

УДК 621.791:539.422.3

Бердникова Е. Н.

ОЦЕНКА ПРАКТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЗАМЕДЛЕННОМ РАЗРУШЕНИИ

В настоящее время возникает необходимость в проведении ремонтно-восстановительных работ на многих объектах практически исчерпавших свой срок службы. Так, в результате длительной эксплуатации возникает износ рабочей поверхности железнодорожных колес и требуется ее восстановление [1, 2]. Несмотря на различные технологические разработки в плане восстановительных ремонтов, актуальным остается проблема повышения прочности и трещиностойкости колес, и, соответственно, снижение степени износа, что во многом зависит от технологии сварки и химического состава наплавленного металла.

Целью данной работы является исследование характера трещинообразования и особенностей разрушения сварных соединений с целью определения влияния структурных факторов на уровень практической прочности при замедленном разрушении.

На примерах сварных соединений, выполненных сварочными проволоками различных составов, показана возможность использования фрактографического анализа изломов с учетом структурного состояния, для аналитической оценки показателя напряжения разрушения (практической прочности, σ_{np}). Из анализа структурных механизмов и теорий разрушения, основывающихся на энергетических и дислокационных подходах [3–9], была выбрана оценка напряжения разрушения на базе дислокационной теории, связывающей напряжение с длиной микротрещин или концентраторов напряжений в металле (дислокационных скоплений у границ структурных составляющих, фазовых образований, неметаллических включений и др.):

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

где σ_m – 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 ($\sim 10^2 \dots 10^4$).

Работа выполнялась на сварных соединениях колесной стали 2 (ГОСТ 10791-89). Сварку (наплавку) выполняли механизированным способом в CO_2 проволоками марок Св-08Г2С (феррито-перлитный шов, Ф-П) и ПП-АН180МН (бейнито-мартенситный шов, Б-М), табл. 1.

Таблица 1

Химический состав колесной стали и сварочных проволок

Материал	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Ti	P	S
								Не более	
Колесная сталь 2	0,55–0,65	0,5–0,9	0,22–0,45	–	–	≤ 0,1 %	–	0,03	0,035
Св-08Г2С	0,08	2,0	≤ 1,0	–	–	–	–	–	–
ПП-АН180МН	≤ 0,12	1,0–1,5	0,4–0,6	0,6–0,9	0,3–0,6	0,05–0,12	0,03–0,09	–	–

Исследования проводили на образцах (разрушение по ЗТВ) при замедленном разрушении после испытаний по методу «Имплант» и одинаковом напряжении разрушения ($\sigma_{РАЗР} = 250$ МПа). Полученные изломы представляли собой поверхности разрушения с характерными зонами: I – возможные места зарождения трещины, т. е. зоны очагов разрушения; II – магистрального роста трещины (см. рис. 1, а). 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.

