

УДК 669.15-194.2; 539.422.3; 539.563

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

ЛАУХИН Д. В.<sup>1</sup>, *д. т. н., проф.*,

ФЕДОРОВА И. С.<sup>2</sup>, *асп.*,

ЧУЯН О. С.<sup>3</sup>, *бакалавр*

<sup>1</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (050) 58-55-429, e-mail: [d\\_laukhin@mail.ru](mailto:d_laukhin@mail.ru), ORCID ID : 0000-0002-9842-499X

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (093) 97-52-806, e-mail : [fis2008@ukr.net](mailto:fis2008@ukr.net), ORCID ID : 0000-0001-9330-3761

<sup>3</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (093) 24-35-639

**Аннотация.** *Цель.* Неотъемлемым требованием к современным строительным сталям, помимо наличия комплекса высоких механических свойств, является высокий уровень сопротивления хрупкому разрушению. Именно поэтому изучение влияния различных параметров на характер разрушения конструкционных сталей является первостепенной целью данной статьи. *Результаты.* Проанализировано влияние основных микроструктурных параметров на процесс формирования поверхности разрушения низкоуглеродистых сталей. Проведенный комплекс исследований характера разрушения низкоуглеродистой стали 10Г2ФБ подтверждает наличие характерных особенностей формирования поверхности разрушения.

*Ключевые слова:* характер разрушения; низкоуглеродистая сталь; расщепления; неметаллические включения; границы зерен.

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ МІКРОСТРУКТУРИ НА ХАРАКТЕР РУЙНУВАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

ЛАУХІН Д. В.<sup>1</sup>, *д. т. н., проф.*,

ФЕДОРОВА І. С.<sup>2</sup>, *асп.*,

ЧУЯН О. С.<sup>3</sup>, *бакалавр*

<sup>1</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (050) 58-55-429, e-mail : [d\\_laukhin@mail.ru](mailto:d_laukhin@mail.ru), ORCID ID : 0000-0002-9842-499X

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (093) 97-52-806, e-mail : [fis2008@ukr.net](mailto:fis2008@ukr.net), ORCID ID : 0000-0001-9330-3761

<sup>3</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (093) 24-35-639

**Анотація.** *Мета.* Невід'ємна вимога до сучасних будівельних сталей, окрім наявності комплексу високих механічних властивостей, – це високий рівень опору крихкому руйнуванню. Саме тому вивчення впливу різних параметрів на характер руйнування конструкційних сталей є першочерговою метою даної статті. *Результати.* Проаналізовано вплив основних микроструктурних параметрів на процес формування поверхні руйнування низьковуглецевих сталей. Проведений комплекс досліджень характеру руйнування низьковуглецевої сталі 10Г2ФБ підтверджує наявність характерних особливостей формування поверхні руйнування.

*Ключові слова:* характер руйнування; низьковуглецева сталь; розщеплення; неметалеві включення; границі зерен.

## INFLUENCE OF MICROSTRUCTURAL PARAMETERS ON THE FRACTURE BEHAVIOR OF LOW-CARBON STEELS

LAUKHIN D. V.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
FEDOROVA I. S.<sup>2</sup>, *postgraduate*,  
CHUYAN O. S.<sup>3</sup>, *bachelor*

<sup>1</sup> Department of Material Science and Treatment of Materials, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 58-55-429, e-mail : [d\\_laukhin@mail.ru](mailto:d_laukhin@mail.ru), ORCID ID : 0000-0002-9842-499X

<sup>2</sup> Department of Material Science and Treatment of Materials, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (093) 97-52-806, e-mail : [fis2008@ukr.net](mailto:fis2008@ukr.net), ORCID ID : 0000-0001-9330-3761

<sup>3</sup> Department of Material Science and Treatment of Materials, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (093) 24-35-639

**Abstract. Purpose.** Besides having complex of high mechanical properties a modern structural steel should have a high level of resistance to brittle fracture. That is why the study of the influence of various parameters on the fracture behavior of structural steel is the primary purpose of this article. **Results.** The influence of the basic microstructural parameters on the formation of the fracture surface of low-carbon steels was analyzed. Undertaken studies on fracture surface's character of low-carbon steel 10Г2ФБ confirm the presence of fracture surface formation peculiarities.

