

УДК 620(186.4+179.16)

## ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО ДАННЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© Александр Викторович Гончар, Василий Васильевич Мишакин

*Нижегородский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
Нижний Новгород, Россия*

[imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru)

***Аннотация.** Исследовано влияние пластического деформирования на акустические характеристики сталей 07ГБЮ, СтЗсп и 20. Показана неоднородность распределения величины пластической деформации и акустической анизотропии в материале сварного соединения, что связано со структурной неоднородностью металла, полученной в результате термического влияния сварного шва. Предложены алгоритмы оценки величины пластической деформации структурно-неоднородных металлов по данным металлографических исследований и ультразвуковых измерений.*

***Ключевые слова:** пластическое деформирование, неразрушающий метод контроля, акустические исследования, сварное соединение, термическое влияние.*

Материал в околошовной зоне сварных соединений подвергается воздействию высоких температур, что может приводить к изменению дислокационной структуры, диаметра зерна, фазового состава и другим структурным изменениям, а так же к существенному изменению характеристик прочности и пластичности [1]. В связи с этим, исследования методами неразрушающего контроля (МНК) металла в местах сварных соединений, где термическое влияние сварного шва (СШ) может приводить к снижению прочностных свойств является актуальной задачей.

Структурные изменения в материале, связанные как с термическим влиянием сварного шва, так и с процессом деформирования можно оперативно контролировать современными портативными металлографическими комплексами, например, такими как СПЕКТР-МЕТ. Этот комплекс позволяет непосредственно на объекте изготовить в исследуемом месте микрошлиф, установить портативный микроскоп и провести металлографические исследования. Использование современных портативных металлографических комплексов существенно расширяет возможности оптических методов.

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

**Цель данной работы** заключается в разработке алгоритма оценки величины пластической деформации в ЗТВ сварных соединений конструкционных сталей на основе ультразвуковых измерений и металлографических исследований.

Для исследования использовались плоско-параллельные образцы прямоугольного сечения размерами 250x20x6 мм, изготовленные из листовых катаных сталей 07ГБЮ, 20 и СтЗсп. В середине образцов находился сварной шов. Сварка выполнялась встык. Образцы подвергались поэтапному одноосному растяжению, с шагом деформации  $\epsilon_x \approx 5\%$ .

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 эхо-импульсным методом. Использовались ультразвуковые датчики фирмы Olympus для возбуждения поперечных

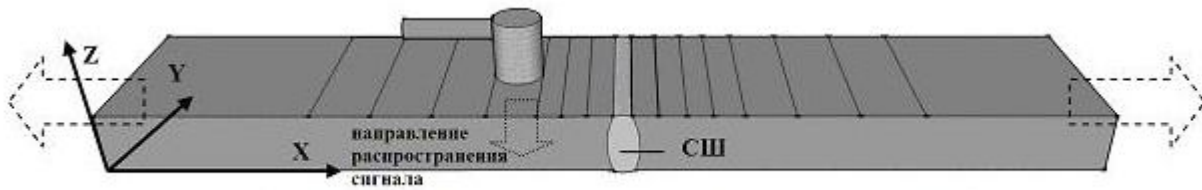


Рис. 1. Схема проведения ультразвуковых исследований.

упругих волн. Диаметр датчиков – 8 мм, центральная частота – 5 МГц. Измерения повторялись в каждой зоне не менее 5 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  $V_{zx}$ ,  $V_{zy}$ ,  $\tau_{zx}$  и  $\tau_{zy}$  – 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. Исходя из работ [2] величина акустической анизотропии пропорциональна коэффициенту функции распределения ориентировок  $W_{420}$ , ( $A \propto W_{420}$ ).

Металлографические исследования проводились в ЗТВ и основном материале. В исследуемых зонах был изготовлен микрошлиф и проведено травление 3% азотной кислотой. Методика расчета среднего диаметра зерна на исследуемом участке ЗТВ заключалась в следующем: параллельно сварному шву (оси Y) 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). На этом участке наблюдаются наибольшие по величине пластические деформации. На участках материала с видманштетовой 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.

В результате одноосного растяжения получены распределения величины локальной деформации  $\varepsilon_z$  по длине исследуемых образцов для каждого шага деформирования  $\varepsilon_x$ , рис. 2. Из полученных данных можно сделать вывод, что распределение пластической деформации материала сварного соединения существенно неоднородно, при этом наибольшая величина пластической деформации, как правило, наблюдается в ЗТВ, а наименьшее – в материале сварного шва.