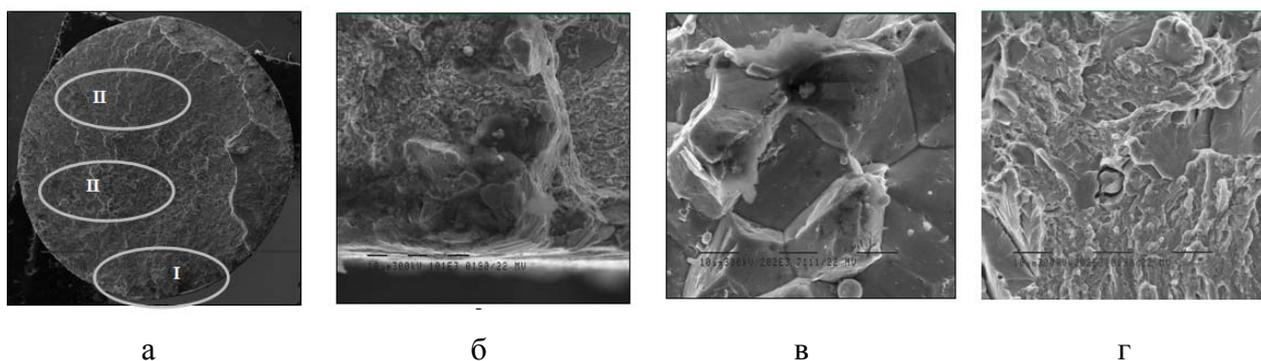


Рис. 1. Микроструктура поверхности разрушения: общий вид излома с характерными зонами очага (I) и магистрального роста трещины (II) (а, $\times 100$); фрагменты микроструктуры с фазовыми образованиями в зоне I (б, $\times 1010$); межзеренный скол (в) и квазихрупкое внутризеренное разрушение (г) в зоне II (в–г, $\times 2020$)

Поверхности излома сварных соединений, выполненных проволокой Св-08Г2С зоне I характерен квазихрупкий внутризеренный скол с объемной долей $V_{\delta} \sim 80\%$, и некоторой долей транскристаллитного хрупкого разрушения ($V_{\delta} \sim 20\%$), содержащего вторичные трещины по границам зерен. В зоне магистральной трещины (II) разрушение развивалось в основном по охрупченным межзеренным границам с локальными участками внутризеренного квазихрупкого разрушения ($V_{\delta} \sim 10...15\%$).

Таким образом, наибольшая доля микрорельефа поверхности разрушения для I-й зоны – внутризеренное квазихрупкое, для II-й зоны – хрупкое межзеренное, что характерно для быстрого разрушения (в течение 1 минуты) и свидетельствует о низких показателях прочности и пластичности металла.

Изменение химического состава (Mn, Si, Al, S, Ca, масс. %) частиц фазовых образований и неметаллических включений на поверхности излома показало, что для фазовых образований характерно повышенное содержание таких элементов как Si (до $\sim 11...30\%$), Al (до $\sim 6...10\%$), S (до $\sim 2...9\%$), Ca (до $\sim 5...11\%$); для неметаллических включений – Mn (до $\sim 12...19\%$), S (до $\sim 8...21\%$) и Ca (до $\sim 21\%$). Наличие фазовых образований и неметаллических включений по границам структурных составляющих способствует охрупчиванию межзеренных границ и соответственно приводит к трещинообразованию (см. рис. 1, б, в).

Оценка практической прочности (σ_{np}) в местах таких локальных концентраторов зарождения микротрещин показала, что уровень σ_{np} составляет порядка $\sim (0,2...0,4) \cdot \sigma_{0,2}$, что предопределяет катастрофический рост трещины и соответственно снижение трещиностойкости.

В случае использования сварочной проволоки ПП-АН180МН зоне I характерен смешанный тип разрушения: квазихрупкий внутризеренный скол ($V_{\delta} \sim 60\%$) и межзеренное хрупкое разрушение ($V_{\delta}^{xp} \sim 40\%$). Зоне II – транскристаллитное разрушение в основном по охрупченным границам зерен ($V_{\delta} \sim 70...80\%$), с протяженными (длиной $L_{mp} \sim 250$ мкм) вторичными межзеренными трещинами. На некоторых межзеренных фасетках видна вязкая составляющая с ямочным рельефом ($V_{\delta} \sim 20...30\%$). При продвижении магистральной трещины характер разрушения меняется (см. рис. 1, г) на внутризеренное квазихрупкое ($V_{\delta} \sim 60...70\%$) в сочетании с хрупким сколом ($V_{\delta} \sim 20...30\%$).

Таким образом, наибольшая доля микрорельефа поверхности разрушения для I-й зоны излома – внутризеренное хрупкое, для II-й зоны – межзеренное хрупкое в центральной части излома сменяется на интеркристаллитное квазихрупкое.