**Keywords:** fracture behavior; low-carbon steel; delaminations; non-metallic inclusions; grain boundaries.

### Актуальность проблемы

Основным требованием к современным конструкционным сталям является сочетание высоких прочностных и пластических свойств. Для предотвращения хрупких разрушений низкоуглеродистых сталей необходимо, чтобы их разрушение при расчетной температуре эксплуатации имело вязкий характер не менее, чем на 85 % площади излома образца [1; 2].

### Материалы исследования

В общем случае все материалы подразделяют на хрупкие и пластичные. Однако подобное разделение достаточно условно, поскольку один и тот же материал в различных условиях эксплуатации способен демонстрировать как вязкий либо хрупкий, так и смешанный тип разрушения (рис. 1) [3].

С точки зрения микроструктуры разрушение бывает двух типов: транскристаллитное (распространение трещины по телу зерна) и межкристаллитное (распространение трещины по границам зерен).

Все факторы, влияющие на характер разрушения, подразделяют на внутренние (отражающие состав материала, его строение) и внешние (отражающие процесс изготовления и условия эксплуатации). К первым относятся: структурное состояние; фазовый и химический состав; наличие примесей, пор и уплотнений; кристаллическая структура. Ко вторым: скорость охлаждения при термической обработке; температура эксплуатации; условия нагружения, а также изменение сечения элемента конструкции в процессе эксплуатации [3; 5–7].

Несмотря на разнообразие данных факторов, наиболее существенное влияние на формирование

поверхности разрушения в низкоуглеродистых сталях оказывает их микроструктура [8].

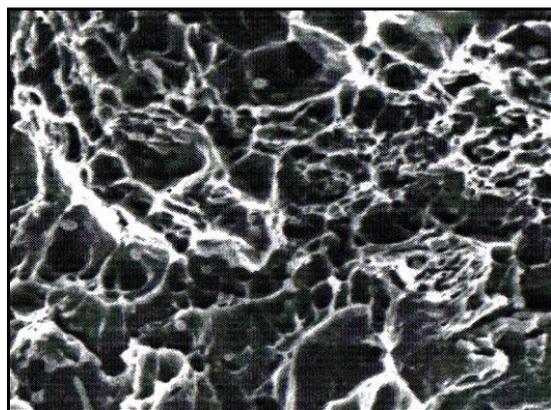
Основной особенностью поверхностей разрушения низкоуглеродистых сталей, произведенных по технологии контролируемой прокатки, является наличие так называемых «расщеплений» [1]. Под расщеплениями понимают вторичные трещины или расслоения, которые открываются перпендикулярно плоскости основного излома и параллельно плоскости листа.

Наибольшую склонность к подобным расщеплениям имеют стали, микролегированные сильными карбидообразующими элементами – ниобием, ванадием и молибденом.

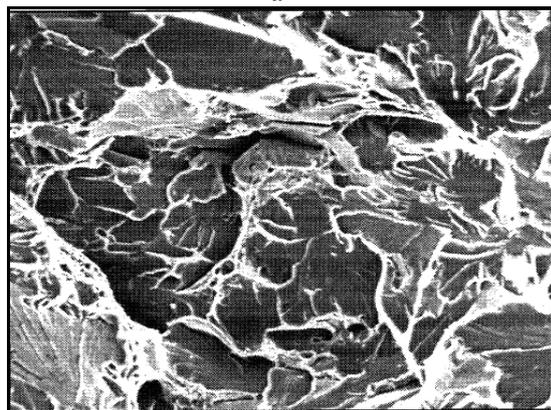
В работе [18] было показано, что наличие подобных расщеплений связано с формированием ферритно-перлитной полосчатости в результате контролируемой прокатки.

Появление расщеплений при разрушении низкоуглеродистых сталей также может быть вызвано: особенностями кристаллографического строения, межкристаллитным разрушением вдоль границ зерен остаточного аустенита, расщеплением серы и фосфора, микроструктурной анизотропией, упорядочением неметаллических включений и их вытянутой формой [1; 2].

