УДК 621.791:539.4.

# СТРУКТУРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ.

**к.т.н. Е.Н. Бердникова**

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

Известно, что в настоящее время при изготовлении металлических сварных конструкций различного типа, соответствующих основным требованиям по обеспечению надежности в эксплуатационных условиях, широко применяются высокопрочные стали. При этом главные трудности при сварке высокопрочных сталей связаны с необходимостью предотвратить образование в сварных соединениях холодных трещин, а в металле зоны термического влияния (ЗТВ) и металле шва структур, снижающих их сопротивляемость хрупким разрушениям [1-3].

Принимая во внимание прямую взаимосвязь трещинообразования с формированием локальных концентраторов внутренних напряжений (а это – локальные скопления дислокаций) необходимы более детальные (в том числе и на дислокационном уровне) исследования для определения структурных условий распространения трещины и последующего разрушения материала. Поэтому представляется целесообразным и перспективным развитие исследований по методике в следующем направлении **характер разрушения → структура →свойства** металлов, сплавов и их сварных соединений.

К настоящему времени предложен достаточно большой ряд различных подходов к оценке склонности металлов к разрушению, основываясь на расчетах напряжений в зависимости от конкретных характеристик материалов [4-7]. Влияние дислокационной структуры, формирование концентраторов внутренних напряжений были исследованы и представлены в ряде публикаций [4-6]. В данной работе представлены некоторые из результатов исследований, основанные на исследовании разрушения методами фрактографического анализа. На примерах исследования поверхностей разрушения сварных соединений высокопрочной стали 17Х2М, выполненных с использованием сварочной проволоки Св-10ХН2ГСМФТЮ, показана возможность использования фрактографического анализа изломов с учетом структурного состояния, определяемого параметрами микрорельефа поверхности разрушения для аналитической оценки напряжения разрушения (практической прочности, $\sigma_{пр}$) за счет зарождения трещин Степанова до критических размеров Стро-Орована.

Из анализа структурных механизмов и теорий разрушения, основывающихся на энергетических и дислокационных подходах [1, 2, 8 - 10], была выбрана оценка напряжения разрушения на базе дислокационной теории, связы-

вающей напряжение с такими структурными факторами как - длина микротрещин или концентраторов напряжений в металле (дислокационных скоплений у границ структурных составляющих, фазовых образований, неметаллических включений и др.), согласно которой при напряжении, пропорнациональном $(a/L)^{-1/2}$ трещина будет вскрываться тем легче, чем длиннее концентратор:

$$\sigma_{пр} = \sigma_т (a/L)^{-1/2} (\gamma_{эф} / \gamma)^{-1/4},$$

где $\sigma_т$ – предел текучести; $a$ – межатомное расстояние, близкое к радиусу закругления в устье трещины; L – длина концентратора напряжений; $\gamma_{эф} / \gamma$ – отношение эффективной поверхностной энергии к удельной энергии поверхностей разрушения (~ $10^2 \ldots 10^4$).

Исследования проводили на разрушенных образцах. Первоначально был сделан надрез в области ЗТВ и вырощена усталостная трещина на глубину ~10мм. Затем образцы при температуре испытания -40°С первично нагрузили с выдержкой 30 минут при $K_C$ первичного нагружения. ($K_{перв.нагр}$ = 0…46МПа $\sqrt{м}$ ) и провели испытания на изгиб до полного разрушения, значения $K_c$ при разрушении составляли порядка 58,7…65,2 МПа $\sqrt{м}$ . Образцы для исследования поверхности разрушения после испытаний представляли собой изломы с характерными зонами: «А» – зона усталостной трещины (от надреза до линии её остановки); «В» – зона разрушения в результате испытаний на изгиб; зона долома.

Фрактографические исследования показали, что в зависимости от уровня первичного нагружения макро- и микрорельеф поверхности разрушения различен и имеет свои особенности.

