

УДК 621.77:669.15-194:620.18

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА ПРИ
ИССЛЕДОВАНИИ ИЗЛОМОВ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ
НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ**

*д.т.н., проф. Большаков В.И., д.т.н., проф. Сухомлин Г.Д.,
к.т.н., доц. Лаухин Д.В., к.т.н., доц. Бекетов А.В.,
к.т.н., доц. Лаухина Л.Н., м.н.с. Иванцов С.В.*

*Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная
академия строительства и архитектуры»*

Анализ условий эксплуатации конструкций из высокопрочных строительных сталей привел к необходимости создания рациональной и практически приемлемой основы для количественной оценки возможных причин разрушения как конструкций в целом, так и отдельных элементов. В тоже время, применение электронной микроскопии как растровой, так и просвечивающей позволило установить, что в большинстве случаев конструкционные материалы разрушаются путем зарождения и роста мельчайших внутренних свободных поверхностей (трещин или пор), путем слияния которых и происходит разрушение. Часто именно свойства микрообъемов материала и условия вокруг отдельных микроскопических участков распространения трещины и определяют сопротивление разрушению. Прочность внутренних связей между частицами фаз и матрицей, прочность на отрыв интерметаллических частиц, остаточные напряжения вокруг частиц, а также величина, свойства и форма этих частиц в основном определяют склонность материала к разрушению.

Развитие в последние десятилетия методов рентгеноспектрального анализа позволило совместить изучения морфологии поверхности разрушения и исследования физико-химических свойств частиц, на которых происходило зарождение трещин.

В этой связи представляется актуальным выявление тех частиц второй фазы в структуре конструкционных материалов, которые могут быть инициаторами зарождения внутренних свободных поверхностей (пор).

Целью настоящей работы являлось количественная оценка с помощью энерго-дисперсионного метода частиц второй фазы, на которых происходило зарождение пор при динамических испытаниях малоуглеродистой микролегированной стали.

Химический состав и комплекс механических свойств исследуемой марки стали, приведен в таблице 1.

Микроструктура исследуемой стали приведена на рисунке 1. Визуальная оценка показывает, что структура металла представляет собой дисперсную ферритто-перлитную смесь без ярко выраженной перлитной полосчатости.

Электронно-микроскопические исследования и энерго-дисперсионный анализ поверхностей разрушения образцов из стали 10Г2ФБ были проведены на сканирующем электронном микроскопе Nova 600 NanoLab [1] и JEOL JSM-840 [2].

Принципы энерго-дисперсионного метода анализа химического состава

можно сформулировать следующим образом: рентгеновские кванты, испускаемые мишенью под воздействием пучка ускоренных электронов, вылетающих из зонда, через тонкое бериллиевое окно попадают на вход полупроводникового детектора, где происходит пробой $p-n$ перехода, инициированный этими квантами. Электрические импульсы усиливаются специальными малозумными усилителями [3, 4].

Таблица 1

Химический состав толстого листа и комплекс механических характеристик исследуемой стали

Содержание элементов, %							
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Nb</i>	<i>V</i>	<i>Ti</i>
0,14	1,30	0,26	0,003	0,011	0,033	0,063	0,016
0,15	1,26	0,25	0,003	0,011	0,043	0,059	0,014
Механические свойства							
σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCV^{+20} , Дж/см ²	KCV^{-40} , Дж/см ²		
400	550	35	73	280	250		

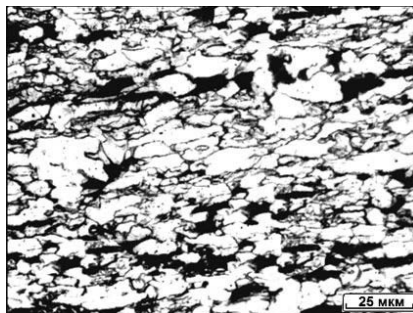


Рис. 1. Структура листов низкоуглеродистой стали 10Г2ФБ

Проходящие от детектора усиленные импульсы преобразуются в спектр посредством «многоканального анализатора», который измеряет амплитуду каждого входного импульса и помещает его в соответствующий входной «канал» анализатора. Зарегистрированный спектр представляет собой массив чисел, отражающих число импульсов в каждом канале и на экран монитора ЭВМ обычно выводится в виде гистограммы [5].

С целью количественной оценки возможных мест зарождения внутренних пустот был проведен энерго-дисперсионный анализ поверхностей разрушения исследуемой марки стали с учетом поправок на взаимодействие рентгеновского излучения с материалом образца и появляющихся в спектре артефактов [6-8]. Одновременное использование сканирующего электронного микроскопа и приставки для энерго-дисперсионного анализа позволило совместно исследовать морфологические особенности излома и химический состав локальных участков

поверхности, например выделений, находящихся внутри пор. Частицы второй фазы, находящиеся внутри пор, по всей видимости, являлись инициаторами развития трещины так, как уровень внутренних напряжений на границы раздела частица-матрица значительно выше уровня напряжений в матрице. Это связано, по-видимому, в первую очередь с морфологическим и энергетическим строением границы сопряжения частицы с матрицей [9].