Расщепления образуются в результате хрупкого разрушения. Но, несмотря на это, вследствие того, что металл, заключенный между двумя соседними расщеплениями, имеет тенденцию к вязкому разрушению – ведут к увеличению значений ударной вязкости. Таким образом, расщепления могут служить косвенным подтверждением высокой вязкости стали при данной температуре [1; 2; 6].



a



б (b)

Рис. 1. Поверхности разрушения образцов, термически обработанных по одной схеме, испытанных при различных температурах [4] :  
a – +20 °С; б – -100 °С /

Fig. 1. The fracture surfaces of samples with the same heat treatment tested at various temperatures [4] :  
a – +20 °С; b – -100 °С

### Результаты исследования и их обсуждение

Схематически механизмы формирования расщеплений показаны на рисунке 2. В процессе разрушения возникают расщепления двух типов [2] :

1. Ограничители трещины – распространяются параллельно надрезу и перпендикулярно направлению разрушения (рис. 2 а).

2. Разделители трещины – распространяются перпендикулярно надрезу и параллельно направлению разрушения (рис. 2 б).

В работе [8] было доказано, что для сталей с ферритно-перлитной структурой, прокатанных по технологии контролируемой прокатки (как с применением ускоренного охлаждения, так и без него), при температурах испытаний +20...-20 °С изломы характеризуются наличием расщеплений. При дальнейшем понижении температуры расщепления исчезают, а участки вязкого разрушения сосредоточены в приповерхностном слое. При прокатке ферритно-бейнитных сталей без применения ускоренного охлаждения – в изломах наблюдаются расщепления, характерные для ферритно-перлитных сталей. При использовании

ускоренного охлаждения, при тех же условиях испытаний расщепления присутствуют только в осевой зоне.

Уменьшить количество образующихся расщеплений возможно при помощи усовершенствования технологии контролируемой прокатки. Измененная технология производства толстолистного проката, состоящая в снижении температур окончания деформации в черновой и чистовой клетях до 830...914 °С и 680..714 °С соответственно, а также применении регулируемого охлаждения до температуры 720 °С после черновой прокатки, предложена в работе [18]. Было доказано [18; 19], что при данной технологии прокатки зарождение кристаллов доэвтектоидного феррита происходит не только на большеугловых, но и на полигональных границах аустенитного зерна, что повышает дисперсность ферритных зерен перед чистовой прокаткой. Последующая деформация приводит к получению структуры со сниженной ферритно-перлитной полосчатостью, в виде «островков» перлита, разделенных между собой ферритной фазой. Это было достигнуто путем формирования более дисперсной конечной ферритно-перлитной структуры, что привело к повышению механических и эксплуатационных свойств толстолистного проката.

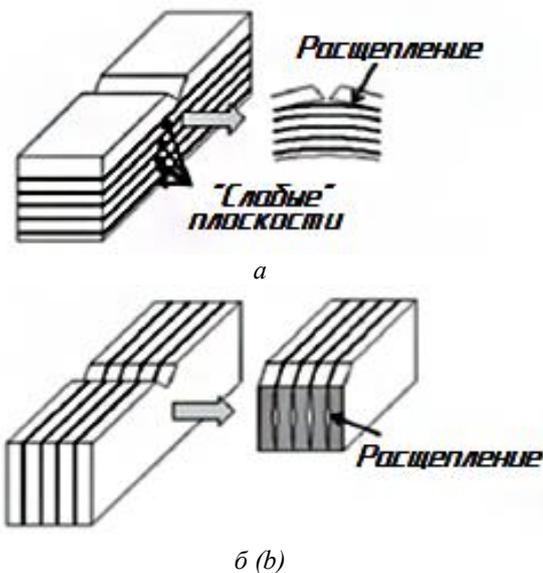


Рис. 2. Механизмы формирования расщеплений [9] :  
а – расщепления – ограничители трещин;

б – расщепления – разделители трещин /

Fig. 2. Mechanisms of delamination formation [9] :

а – crack arrester – type delaminations;

б – crack divider – type delaminations

На характер поверхности разрушения также влияет наличие границ зерен разных типов. Степень межкристаллитного растрескивания значительно изменяется под влиянием зернограницного конструирования (ЗГК), которое в значительной мере увеличивает количество специальных границ в стали [14].