В результате акустических исследований получено распределение параметра акустической анизотропии по длине образцов, рис. 3. Графики зависимости величины пластической деформации  $\varepsilon_x$  от изменения параметра акустической анизотропии, усреднённого по всем зонам  $\Delta\bar{A}$  (кроме ЗТВ и СШ) для исследуемых сталей представлены на рис. 4.

Кривые зависимости  $\varepsilon_x(\Delta\bar{A})$  хорошо аппроксимируются полиномом второй степени. Связь величины пластической деформации со средним значением изменения акустической анизотропии в зоне основного металла для исследуемых образцов можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= 116700 \times \Delta \bar{A}^2 + 142 \times \Delta \bar{A} & 07\text{ГБЮ} \\ \varepsilon_x &= 242300 \times \Delta \bar{A}^2 + 1079 \times \Delta \bar{A} & \text{Ст3сп} \\ \varepsilon_x &= 256100 \times \Delta \bar{A}^2 + 512 \times \Delta \bar{A} & 20 \end{aligned} \quad (2)$$

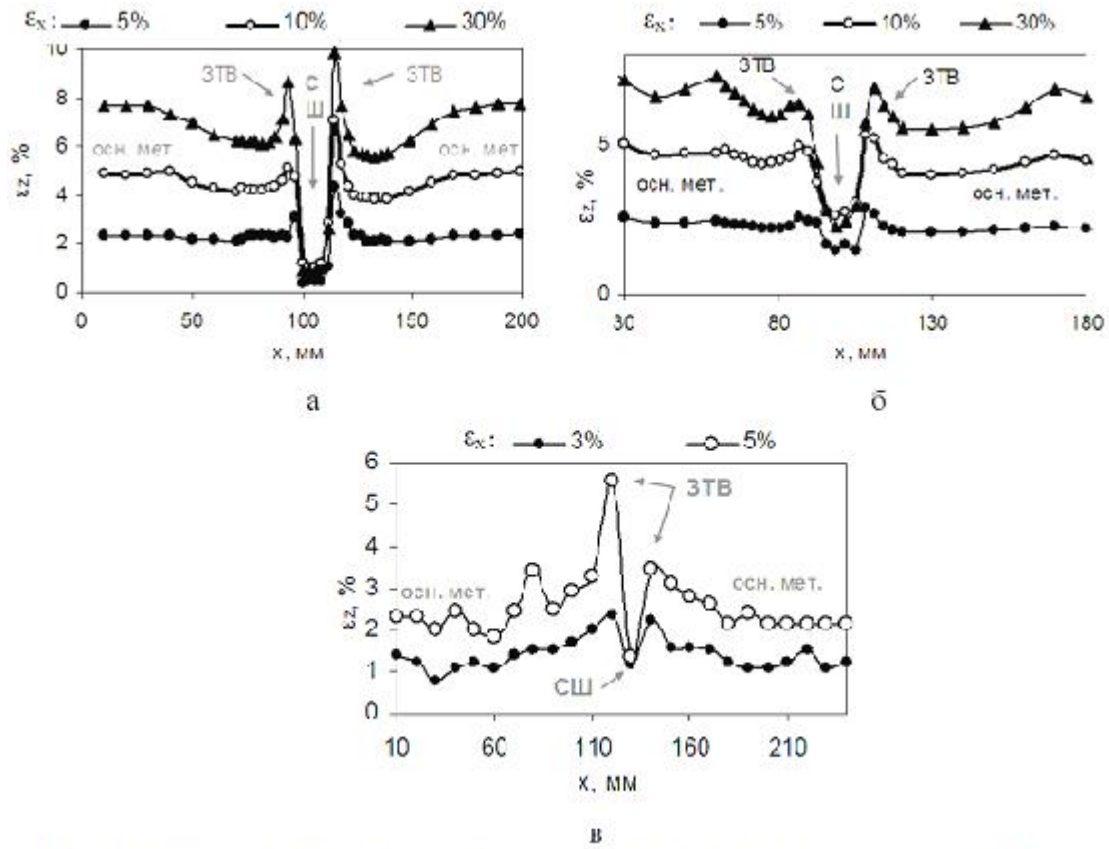


Рис. 2. Распределение деформации  $\varepsilon_z$  по длине образцов из сталей: а) 07ГБЮ; б) Ст3сп; в) 20; в зависимости от величины пластической деформации  $\varepsilon_x$ .