Для примера, на рис. 2 показан внешний вид анализируемых поверхностей разрушения. На рис. 3 и 4 приведены микрофотографии тонкой структуры участков образцов, обозначенных на рис. 2. Места для энерго-дисперсионного контроля выбирались следующим образом: в одной поре проба бралась с выделения и, для возможности сравнения с матрицы.

Полученные энерго-дисперсионные спектры и количественный расчет химического состава участков также приведены на рис. 3-4. Количественный расчет химического состава участка выполнялся автоматически с помощью специального программного обеспечения на персональной ЭВМ и в последствие подвергался детальному анализу на предмет установления статистически индексируемых пиков и артефактов.

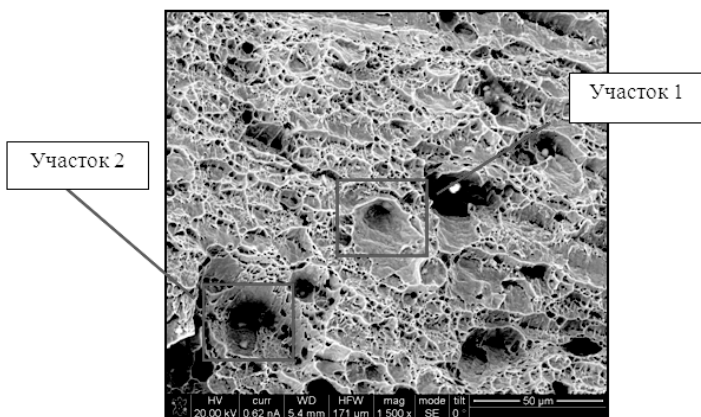
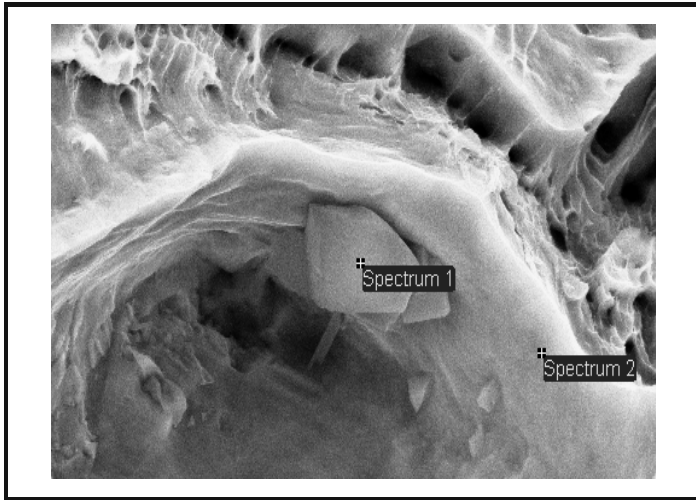
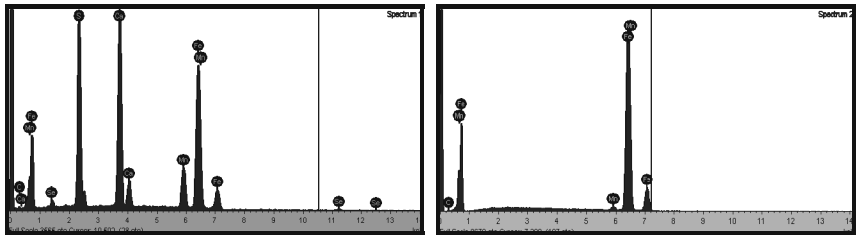


Рис. 2. Общий вид поверхности разрушения с указанием мест детального исследования

Общий анализ изломов показал, что в поверхностях разрушения присутствуют ферритные прослойки (вязкие участки) которые часто прерывают перлитные полосы. Таким образом, можно сделать вывод, что для всех исследуемых образцов разрушение происходило по вязкому механизму. Анализ полученных данных показал, что в спектре всех исследуемых выделений присутствуют линии серы, что свидетельствует о том, что инициатором зарождения внутренних пустот (пор) в малоуглеродистой микролегированной стали являются сульфиды.



a)



