

## СТРУКТУРНАЯ ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДАМИ ФРАКТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Е. Н. Бердникова, к. т. н.

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев.*

Анализ имеющихся к настоящему времени экспериментальных исследований характера трещинообразования и последующего разрушения различных металлов, сплавов, сварных соединений показывает, что указанные процессы имеют прямую взаимосвязь с развитием пластической деформации, локальных внутренних напряжений, формированием концентраторов таких напряжений и кроме того – возможностями материала релаксировать нарастающие внутренние напряжения (пластическими механизмами, либо хрупким разрушением) [1]. При общепринятых методиках анализа разрушения, включающем последовательность известных стадий [2], учитывается влияние структуры металла на характер и механизмы развития разрушения [3-6]. Цель настоящей работы заключалась в развитии исследований по методике **характер разрушения** → **структура** → **свойства** [7-8], а именно - определении влияния структурных факторов на трещинообразование при замедленном разрушении.

Исследования проводили на разрушенных образцах сварных соединений колесной стали марки 2 (С=0,65%) (наплавка проволокой Св-08Г2С), полученных при различной погонной энергии наплавки ( $Q_{\text{НАПЛ}}=13,6; 15; 21$  кДж/см). Образцы для исследования поверхности разрушения (разрушение по ЗТВ) после испытаний по методу «Имплант» (рис.1), представляли собой изломы с характерными зонами: I – возможные места зарождения трещины, т.е. зоны очагов разрушения; II – магистрального разрушения.

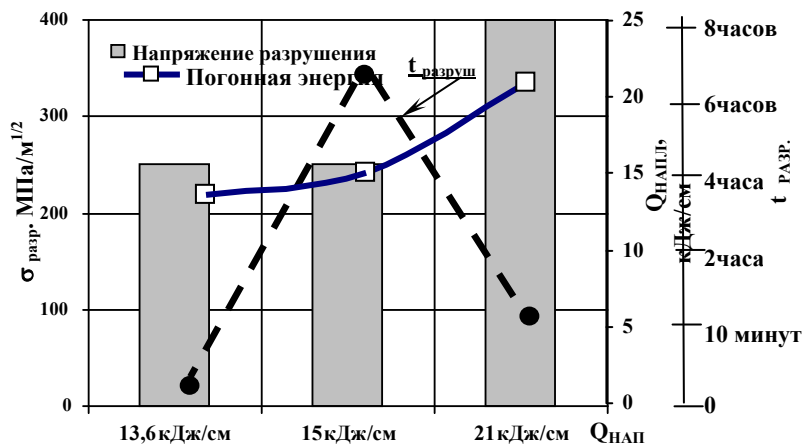


Рис. 1. Результаты испытаний при замедленном разрушении (металла ЗТВ) по методу «Имплант»

Сопоставление видов разрушения (хрупкого, квазихрупкого, вязкого), а так же химического состава характерных элементов микрорельефа поверхности разрушения, частиц фазовых образований (ФО) и неметаллических включений (НВ) показало следующее. При  $Q_{\text{НАПЛ}}=13,6$  кДж/см наибольшая доля микрорельефа поверхности разрушения для I-й зоны излома – внутризеренное квазихрупкое, для II-й зоны - хрупкое транскристаллитное (рис.2а), что соответственно привело к быстрому разрушению (в течении 1 минуты). В случае  $Q_{\text{НАПЛ}}=15$  кДж/см микрорельефу поверхности излома для I-й и II-й зон характерен равномерный тип смешанного (внутризеренного и межзеренного) разрушения (рис.2б), что структурно должно обеспечивать некоторую сопротивляемость развитию трещины. В данном случае время разрушения увеличилось до 7 часов.