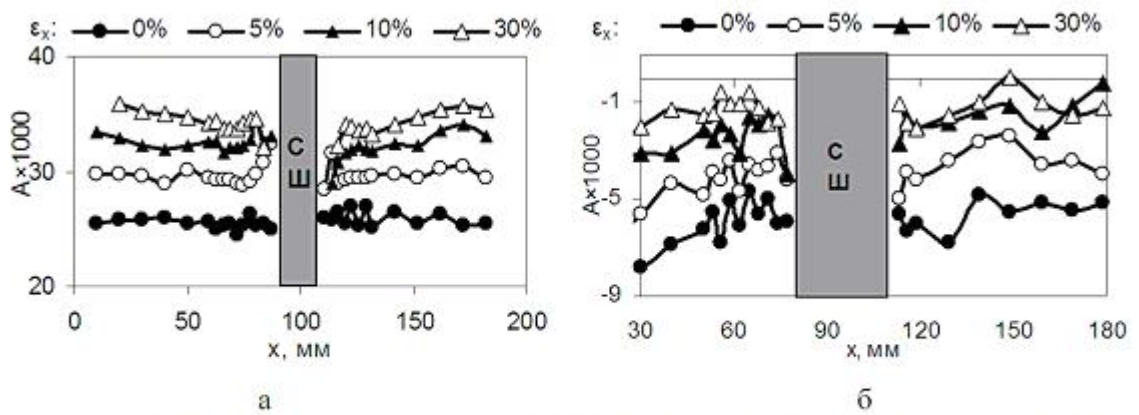


Рис. 3. Распределение параметра акустической анизотропии по длине образцов из стали: а) 07ГБЮ; б) Ст3сп в зависимости от величины пластической деформации  $\varepsilon_x$ .

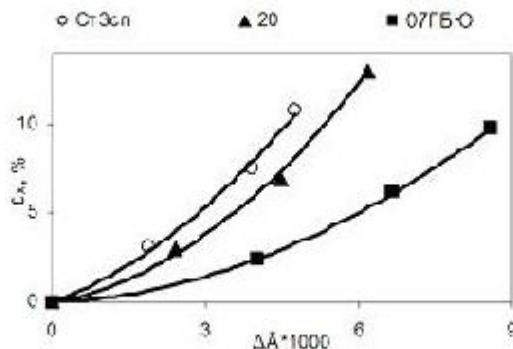


Рис. 4. Связь величины пластической деформации с изменением параметра акустической анизотропии, усреднённой по зонам основного металла.

Среднеквадратичное отклонение расчетного значения пластической деформации от ее истинного значения составило около 0,7%. Измерение параметра акустической анизотропии позволяет неразрушающим методом по изменению структурного состояния в процессе пластического деформирования оценить величину произведенной пластической деформации основного металла, не используя измерение геометрических размеров исследуемых объектов.

Использование связи  $\epsilon_x(\Delta A)$  для ЗТВ представляет значительные трудности, так как в ряде случаев диаметр пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) больше, чем размер ЗТВ. При деформировании образовавшиеся на поверхности материала углубления в результате локализации пластической деформации в ЗТВ не позволяют обеспечить удовлетворительный акустический контакт между ПЭП и ОК, что делает невозможным измерение. Эти ограничения заставляют обратиться к металлографическим исследованиям. Использование переносного оптического комплекса даёт возможность получить такую важную характеристику материала в ЗТВ, как распределение диаметра зерна. Известно, что диаметр зерна существенно влияет на пластические и прочностные свойства материала [3]. Диаметр зерна меняется в диапазоне от 8 (основной металл) до 20 (ЗТВ) мкм, рис. 5