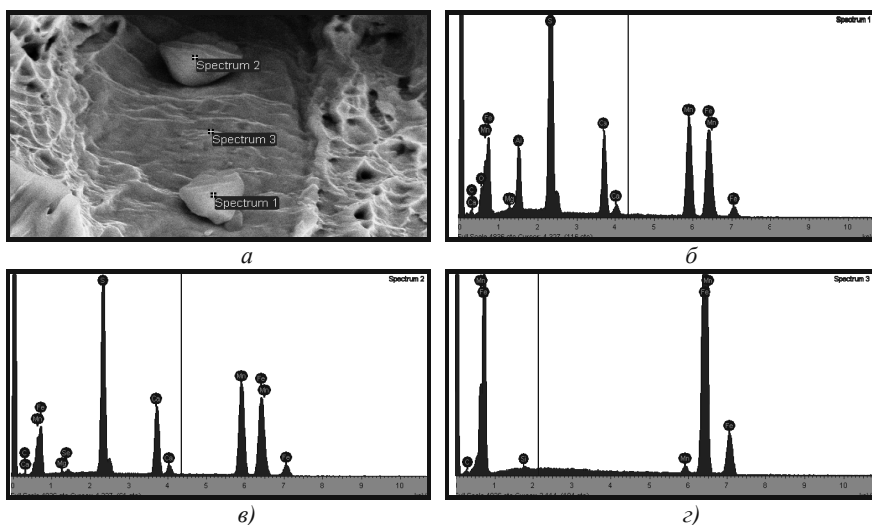
б)

в)

Спектр	Содержание элементов, % масс					
	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>Ca</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Se</i>
Spectrum 1	8,37	22,35	24,77	8,81	34,88	0,82
Spectrum 2	5,25	–	–	1,67	93,08	–

г)

Рис. 3. Детальный анализ участка 1 на рис. 2:
 а – изображение анализируемой поверхности ($\times 15000$) с указанием мест
 взятия энерго-дисперсионной пробы;
 б, в – полученные энерго-дисперсионные спектры;
 г – количественный расчет концентрации элементов



Спектр	Содержание элементов, % масс									
	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>Ca</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Se</i>
Spectrum 1	16,84	11,88	0,35	6,30	–	25,36	8,03	15,92	15,32	–
Spectrum 2	12,77	–	0,44	–	–	28,06	10,73	24,97	22,69	0,34
Spectrum 3	5,62	–	–	–	0,49	–	–	1,80	92,09	

д)

Рис. 4. Детальный анализ участка 2 на рис. 2:
a – изображение анализируемой поверхности ($\times 10000$) с указанием мест
 взятия энерго-дисперсионной пробы;
б, в, г – полученные энерго-дисперсионные спектры;
д – количественный расчет концентрации элементов

Выводы:

1. Совместное исследование морфологии поверхности разрушения и физико-химических свойств выделений позволило проанализировать и детально изучить места зарождения внутренних микропустот в малоуглеродистой микролегированной стали.

2. Микроструктура исследуемой стали представляет собой дисперсную ферритно-перлитную смесь без ярко выраженной перлитной полосчатости,

3. Фактографический анализ поверхности изломов показал, что разрушение происходило по вязкому механизму (за счет образования и слияния микропор). При этом в изломах присутствуют локальные участки квазихрупкого излома, которые соответствуют цементитным прослойкам в перлите.

4. Показано, что основными местами зарождения пор, и как следствие, местами зарождения докритических трещин, являются сульфиды, оксиды и неметаллические включения на феррито-перлитных границах.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.fe.i.com/uploadedFiles/Documents/Content/2006_06_Nova600NanoLab_pb.pdf
2. http://www.prism.princeton.edu/PRISM_cleanroom/equip/JEOL/JSM_840_SEM.htm
3. Бурке Дж. Е. Рекристаллизация и рост зерен / Джордж Бурке, Давид Тарнбалл// Успехи физики металлов. – 1956. – С. 443–456.
4. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский анализ: в двух книгах. Книга 1. / [Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э.]; пер. с англ. Р. С. Гвоздовер, Л. Ф. Комоловой. – М.: Мир, 1984. – 303 с.
5. Векилова Г. В. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Г. В. Векилова, А. Н. Иванов. – М.: Московский государственный институт стали и сплавов, 2007. – 41 с.
6. Рис С. Дж. Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии / Рис С. Дж. Б.; пер. с англ. О. Б. Петрова, И. М. Романенко. – М.: Техносфера, 2008г. – 232 с.
7. Гоулдстейн Дж. Практическая растровая электронная микроскопия / Дж. Гоулдстейна, Х. Яковица; пер. с англ. В. И. Петрова. – М.: Мир, 1978. – 656 с.
8. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский анализ: в двух книгах. Книга 2. / [Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э.]; пер. с англ. Р. С. Гвоздовер, Л. Ф. Комоловой. – М.: Мир, 1984. – 303с. – М.: Мир, 1984. – 348 с.
9. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов / Хоникомб Р. [пер. с англ. В. Н. Любова]. - М.: Мир, 1972. – 408 с.