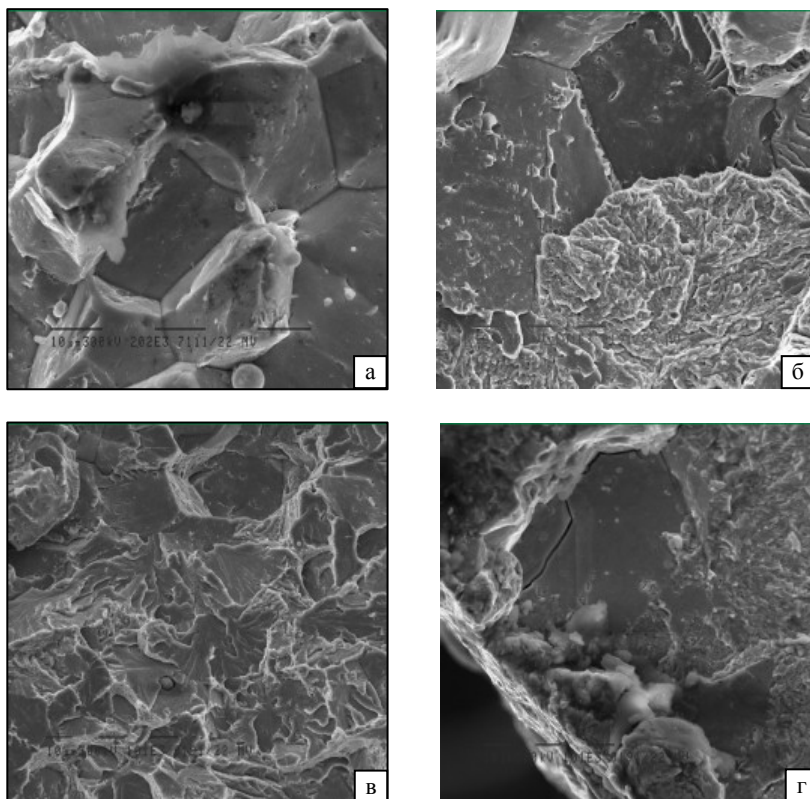


Рис. 2. Микроструктура хрупкого разрушения: а – межзеренный скол; б – г – смешанный тип межзеренного и внутризеренного разрушения.

При  $Q_{\text{НАПЛ}}=21$  кДж/см наибольшая доля микрорельефа поверхности разрушения для I-й зоны излома – внутризеренное хрупкое, для II-й зоны – смешанное примерно в равных долях хрупкое внутризеренное и межзеренное, рис.2в. Однако наличие протяженных вторичных трещин свидетельствует о более сложном напряженном состоянии и отрицательном влиянии на время разрушения, которое в данном случае составляет 10 минут.

Анализ типов разрушения исследуемых изломов, деталей микроструктуры, химического состава элементов микрорельефа поверхности разрушения (фасеток хрупкого и квазихрупкого скола, границ зерен и др.), ФО и НВ показал, что разрушение распространялось от участков, содержащих скопления частиц ФО у внешней поверхности изломов. При этом в случае межзеренного разрушения локальными концентраторами зарождения трещин являются границы зерен, ослабленные фазовыми образованиями, содержащими Mn, Si, Al, S и др. (рис.2а, г). В случае транскристаллитного скола локальными концентраторами зарождения трещин являются неметаллические включения сульфидного типа (Mn – S – Fe) и Si – Al – Ca – содержащие (рис.2б, в).

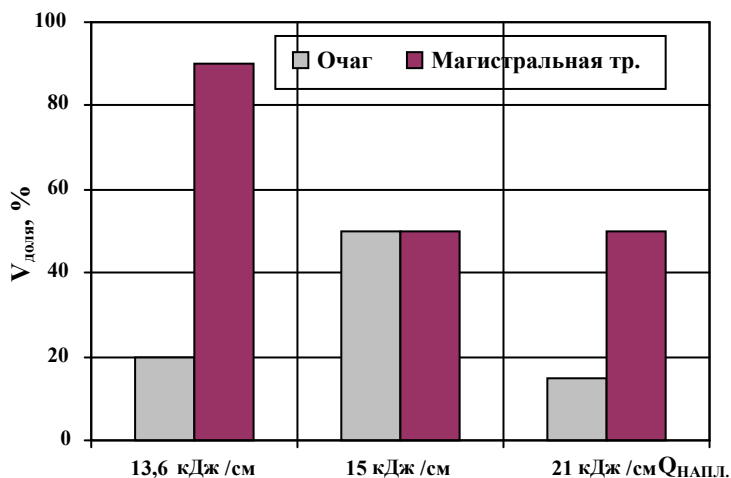
Сопоставление хрупкого межзеренного разрушения (рис.3), его объемных долей по зонам изломов в зависимости от погонной энергии наплавки ( $Q_{\text{НАПЛ}} = 13,6 \rightarrow 15 \rightarrow 21$  кДж/см) и результатов испытаний показало следующее. С увеличением погонной энергии наплавки ( $Q_{\text{НАПЛ}}$  от 13,6 до 15 кДж/см) при одинаковом напряжении разрушения ( $\sigma_{\text{РАЗР}}=250$  МПа) в зоне магистральной трещины доля ( $V_{\text{д}}^{\text{XP}}$ ) хрупкого межзеренного скола заметно (в 1,8 раза) снижается ( $V_{\text{д}}^{\text{XP}} \sim$  от 90% до 50%). Последнее при замедленном разрушении приводит к увеличению времени разрушения от 1 минуты до 7 часов. Дальнейшее повышение погонной энергии наплавки ( $Q_{\text{НАПЛ}}$  от 15 до 21 кДж/см) приводит к заметному снижению (в 3 раза) хрупкого межзеренного скола ( $V_{\text{д}}^{\text{XP}} \sim$  от 50% до 15%) в зонах очага зарождения разрушения, что характеризует повышение напряжения разрушения ( $\sigma_{\text{РАЗР}} = 400$  МПа).