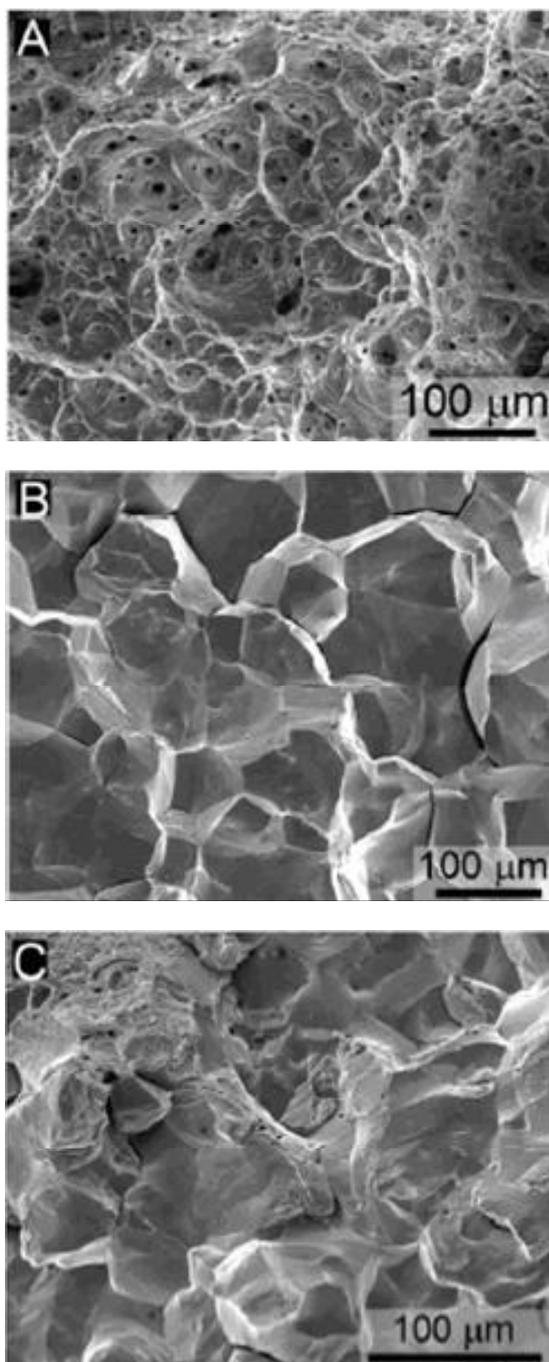


Рис. 3. Поверхності руйнування [17] :  
 а – мікроструктура, отримана без використання ЗГК;  
 в – мікроструктура з малим вмістом спеціальних  
 границь; с – мікроструктура з високим вмістом  
 спеціальних границь / Fig. 3. Fracture surfaces [17] :  
 a - microstructure obtained without GBE; в - microstructure  
 with a few special boundary; с - microstructure with high  
 number of special boundaries

Как показано в работе [15], границы зерен общего типа ( $\Sigma > 29$ ) являются предпочтительными путями распространения межкристаллитной трещины, в то время как специальные границы зерен ( $\Sigma \leq 29$ ) показывают высокую стойкость к межкристаллитному растрескиванию. На рисунке 3 изображены поверхности разрушения микроструктур одного и того же материала с различным

содержанием специальных границ. Структура с невысоким количеством специальных границ демонстрирует полностью межзеренное разрушение, в то время как увеличение содержания специальных границ приводит к уменьшению процента межзеренного разрушения.

Границы зерен общего типа являются местами пониженной прочности и повышенной концентрации напряжений, поэтому оказывают немаловажное влияние на процесс разрушения сталей. Во-первых, тормозя скольжение, увеличивают количество дислокаций, находящихся в одном зерне, создавая таким образом концентрацию напряжений, способствующую развитию разрушения. Во-вторых, выделяющиеся по границам зерен хрупкие частицы неметаллических включений (в основном, карбиды, нитриды и карбонитриды) действуют в качестве центров зарождения трещин. Сегрегация примесей по границе раздела матрица/включение приводит к зарождению микротрещин, их коалесценции и дальнейшему разрушению вдоль данных границ (рис. 4) [11–12].

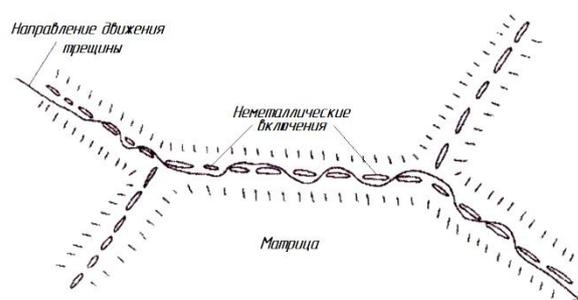


Рис. 4. Схема міжзеренного руйнування [12] /  
 Fig. 4. Scheme of intercrystalline fracture [12]

Неоспоримым фактором, влияющим на процесс разрушения сталей, является наличие в них неметаллических включений. Из-за своих небольших размеров данные включения сильно не влияют на прочность материала, но могут играть решающую роль в процессе его разрушения [7]. В процессе разрушения стали значимую роль играет не только их количество, но и морфология (химический состав, размер, форма) и распределение.

