - \tau_{zx})}{\tau_{zy} + \tau_{zx}}, \quad (1)$$

где V_{zx} , V_{zy} , τ_{zx} и τ_{zy} – скорости и времена распространения поперечных УВ, поляризованных вдоль и поперек направления проката соответственно. Абсолютная погрешность измерения параметра акустической анизотропии не превышала 10^{-4} . Величина акустической анизотропии отражает кристаллографическую текстуру и ее изменение в процессе пластического деформирования. Для измерения величины акустической анизотропии, которая пропорциональна коэффициенту функции распределения ориентировок W_{420} ($A \propto W_{420}$) [2], как и в случае металлографических исследований, достаточно одностороннего доступа к конструкции.

В результате одноосного растяжения образца на величину $\varepsilon_x=5\%$ получено неоднородное распределение деформации ε_z по длине образца (рис. 2).

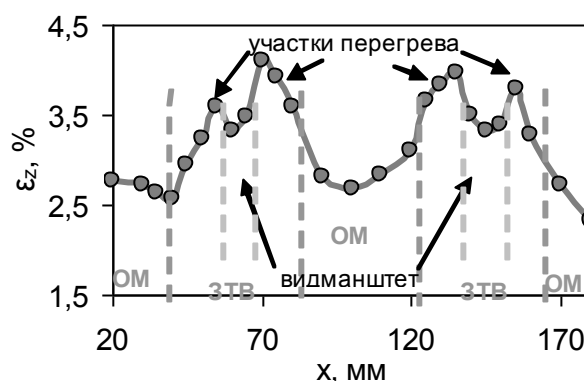


Рис. 2. Распределение величины пластической деформации по длине образца

Металлографические исследования показали, что в ЗТВ в областях с меньшей величиной пластической деформации наблюдается видманштеттова структура (рис. 3, а), в областях с наибольшим значением деформации наблюдается повышенный диаметр зерна, что соответствует участку перегрева (рис. 3, б).

Деформация в основном материале существенно меньше чем в ЗТВ. Фотография микроструктуры в основном материале представлена на рис. 3, в.

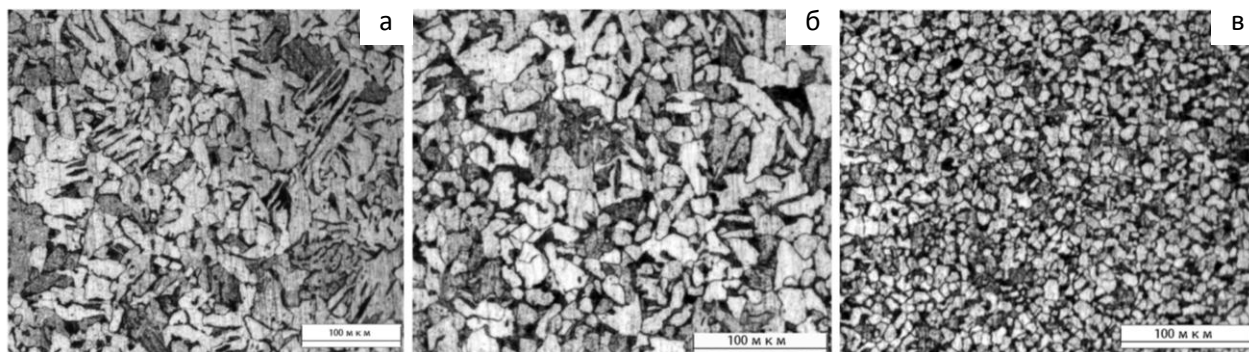


Рис. 3. Фотографии микроструктуры стали СтЗсп:
а – видманштетт; б – участок перегрева; в – основной металл

Увеличение размеров зерен на отдельных участках ЗТВ, при отсутствии существенного различия в химическом и фазовом составе материала, должно приводить к снижению предела текучести, увеличению пластических свойств материала в ЗТВ по отношению к основному металлу.

Используя соотношение Холла-Петча, при указанных ранее условиях можно рассчитать влияние локального изменения диаметра зерна на развитие неоднородности пластической деформации.

Зависимость предела текучести σ_T от размера зерна d определяется соотношением Холла-Петча:

$$\sigma_{Ti} = \sigma_{0i} + k_{fi} \bar{d}_i^{-1/2}, \quad (2)$$

где σ_0 и k_{fi} – постоянные величины, характеризующие материал, $i = 1$ для основного металла, $i = 2$ для ЗТВ.

Связь напряжения течения с величиной пластической деформации описывается уравнением Людвига:

$$\sigma_i = \sigma_{Ti} + c_i \varepsilon_i^{n_i}, \quad (3)$$

где σ_{Ti} и c_i – постоянные, зависящие от величины остаточной деформации, n_i – показатель деформационного упрочнения (здесь и далее $\varepsilon = \varepsilon_x$).