Анализ химического состава фазовых образований и неметаллических включений показал: для фазовых образований в области зарождения разрушения характерно повышенное содержание таких элементов как Si, S, Ca Cl (до $\sim 5\%$); для неметаллических включений

в зоне магистральной трещины – наибольшее содержание по Mn (~ 64 %) и др. элементам (Si, Al, Ti до ~ 21 %; Ca ~ до 8 %) и дисперсных частиц фазовых образований в межзеренных участках – S и Mn и до ~ 13...15 %.

Дисперсные частицы фазовых образований определяют вязкий тип разрушения по границам зерен, а неметаллические включения – хрупкий и квазихрупкий внутризеренный скол. Напряжение разрушения (σ_{np}) в локальных квазихрупких объемах составляет порядка $\sim (0,4 \dots 0,5) \cdot \sigma_{0,2}$ и достигает уровня $\sim (0,7 \dots 0,8) \cdot \sigma_{0,2}$ в участках с вязкой составляющей, что характеризует увеличение времени разрушения (до 4,5 часов) и соответственно повышение сопротивления хрупкому разрушению.

Сопоставление хрупкого межзеренного разрушения, его объемных долей по зонам изломов в зависимости от типа наплавленного металла и результатов испытаний показало следующее. Для сварных соединений с Б-М швами (по сравнению с Ф-П швами) изменение характера разрушения в зоне магистральной трещины приводит к повышению уровня практической прочности в локальных зонах концентраторов напряжений и к увеличению времени разрушения.

ВЫВОДЫ

Таким образом, расчетные методы оценок такой характеристики, как напряжение разрушения (σ_{np}), основанные на экспериментальных данных фрактографического анализа с учетом микромеханизма распространения трещины и структурных концентраторов напряжений – границ структурных составляющих, фазовых образований и неметаллических включений, дают возможность определять уровень практической прочности сварных соединений и прогнозировать их сопротивление хрупкому разрушению.

Исследованиями структурных параметров металла сварных соединений при замедленном разрушении, формирующихся при восстановительном ремонте железнодорожных колес с использованием сварочных материалов различного химического состава (Св-08Г2С и ПП-АН180МН), а также оценкой (на базе структурных фрактографических исследований) практической прочности сварных соединений, показано, что наиболее оптимальным по трещиностойкости является использование сварочной проволоки ПП-АН180МН (бейнитомартенситный шов).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка прочности и трещиностойкости металла железнодорожных колес после длительной эксплуатации / Л. И. Маркашова, В. Д. Позняков, А. А. Гайворонский и др. // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2011. – № 6. – С. 73–79.
2. Влияние легирования швов на структуру и свойства сварных соединений стали 17Х2М / Маркашова Л. И., Позняков В. Д., Алексеенко Т. А. и др. // *Автоматическая сварка*. – 2011. – № 4. – С. 7–15.
3. Либовиц Г. Разрушение. Т. 3. / Г. Либовиц. – Москва : Мир, 1976. – 800 с.
4. Браутман Л. Разрушение и усталость. Т. 5. Композиционные материалы / Л. Браутман, Р. Крок. – Москва : Мир, 1978. – 488 с.
5. Балтер М. А. Фрактография – средство диагностики разрушенных деталей / М. А. Балтер, А. П. Любченко, С. И. Аксенова. – Москва : Машиностроение, 1987. – 160 с.
6. Griffith A. A. *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids* / A. A. Griffith // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. – 1921. – V. 221. – P. 163–198.
7. Орован Е. Классическая и дислокационная теория хрупкого разрушения / Е. Орован // *Атомный механизм разрушения*. – Москва : Металлургия, 1963. – С. 170–184.
8. Котрелл А. Х. Теоретические аспекты процесса разрушения / А. Х. Котрелл // *Атомный механизм разрушения*. – Москва : Металлургия, 1963. – С. 30–68.
9. Нотт Дж. Ф. Микромеханизмы разрушения и трещиностойкость конструкционных сплавов / Дж. Ф. Нотт // *Механика разрушения*. – Москва : Мир, 1979. – С. 40–82.