В отличие от хрупкого разрушения вязкое разрушение сталей почти всегда определяется наличием неметаллических включений. Присутствие неметаллических включений в большинстве случаев указывает на вязкость стали. Большинство вязких изломов сталей со структурой феррита, бейнита и мартенсита имеют ямочный рельеф [7; 8; 16]. Полагают, что ямки диаметром менее 1 мкм связаны с образованием пор на дисперсных частицах, а более крупные ямки обусловлены наличием в металле включений. На рисунке 5 изображен излом, состоящий из уплощенных ямок и глубоких и крупных ямок-конусов, на дне которых находятся неметаллические включения (показаны стрелками).

Зарождение пор может происходить в результате растрескивания включений или отслаивания на поверхности раздела включение–матрица. Эти процессы могут приводить к образованию микропор не только в процессе эксплуатации материала, но и во время предшествующих операций его обработки давлением.

Экспериментальные исследования вязкого разрушения ферритно-перлитных сталей с различным содержанием и формой неметаллических включений [16] показали, что поры образуются на поверхности раздела включение–феррит при незначительных деформациях из-за слабой связи между включением и матрицей. Дискообразные сульфиды, плоскость которых перпендикулярна оси растяжения, являются гораздо более вредными, чем сульфиды, вытянутые в направлении деформации.

Проведенный нами комплекс исследований подтверждает описанные выше характерные особенности формирования поверхности разрушения низкоуглеродистых сталей.

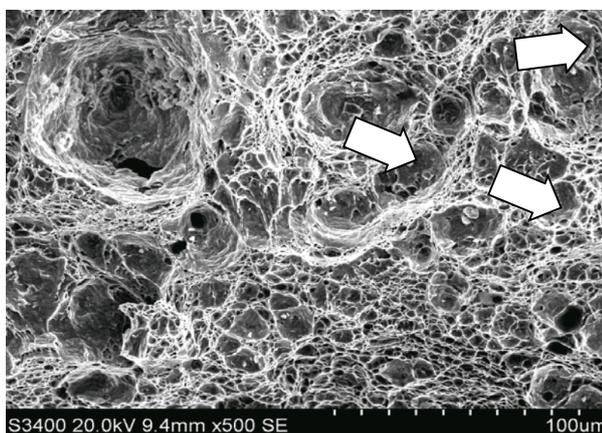
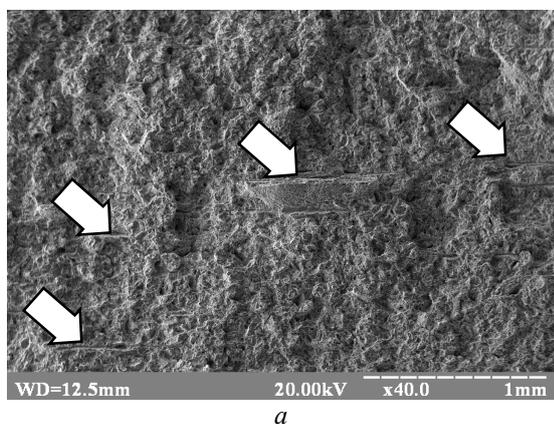
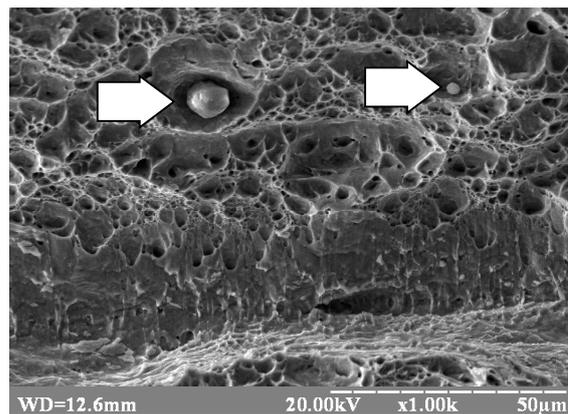


Рис. 5. Поверхность разрушения низкоуглеродистой стали [13] / Fig. 5. The fracture surfaces of low-carbon steel [13]