В области усталостной трещины (зона «А») в исходном состоянии, когда разрушение произошло сразу (без первичной нагрузки) поверхность трещины представляет собой в основном внутризёренный квазискол в сочетании с нерегулярными усталостными бороздками и сеткой вторичных трещин по субструктурным элементам, что свидетельствует о невысоких показателях прочности и пластичности металла, рис.1а. При этом локальными концентраторами зарождения микротрещин (по всей длине зоны «А») являются грубые расщепления вдоль полос скольжения и межзёренных границ (ослабленных наличием фазовых образований). Оценка практической прочности ($\sigma_{пр}$) в таких локальных структурных объемах показала, что в местах потенциальных концентраторов напряжений уровень $\sigma_{пр}$ падает до ~ (0,2…0,3)$\sigma_{0,2}$, что предопределяет катастрофический рост трещины и соответственно снижение трещиностойкости.

При приложении первичного нагружения и соответствующих испытаниях на изгиб для зоны «А» исследования (усталостной трещины) характерным является смешанный тип разрушения – квазихрупкое внутризёренное с эле-

ментами вязкого (гребни отрыва) по границам субструктуры и вязкое с мелкими ямками размером порядка ~ 0,5…1,3 мкм, рис.1в. Хаотический характер пути трещины свидетельствует о протяжённой пластической зоне впереди её вершины. Напряжение разрушения ($\sigma_{пр}$) в локальных квазихрупких объемах составляет порядка ~ (0,6…0,8)$\sigma_{0,2}$ и практически достигает уровня $\sigma_{0,2}$ в участках с вязкой составляющей, что характеризует повышение сопротивления хрупкому разрушению.

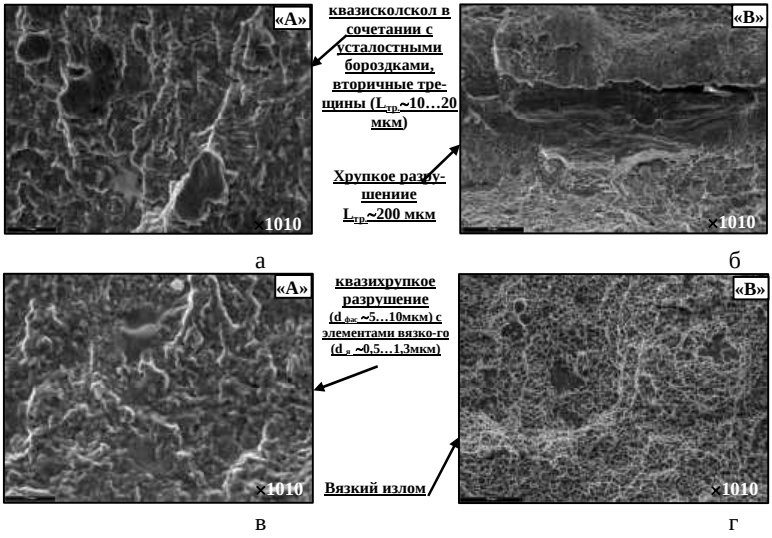


Рис.1. Рис.2 Характерные особенности усталостного излома - зона «А» (а, в) сварного соединения стали 17Х2М и разрушения на изгиб - зона «В» (б, г): а, б - в исходном состоянии ($K_{перв.нагр.}$= 0; $K_{с(при\ разруш.)}$=58,7 МПа $\sqrt{м}$ ); в, г - при приложении первичного нагружения ($K_{перв.нагр.}$=46МПа $\sqrt{м}$ ; $K_{с(при\ разруш.)}$=65,2 МПа $\sqrt{м}$ ).

Для зоны «В» излома (испытания на изгиб) в исходном состоянии (без первичной нагрузки), поверхность разрушения представляет собой древовидный излом, имеющий сильную слоистость (расслоения) после деформации, рис1б. При приложении первичного нагружения характерным является смена механизма разрушения (хрупкое → квазихрупкое + вязкое) при значительном снижении доли хрупких участков с расслоениями (от 80…90% до 5…10%), рис.2. При этом заметно уменьшение размеров структурных элементов релье-

фа – ямок вязкого разрушения (от 5…40 мкм до 1…10 мкм) и фасеток квазихрупкого (от 13…20 мкм до 8…17 мкм), что структурно обусловлено диспергированием формирующихся структур и способствует снижению мощности локальных концентраторов внутренних напряжений. Практическая прочность ($\sigma_{пр}$) квазихрупкой и вязкой составляющих в среднем достигает порядка ~ $(0,7)\sigma_{0,2}$.