Для определения влияния структурных факторов на трещиностойкость исследуемых сварных соединений из анализа различных подходов к механизмам зарождения трещин и разрушения материалов [9-13] была выбрана оценка на базе дислокационной теории кристаллических твёрдых тел, связывающая процессы релаксации внутренних напряжений (пластическую деформацию) и структурные изменения за счёт зарождения и перестройки дислокационной структуры. Роль дислокаций в разрушении определяется критерием разрушения А. Стро, согласно которому необходимым условием зарождения трещин является наличие прочных препятствий, способных противостоять давлению дислокационных скоплений высокой плотности. Примером такого механизма является заторможенное каким-либо препятствием (например, границей зерна) плоское скопление дислокаций. Коэффициент концентрации напряжений в вершине такого скопления пропорционален числу скопившихся дислокаций. Для зарождения трещины в плоскости, отвечающей максимальным растягивающим напряжениям, требуется напряжение [13]:

$$\tau^2 = 3 \pi \gamma G / 8 (1-\nu) L,$$

где  $\tau$  - напряжение в плоскости сдвига, действующее на нагромождение дислокаций;  $\gamma$  - поверхностная энергия материала, приближенно  $\gamma = 0,1Gb$ ;  $G$  - модуль сдвига;  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $L$  - длина плоскости скольжения, занятая дислокациями нагромождения (можно принять ее равной диаметру зерна или размеру фасеток хрупкого межзеренного скола);  $b$  - вектор Бюргерса.

Расчетные оценки напряжения ( $\tau$ ), необходимого для появления субмикротрещин в местах потенциальных концентраторов напряжения (рис.2 а, г), показали, что в локальных структурных объемах межзеренного хрупкого скола уровень  $\tau$  составляет порядка  $\sim 100...200$  МПа. При этом, главный фактор, определяющий зависимость напряжения от структуры, - это размер зерна или в данном случае фасеток хрупкого межзеренного скола.



**Рис. 3.** Изменение объемной доли ( $V_{\text{доли}}, \%$ ) хрупкого транскристаллитного разрушения по зонам излома (очаг разрушения, магистральная трещина).

Таким образом, расчетные методы оценки напряжения зарождения трещин в локальных зонах концентраторов напряжений, основанные на экспериментальных данных количественного фрактографического анализа (с учетом типа разрушения) дают возможность определять их уровень по зонам изломов и прогнозировать трещиностойкость сварных соединений.

#### Использованная литература.

1. Либовиц Г. Разрушение, т.3. – М: Мир, 1976. – 800с.
2. Балтер М.А., Любченко А.П., Аксенова С.И. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 160с.

3. *Структурные* факторы, определяющие прочность, пластичность и разрушение сварных соединений / Л.И. Маркашова, Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков и др. // Сборник Междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 27-30мая 2008г., пос. Кацивели, Крым, Украина.– Киев: ИЭС им.Е.О.Патона НАН Украины, 2009. – С.87 – 94.

4. *Структурный* критерий оценки прочности, пластичности, трещиностойкости металлов, сплавов, композиционных материалов и их сварных соединений / Л.И. Маркашова, Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков и др. // Збірник праць IV Міжнародної конф. «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій», черв. 2009р., Львів. – Львів: Фіз.мех.ін-т ім.Г.В. Карпенка НАН України, 2009. –С.447-451.

5. *Влияние* легирования швов на структуру и свойства сварных соединений стали 17Х2М / Маркашова Л.И., Позняков В.Д., Алексеенко Т.А., Бердникова Е.Н., Жданов С.Л., Кушнарева О.С., Максименко А.А. // Автомат. сварка. – 2011. - №4. – С. 7-15.

6. *Структурные* условия оптимизации прочности, пластичности и трещиностойкости сварных соединений / Л.И. Маркашова, Г.М. Григоренко, Е.Н. Бердникова // Сборник Междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 25 – 28 мая 2010г., пос. Кацивели, Крым, Украина.– Киев: ИЭС им.Е.О.Патона НАН Украины, 2010. – С.105 – 110.

7. *Оценка* и прогнозирование механических свойств сварных соединений методами количественной фрактографии / Л.И. Маркашова, Е.Н. Бердникова, Т.А. Алексеенко // Там же, 25 – 28 мая 2010г., пос. Кацивели, Крым, Украина.– Киев: ИЭС им.Е.О.Патона НАН Украины, 2010. – С.101 – 104.

8. *Структурное* прогнозирование механических свойств сварных соединений при разрушении / Е.Н. Бердникова //Сборник научных трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение» вып. 59 ч. II. Днепропетровск, ПГАСА, 2011.- С.72 – 76.

9. Griffith A. A. The phenomena of Rupture and Flow in Solids // Phil. Trans. Rou. Ser. – 1920. – 221 A. – P. 163 – 168.

10. Орован Е. Классическая и дислокационная теория хрупкого разрушения // Атомный механизм разрушения. – М.: Металлургия, 1963.- С. 170 – 184.

11. Котрелл А. Х. Теоретические аспекты процесса разрушения // Атомный механизм разрушения. – М.: Металлургия, 1963.- С. 30 – 68.

12. Нотт. Дж. Ф. Микромеханизмы разрушения и трещиностойкость конструкционных сплавов // Механика разрушения. - М.: Мир, 1979. - С. 40 – 82.

13. Stroh A.N. The formation of cracks as a result of plastic flow // «Proc. of the Roy. Soc.», Серия А. – 1954. - №1154, т.223, 404 - 415.