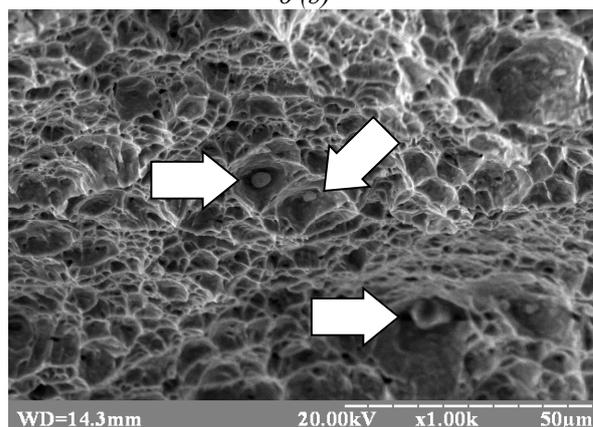
Так, на рисунке 6 представлена поверхность разрушения низкоуглеродистой стали 10Г2ФБ, микролегированной ниобием и ванадием. Разрушение исследуемой стали имело смешанный вязко-хрупкий характер.



а



б (b)



в (c)

Рис. 6. Поверхность разрушения стали 10Г2ФБ : а – макрофрактографический анализ; б, в – микрофрактографический анализ / Fig. 6. Fracture surface of 10Г2ФБ steel : а – macrofractography; б, в – microfractography

При макрофрактографических исследованиях (рис. 6 а) на изломах образцов были выявлены характерные для низкоуглеродистых сталей расщепления (показаны стрелками). При проведении микрофрактографических исследований (рис. 6 б и 6 в) на поверхности были обнаружены ямки-конусы различных размеров, на дне которых находятся как крупные, так и мелкие неметаллические включения.

### Выводы

1. Проведенный комплекс исследований подтверждает наличие характерных особенностей формирования поверхности разрушения низкоуглеродистых сталей.
2. Для низкоуглеродистых сталей, микролегированных карбидообразующими элементами и произведенными по технологии контролируемой прокатки, характерной особенностью поверхности разрушения является наличие расщеплений.
3. Снижение температур окончания деформации в черновой и чистовой клетях, а также применение регулируемого охлаждения перед чистовой прокаткой приводит к зарождению кристаллов доэвтектоидного феррита не только на большеугловых, но и на полигональных границах

аустенитного зерна, що підвищує дисперсність ферритних зерен перед чистою прокаткою.

4. Контролювана прокатка по удосконаленій технології дозволяє сформувати більш дисперсну кінцеву ферритно-перлітну структуру з зниженою полосчатістю, що призводить до підвищення механічних і експлуатаційних властивостей толстолистового проката.

5. Руйнування вздовж меж зерен відбувається внаслідок сегрегації примісей по межі розділу матриця/включення.

6. Збільшення кількості спеціальних меж в мікроструктурі при допомозі зернограничного конструювання призводить до переважній розповсюдженості тріщин по телу зерна і, відповідно, до високої стійкості сталі до міжкристалітного растрескивання.

## СПИСОК ІСПОЛЬЗОВАНИХ ІСТОЧНИКІВ / REFERENCES

1. Голованенко С. А. Влияние контролируемой прокатки на характер разрушения малоуглеродистых сталей для сварных труб большого диаметра / С. А. Голованенко, О. Н. Чевская // Сталь. – 1984. – № 12. – С. 51–55.

Golovanenko S. A. Influence of controlled rolling on the nature of the low-carbon steels for welded large-diameter pipes destruction / S. A. Golovanenko, O. N. Chevskaya // Stal'. – 1984. – № 12. – Pp. 51–55.

<http://www.imet.ru/STAL/Archive1>

2. Hudson H. Evaluation of delamination mechanisms from Charpy impact test in API-X70 steel / Hudson Haskel, Ederson Pauletti, Juliana P. Martins, André L.M.Carvalho // 13th International Conference on Fracture. – Beijing, China. – 2013. – 10 p.

<http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/icf13/paper/viewFile/11167/10546>

3. Факторы, влияющие на разрушение металла [Текст]. Режим доступа: <http://www.trastcomp.ru/factory-vliyayushhie-na-razrushenie-metalla>, 05.05.2015, 14.30

4. Большаков В. И. Атлас структур металлов и сплавов / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин // Днепропетровск: ГБУЗ «ПГАСА», 2010. – 174 с.