На начальных этапах деформирования $\sigma_1 \approx \sigma_2$. Предполагаем, что характеристики упрочнения металла в основном материале и на участке ЗТВ с повышенным диаметром зерна мало отличаются ($n_1 \approx n_2 \approx n$, $c_1 \approx c_2 \approx c$, $k_{f1} \approx k_{f2} \approx k$).

Подставляя (2) в (3) для ЗТВ и основного материала, получим

$$\varepsilon_{ЗТВ} = \left(\frac{k}{c} (\bar{d}_{осн\ мет}^{-1/2} - \bar{d}_{ЗТВ}^{-1/2}) + \varepsilon_{осн\ мет}^n \right)^{1/n}. \quad (4)$$

Таким образом, зная величину деформации в основном материале и средние значения диаметров зерен в основном материале и ЗТВ, возможно определение величины деформации в ЗТВ.

Как показали акустические исследования, между величиной пластической деформации и параметром акустической анизотропии существует устойчивая связь.

В результате акустических измерений получено распределение параметра акустической анизотропии по длине образцов до и после деформации рис. 4.

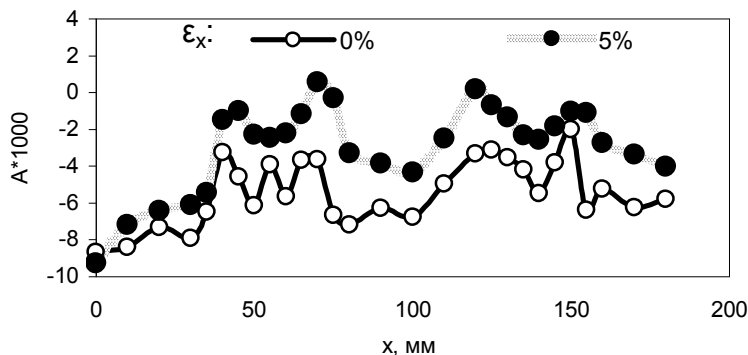


Рис. 4. Распределение величины акустической анизотропии по длине образца в исходном состоянии и после растяжения

Связь величины пластической деформации в исследуемых зонах с параметром акустической анизотропии хорошо аппроксимируется полиномом второй степени:

$$\varepsilon_{zi}(\%) = k_{0\varepsilon} + k_{1\varepsilon}A_i + k_{2\varepsilon}A_i^2, \quad (5)$$

где $k_{1\varepsilon} = 28000$, $k_{2\varepsilon} = 377$, $k_0 = 3,88$, индекс i — номер исследуемой зоны.

Следует отметить, что значения параметра акустической анизотропии в исследуемых зонах в исходном состоянии хорошо коррелируют с значением параметра A при величине пластической деформации образца $\varepsilon_x = 5\%$ (рис. 5).

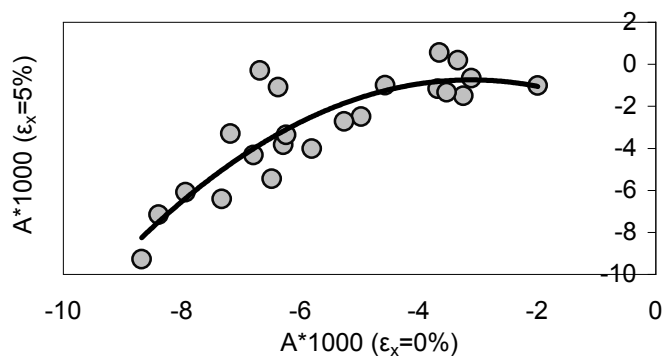


Рис. 5. Корреляционное поле значений параметра акустической анизотропии при деформации $\varepsilon_x = 5\%$ и значений того же параметра в исходном состоянии материала

Как отмечалось ранее, параметр A отражает развитие кристаллографической текстуры. Кривые на рис. 4 показывают, что изменение кристаллографической текстуры связано с ее начальным состоянием. Наблюдается автомодельность развития параметра A по длине образца, связанного с исходным структурным состоянием исследуемой стали.

Околошовная зона свариваемого материала также подвергается воздействию высоких температур, приводящих к существенным изменениям структурного состояния и механических характеристик.

В связи с изложенным, помимо образца с двумя ЗТВ исследовался образец, изготовленный из листовой горячекатаной стали СтЗсп, имеющий сварное соединение. Образец имел прямоугольное сечение 250x20x6 мм. Сварной шов находился в середине образца.