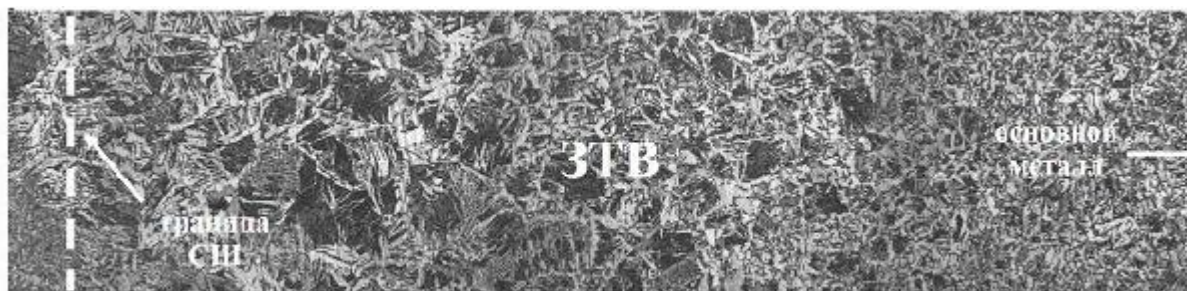


Рис. 5. Структура стали СтЗсп в ЗТВ ( $\times 300$ ,  $\epsilon = 0\%$ ).

Повышение диаметра зерна 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 выше условиях можно рассчитать влияние локального изменения диаметра зерна на развитие неоднородности пластической деформации.

Экспериментальная зависимость предела текучести  $\sigma_T$  от размера зерна  $d$  в форме соотношения Холла-Петча:



$$\sigma_{Ti} = \sigma_{0i} + k_{fi} \bar{d}_i^{-1/2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  и  $k_{fi}$  – постоянные величины, характеризующие материал,  $i = \text{осн мет}$  для основного металла,  $i = \text{ЗТВ}$  для ЗТВ.

Используем уравнение Людвига для определения связи напряжения течения с величиной пластической деформации:

$$\sigma_i = \sigma_{Ti} + c_i \varepsilon_i^{n_i}, \quad (4)$$

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

На начальных этапах деформирования  $\sigma_{\text{осн.мет}} \approx \sigma_{\text{ЗТВ}}$ . Предполагаем, что характеристики упрочнения металла в основном металле и на участке ЗТВ с повышенным диаметром зерна мало отличаются ( $n_{\text{осн.мет}} \approx n_{\text{ЗТВ}} \approx n$ ,  $c_{\text{осн.мет}} \approx c_{\text{ЗТВ}} \approx c$ ,  $k_{f \text{осн.мет}} \approx k_{f \text{ЗТВ}} \approx k$ ).

Подставляя (3) в (4) для ЗТВ и основного материала, получим:

$$\varepsilon_{\text{зтв}} = \left( \frac{k}{c} (\bar{d}_{\text{осн.мет}}^{-1/2} - \bar{d}_{\text{зтв}}^{-1/2}) + \varepsilon_{\text{осн.мет}}^n \right)^{1/n} \quad (5)$$

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

С учётом формулы (5) и корреляционными зависимостями между величиной пластической деформации и изменением параметра акустической анизотропии в основном материале  $\varepsilon_x(\Delta\bar{A})$  (2) величину пластической деформации в ЗТВ можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon_{\text{зтв}} = \left( \frac{k}{c} (\bar{d}_{\text{осн.мет}}^{-1/2} - \bar{d}_{\text{зтв}}^{-1/2}) + (k_{1\varepsilon} \Delta\bar{A} + k_{2\varepsilon} \Delta\bar{A}^2)_{\text{осн.мет}}^n \right)^{1/n}. \quad (6)$$

Предложенный подход может использоваться, когда определение величины пластической деформации материала по изменению геометрических размеров невозможно, например, в случае изменения геометрических размеров из-за наличия коррозионной поврежденности, что характерно для газонефтепроводов, находящихся в длительной эксплуатации.

На рис. 6 показаны расчетные и фактические значения величины деформации в ЗТВ при различных значениях величины изменения акустической анизотропии в зоне основного металла для сталей 07ГБЮ, СтЗсп и 20. Рассчитанная по формуле (6) деформация в ЗТВ исследуемых сталей имеет хорошую корреляцию со значениями деформации в ЗТВ, полученными в результате прямых измерений микроскопом.

Для выявления особенностей деформирования в ЗТВ было проведено дополнительное исследование. Образец из горячекатаной стали СтЗсп, не имеющий СШ, локально нагрели до температуры 1000 °С в двух зонах. Схема локального термического воздействия представлена на рис.7.