Bol'shakov V. I. Atlas of metals and alloys structures / V. I. Bol'shakov, G. D. Sukhomlin, D. V. Laukhin // Dnipropetrovs'k : HSEI PSACEA, 2010. – 174 p.

<https://yadi.sk/i/aLfkj7fLd9VvKU>

5. Евстифеев А. Д. Температурно-скоростная зависимость типа разрушения / А. Д. Евстифеев, А. А. Груздков, Ю. В. Петров // Журнал технической физики. – 2013. – Том 83. – Вып. 7. – С.59–63.

Estifeev A. D. Temperature-speed dependence of fracture type / A. D. Estifeev, A. A. Guzdokov, Yu. V. Petrov // Zhurnal tehniceskoy fiziki. – 2013. – vol. 83. – ed. 7. – Pp. 59–63.

<http://journals.ioffe.ru/jtf/2013/07/p59-63.pdf>

6. Grossmann G. The ELFNET Book on Failure Mechanisms, Testing Methods, and Quality Issues of Lead-Free Solder Interconnects / Günter Grossmann, Christian Zardini // Springer. – 2011. – 313 p.

<http://www.springer.com/gp/book/9780857292353>

7. Металлы и сплавы. Справочник. Под редакцией Ю. П. Солнцева; НПО «Профессионал». – Санкт-Петербург, 2003.

Metals and alloys. Reference guide. Edited by Yu. P. Solncev; SPA «Professional». – Saint Petersburg, 2003.

<http://metalli-i-splavi-spravochnik-pod-redaktsiyey-yup-solntseva.tpbelipvzp.appspot.com/>

8. Пемов И. Ф. Взаимосвязь микроструктуры и параметров разрушения при испытаниях падающим грузом толстолистового проката из низкоуглеродистой микролегированной стали / И. Ф. Пемов, Е. А. Голи-Оглу, А. Д. Лючков и др. // Металлы и литее Украины. – 2012. – № 2–3. – С. 69–74.

Pemov I. F. The relationship of microstructure and fracture parameters during the drop weight tear test of hot-rolled plates of low-carbon micro-alloyed steel. – Metals and casting of Ukraine. – 2012. – № 2–3. – Pp. 69–74.

<http://mlu.com.ua/pub/>

9. Hudson H. Microstructure and microtexture assessment of delamination phenomena in Charpy impact tested specimens / Hudson Loch Haskel; Ederson Pauletti; Juliana de Paula Martins; André Luis Moreira de Carvalho // Materials Research, vol. 17, no.5, 2014.

[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392014000500017&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392014000500017&script=sci_arttext)

10. Joo M. S. Role of Delamination and Crystallography on Anisotropy of Charpy toughness in API-X80 steel / M. S. Joo, D. – W. Suh, J. H. Bae, H. K. D. H. Bhadeshia // Material science and engineering. – A 546. – 2012. – Pp. 314–322.

<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2012/X80.pdf>

11. Gurovich B. A. Intergranular and intragranular phosphorus segregation in Russian pressure vessel steels due to neutron irradiation / B. A. Gurovich, E. A. Kuleshova, Ya. I. Shtrombakh, O. O. Zabusov, E. A. Krasikov // JNM. 2000, v. 279, p. 259–272.

[https://www.google.com.ua/?gfe\\_rd=cr&ei=RZVVVbrcBaOG8QfOoIClAg&gws\\_rd=ssl#](https://www.google.com.ua/?gfe_rd=cr&ei=RZVVVbrcBaOG8QfOoIClAg&gws_rd=ssl#)

12. Moulder John. F. Atomistic details of the fracture path in temper – embrittled low alloy steel / John. F. Moulder, A. Joshi. // Metall. Trans. A. – 1998. – v. 9A. – Pp. 219–29.

<http://link.springer.com/article/10.1007/BF02643499>

13. Симонов М. Ю. Влияние структуры на параметры изломов и характеристики сопротивления росту трещин при ударном нагружении низкоуглеродистых конструкционных сталей / М. Ю. Симонов, А. М. Ханов, Г. С. Шайманов // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – № 1. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. – С. 106–116.

Simonov M. Yu. Influence of structure on the fracture parameters and characteristics of crack growth resistance under impact loading of low-carbon structural steel / M. Yu. Simonov, A. M. Khanov, G. S. Shaymanov // Vestnik PGU. Mashinostroenie, materialovedenie. – № 1. – Perm : PGU, 2011. – Pp. 106–116.