Сварка выполнялась встык. Образец был подвергнут поэтапному одноосному растяжению с шагом деформации $\varepsilon_x=5\%$ вплоть до разрушения (разделения на 2 части). Распределение величины пластической деформации и параметра акустической анизотропии по длине сварного образца представлены на рис. 6, а и рис. 6, б соответственно.

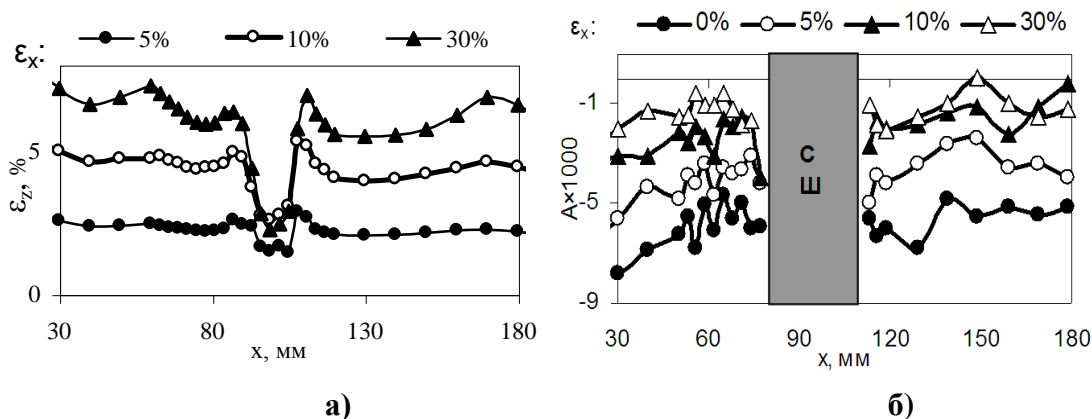


Рис. 6. Распределение по длине сварного образца:

а – величины пластической деформации; б – параметра акустической анизотропии

Связь величины пластической деформации ε_x со средним значением изменения параметра акустической анизотропии в зоне основного металла для исследуемого сварного образца можно представить в виде:

$$\varepsilon_x(\%) = k_{1\Delta} \Delta \bar{A}_i + k_{2\Delta} \Delta \bar{A}_i^2, \quad (6)$$

где $k_{1\Delta} = 1075, k_{2\Delta} = 242300$.

Использование связи $\varepsilon(A)$ для ЗТВ представляет значительные трудности, так как в ряде случаев диаметр пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) больше, чем размер ЗТВ. Кроме того, при больших деформациях образовавшиеся на поверхности материала углубления в результате локализации пластической деформации в ЗТВ не позволяют получить удовлетворительный акустический контакт между ПЭП и ОК. Оценка величины пластической деформации в зоне основного металла с помощью акустических измерений и проведение металлографических исследований дают возможность определять величину деформации в ЗТВ.

С учётом формулы (4) и корреляционной зависимостью между величиной пластической деформации и изменением среднего значения параметра акустической анизотропии в основном материале $\varepsilon_x(\Delta \bar{A})$ (6) величину пластической деформации в ЗТВ сварного соединения можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon_{\text{ЗТВ}} = \left(\frac{k}{c} (\bar{d}_{\text{оснмет}}^{-1/2} - \bar{d}_{\text{ЗТВ}}^{-1/2}) + (k_{1\Delta} \Delta \bar{A} + k_{2\Delta} \Delta \bar{A}^2)_{\text{оснмет}}^n \right)^{1/n}, \quad (7)$$

Для стали СтЗсп при определении $\varepsilon_{\text{сдв}}(\%)$ показатель деформационного упрочнения n составлял 0,2. Значение k/c определялось методом множественной регрессии и составило $0,5 \text{ мкм}^{-2}$.

Фактическое распределение пластической деформации для образца с локальным нагревом и ее расчетное значение в зоне основного металла (расчет производился с помощью уравнения (5)) и деформация на участке с повышенным диаметром зерна рассчитанная с помощью уравнения (7), представлены на рис. 7, а. На рис. 7, б приведены расчетные и фактические значения величины деформации в ЗТВ при различных значениях величины изменения акустической анизотропии в зоне основного металла для стали СтЗсп со сварным соединением.

Расчетные и фактические значения деформации имеют хорошее совпадение. Предложенный подход может использоваться, когда определение величины пластической деформации материала по изменению геометрических размеров невозможно, например, в случае отсутствия начальных данных о геометрических размерах объекта.

Таким образом, совместное использование оптического и акустического методов позволяют оценить распределение величины пластической деформации в материале, имеющем зоны локального термического влияния, при его одноосном растяжении по данным ультразвуковых и металлографических исследований.