В результате одноосного растяжения образца на величину  $\varepsilon_x=5\%$  получено распределение деформации  $\varepsilon_z$  по длине образца, рис.8. Видно, что в ЗТВ наблюдаются области, как с повышенной, так и с небольшой деформацией. Металлографические исследования показали, что в ЗТВ в областях с меньшей величиной пластической деформации наблюдается видманштеттова структура рис.9а, в областях с наибольшим значением деформации наблюдается повышенный диаметр зерна феррита, что соответствует участку перегрева. Структура материала, соответствующая участку перегрева с наибольшим значением величины пластической деформации представлена на рис.9б. Деформация в основном материале существенно меньше чем в ЗТВ. Фотография микроструктуры в основном материале представлена на рис. 9в.

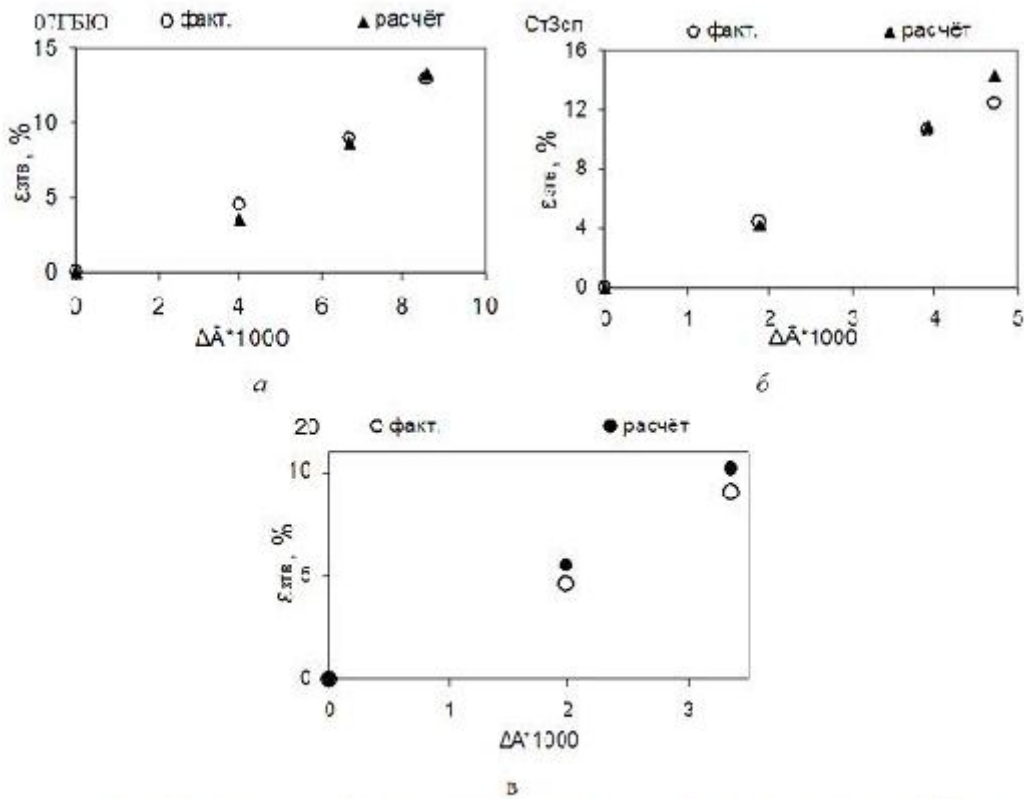


Рис. 6. Расчетные и фактические значения величины деформации в ЗТВ при различных значениях величины изменения акустической анизотропии в зоне основного металла для сталей: а) 07ГБЮ, б) СтЗсп; в) 20.



Рис. 7. Схема локального термического воздействия на образец из стали СтЗсп.

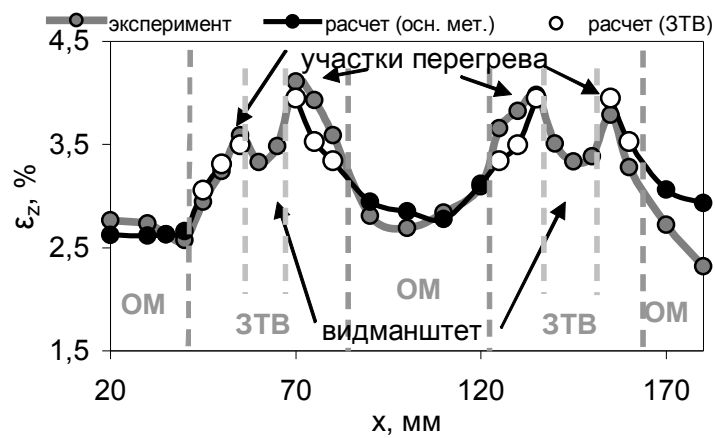


Рис. 8. Расчетное и фактическое распределение величины пластической деформации по длине образца.