<http://www.twirpx.com/file/1088138/>

14. Sukhomlin G. D. Particular properties of  $\Sigma=3n$  boundaries in FCC polycrystals. I. Crystallographical parameters and boundaries faceting during annealing / G. D. Sukhomlin, A. V. Andreeva // Phys. stat. sol. (a). – 1983. – Vol. 78. – P. 333–341.

<http://199.171.202.195/doi/10.1002/pssa.2210780139/abstract;jsessionid=D2F720833C2A211C500DAE4882A40E7C.f04f01?deniedAccessCustomisedMessage=&userIsAuthenticated=false>

15. Kopecky Ch. V. Multiple twinning and specific properties of  $\Sigma=3n$  boundaries in FCC crystals /

Ch.V. Kopezky, A. V. Andreeva, G.D. Sukhomlin // Acta Metall. Mater. – 1991. – Vol. 39, №7. – P. 1603–1615.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/095671519190248Y>

16. Нархов А. В. Влияние неметаллических включений на механические свойства сталей / А. В. Нархов, Б. А. Клыпін, А. Рей // Металловедение и термическая обработка. – 2002. – № 1. – С. 22–36.

Narkhov A. V. Influence of nonmetallic inclusions on mechanical properties of steels / A. V. Narhov, B. A. Klypin, A. Rey // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka. – 2002. – № 1. – Pp. 22–36.

[https://www.google.com.ua/search?q=14.%09Sukhomlin+G.D.+Particular+properties+of+%E2%88%91%3D3n+boundaries+in+FCC+polycrystals.+I.+Crystallographical+parameters+and+boundaries+faceting+during+annealing&ie=utf-8&oe=utf-8&gws\\_rd=cr&ei=OJ9VVbrBEsHoUMuZgYgI#](https://www.google.com.ua/search?q=14.%09Sukhomlin+G.D.+Particular+properties+of+%E2%88%91%3D3n+boundaries+in+FCC+polycrystals.+I.+Crystallographical+parameters+and+boundaries+faceting+during+annealing&ie=utf-8&oe=utf-8&gws_rd=cr&ei=OJ9VVbrBEsHoUMuZgYgI#)

17. Bechtle S. Grain-boundary engineering markedly reduces susceptibility to intergranular hydrogen embrittlement in metallic materials / S. Bechtle, M. Kumar, B. P. Somerday, M. E. Launey and oth. – Acta Materialia. – 2009. – Vol. 57. – № 14. – Pp. 4148–4157.

<https://escholarship.org/uc/item/85w650t6>

18. Рязанова А. В. Вплив хімічного складу та параметрів контрольованої прокатки на формування структури та комплексу експлуатаційних властивостей сталі 10Г2ФБ / А. В. Рязанова, В. І. Большаков, Д. В. Лаухін. – Дніпропетровськ : ПДАБА, 2008. – 120 с.

*Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); д-ром техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлиным (Украина)*

Статья поступила в редколлегию 7.09.2015

Ryazanova A. V. Effect of chemical composition and controlled rolling parameters on the structure and performance characteristics of 10Г2ФБ steel / A. V. Ryazanova, V. I. Bol'shakov, D. V. Laukhin. – Dnipropetrovsk : PGAEA, 2008. – 120 p.

[http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/\\_cgiiirbis\\_64.exe?Z21ID=&I21DBN=REF&P21DBN=REF&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%A0%D1%8F%D0%B7%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%90\\$](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/_cgiiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=REF&P21DBN=REF&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%A0%D1%8F%D0%B7%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%90$)

19. Лаухин Д. В. Полигонизация аустенита при контролируемой прокатке / Д. В. Лаухин, В. И. Большаков. – Днепропетровск : «Свидлер А. Л.», 2011. – 242 с.

Laukhin D. V. Poligonization of austenite during controlled rolling / D.V. Laukhin, V.I. Bol'shakov. – Dnipropetrovsk : "Svidler A.L.", 2011. – 242 p.

[http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/\\_cgiiirbis\\_64.exe?Z21ID=&I21DBN=REF&P21DBN=REF&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%88%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B2%20%D0%92\\$](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/_cgiiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=REF&P21DBN=REF&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%88%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B2%20%D0%92$)