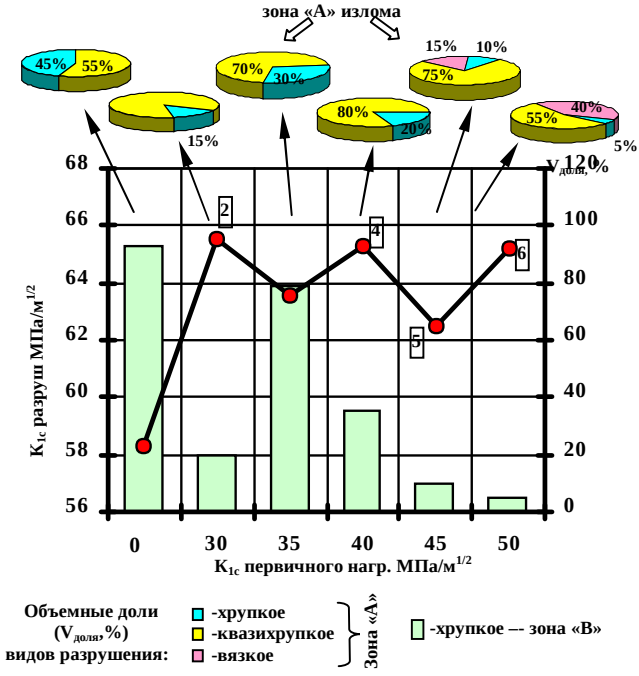


Рис.2. Изменение объемной доли ($V_{доля}$,%) всех видов разрушения: хрупкого, квазихрупкого и вязкого в зоне усталостного излома «А» (секторные диаграммы) и хрупкого разрушения в зоне «В» (гистограммы) при различных технологических параметрах приложения нагрузки.

Таким образом, расчетные методы оценки такой характеристики как напряжение разрушения ($\sigma_{пр}$), основанные на экспериментальных данных количественного фрактографического анализа (с учетом микромеханизма распространения трещины и параметров микрорельефа поверхности разрушения)

дают возможность определять уровень практической прочности и пластичности по зонам изломов и прогнозировать трещиностойкость сварных соединений.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА.


1. Либовиц Г. Разрушение, т.3. – М: Мир, 1976. – 800с.
2. Браутман Л., Крок Р. Разрушение и усталость, т.5. – Композиционные материалы. - М.: Мир, 1978. – 488 с.
3. Балтер М.А., Любченко А.П., Аксенова С.И. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 160с.
4. Маркашова Л.И., Григоренко Г.М., Арсенюк В.В., Бердникова Е.Н., Алексеенко Т.А. Структурный подход к оценке механических свойств в ЗТВ соединений сталей и сплавов // Сб. Междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». – Киев: ИЭС, 2004. – С.174 – 179.
5. Маркашова Л.И., Григоренко Г.М., Позняков В.Д., Бердникова Е.Н., Алексеенко Т.А. Структурные факторы, определяющие свойства прочности, пластичности и разрушение сварных соединений // Сб. Междунар. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». – Киев: ИЭС, 2008. – С.87-94.
6. Маркашова Л.И., Григоренко Г.М., Позняков В.Д., Бердникова Е.Н., Алексеенко Т.А. Структурный критерий оценки прочности, пластичности, трещиностойкости металлов, сплавов, композиционных материалов и их сварных соединений // Зб. праць IV Міжнар. Конф. «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій». – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка, 2009. – С. 447-451.
7. Романив О.Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. – М.: Металлургия, 1979. – 176с.
8. Орован Е. Классическая и дислокационная теория хрупкого разрушения // Атомный механизм разрушения. – М.: Металлургия, 1963.- С. 170 – 184.
9. Котрелл А. Х. Теоретические аспекты процесса разрушения // Атомный механизм разрушения. – М.: Металлургия, 1963.- С. 30 – 68.
10. Нотт. Дж. Ф. Микромеханизмы разрушения и трещиностойкость конструкционных сплавов // Механика разрушения. - М.: Мир, 1979. - С. 40 –82.