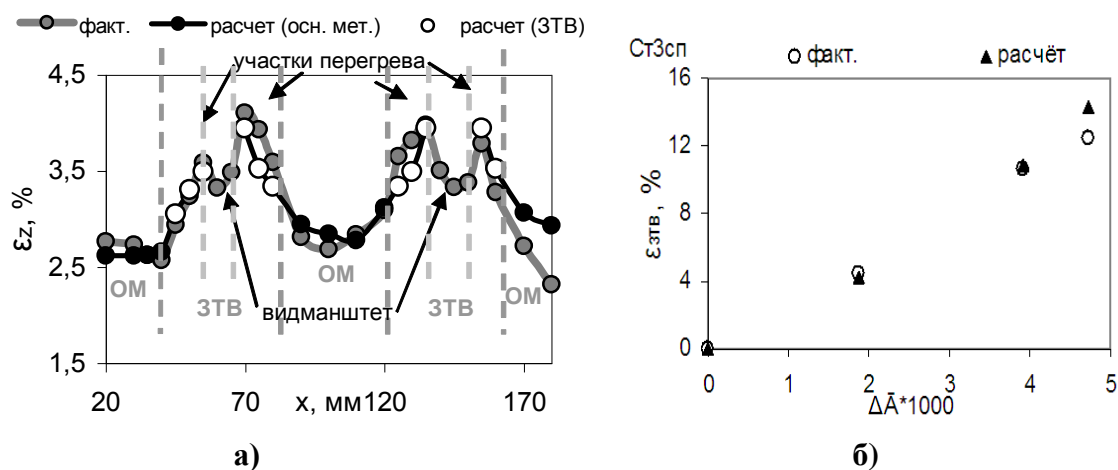


Рис. 7. Расчетное и фактическое:

a – распределение величины пластической деформации по длине цельного образца с зонами нагрева; *б* – значения величины пластической деформации в зависимости от изменения усредненного по основному металлу параметра акустической анизотропии

Выводы

В результате экспериментальных исследований получено неоднородное распределение величины пластической деформации по длине образцов, изготовленных из стали СтЗсп, и имеющих области локального термического воздействия, при их одноосном растяжении. Такое распределение величины пластической деформации связано с неоднородностью структурного состояния, полученного в результате термического влияния.

Металлографические исследования показали, что наибольшее значение величины пластической деформации наблюдается в ЗТВ на участке с повышенным диаметром зерна феррита. В результате акустических исследований получена зависимость $\epsilon(A)$ для стали СтЗсп, что дает возможность оценить величину пластической деформации в основном материале по данным ультразвуковых измерений.

Используя уравнение Холла-Петча для определения соотношения пределов текучести в ЗТВ и основного металла, а также зависимости $\epsilon(A)$ для основного металла, предложен алгоритм оценки величины пластической деформации в ЗТВ по данным ультразвуковых измерений и металлографических исследований.

Учитывая, что измерение параметра акустической анизотропии не требует информации о длине пути (толщине ОК), а металлографические исследования проводятся на поверхности материала, предложенный алгоритм оценки величины пластической деформации в основном материале и ЗТВ можно использовать при одностороннем доступе к ОК, без его разрушения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-97070 и грант 09-08-00827).

Библиографический список

1. **Алешин, Н.П.** Справочник. Сварка. Резка. Контроль / Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, Э.А. Гладков. – М.: Машиностроение, 2004. Т. 1. – 491 с.
2. **Allen, D.** The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique / D. Allen , C. Sayers // Ultrasonics, 1984. Vol. 22. P. 179–188.

*Дата поступления
в редакцию 26.06.2012*

A. Gonchar, V. Mishakin

**EVALUATION OF PLASTIC DEFORMATION
IN THE STRUCTURAL-INHOMOGENEOUS MATERIALS
USING ULTRASONIC AND METALLOGRAPHIC RESEARCH**

Institute of mechanical engineering FGBUN n.a. A.A. Blagonravov (Nizhny Novgorod branch)

Purpose: Development of the algorithm estimates the value of plastic deformation in a material having a heat-affected zone, based on ultrasonic measurements and metallographic studies.

Design/methodology/approach; The proposed algorithm is based on ultrasonic measurements in the base material and metallographic research in the heat affected zone and base material.

Findings: It is possible, for example, to apply on the gas main where uniaxial tensile strain appear due to landslide.

Research limitations/implications: The present study solves the privacy problem of estimating the amount of deformation in uniaxial tension of welded joints.

Originality/value: The joint use of ultrasonic and metallographic methods allowed us to estimate condition construction for one-way access.

Key words: uniaxial tensile strain, ultrasound, metallography, weld, the thermal effect.