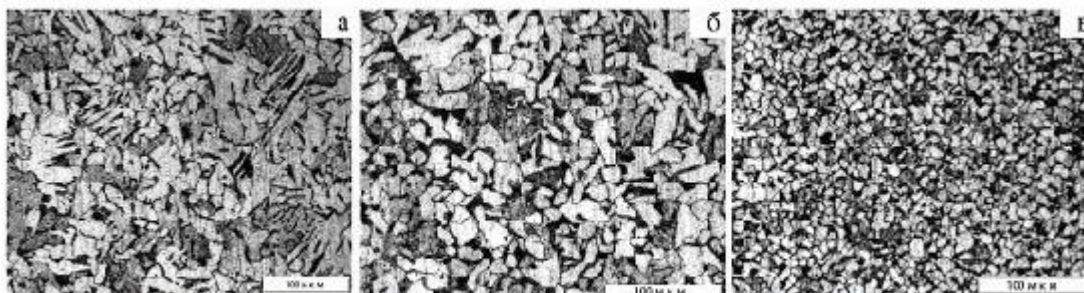


Рис.9. Фотографии микроструктуры стали СтЗсп с ЗТВ: а – видманштетт, б – участок перегрева; в – основной металл.

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

$$\varepsilon_{zj} = k_{0\varepsilon} + k_{1\varepsilon}A_j + k_{2\varepsilon}A_j^2, \quad (7)$$

где  $k_{1\varepsilon} = 28000$ ,  $k_{2\varepsilon} = 377$ ,  $k_0 = 3,88$ ,  $j$  – номер исследуемой зоны. Таким образом, величину пластической деформации в основном материале можно рассчитать по данным ультразвуковых измерений.

Деформация на участках перегрева рассчитывались по формуле (6) с учетом корреляционных зависимостей (2). Отклонение расчетных значений и полученных в результате прямых измерений микрометром не превышало 0,5%, рис. 8.

Величина критической пластической деформации в ЗТВ составляла  $\varepsilon_z^* \approx 40\%$ . Соотношение  $\varepsilon_z / \varepsilon_z^*$  дает информацию ресурса пластичности в этой зоне.

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.

### Выводы:

В результате экспериментальных исследований получено неоднородное распределение величины пластической деформации по длине сварных образцов при их одноосном растяжении, что связано с неоднородностью структурного состояния, полученной в результате термического влияния сварного шва. Металлографические исследования показали, что наибольшее значение величины пластической деформации наблюдается в ЗТВ на участке перегрева.

В результате акустических исследований получены зависимости  $\varepsilon_x(\Delta\bar{A})$  для сталей 07ГБЮ, СтЗсп и 20, что позволяет оценить величину их пластической деформации в основном материале по данным акустических измерений.

Предложен алгоритм оценки величины пластической деформации в ЗТВ сварных соединений по данным акустических и оптических измерений. Использование портативных металлографических комплексов даёт возможность использовать разработанный алгоритм непосредственно на конструкциях.

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

Данный алгоритм справедлив для одноосных растяжений конструкционных сталей. Ограничение на метод накладывает распределение структурной неоднородности по толщине

материала. В нашем случае она была мала, что связано с небольшими скоростями сварки в один проход.

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

#### Литература

1. Алешин Н.П., Чернышов Г.Г., Гладков Э.А. Справочник. Сварка. Резка. Контроль. - том 1 изд. - М.: Машиностроение, 2004. - 491 с.
2. Allen, D., and Sayers, C. The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique // Ultrasonics, 1984. Vol. 22. P. 179-188.
3. Гольдштейн М. И., Литвинов В.С. Бронфин Б. М. Металлофизика высокопрочных сплавов. - М.: Металлургия, 1986. - 312 с.

*Поступила: 30.07.12.*