

УДК 621.771

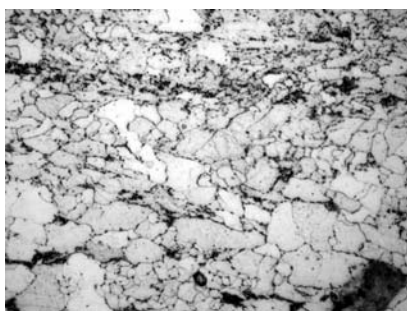
Колбасников Н. Г.  
Зотов О. Г.  
Лукьянов А. А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАТЕРИАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ

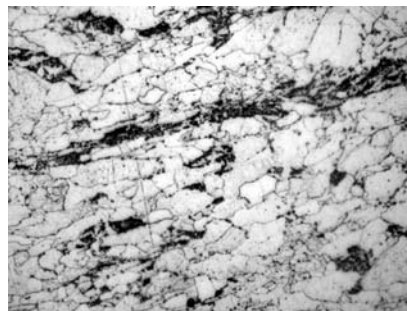
Разработанные в предыдущих работах [1–2] компьютерная модель испытаний падающим грузом и методика оценки доли вязкой составляющей разрушения в изломе образцов (ДВСИ) отражают особенности и позволяют прогнозировать поведение материала при подобных испытаниях. Было показано, что значение ДВСИ зависит как от химического состава стали, так и от технологических особенностей изготовления листа, определяющих структуру металла. Компьютерные эксперименты были выполнены для структурно неоднородного двухфазного металла, где каждая из фаз имеет свое реологическое уравнение. Установлены закономерности формирования доли вязкой составляющей. Однако наряду с этим было высказано предположение о существовании случайного фактора, вызванного наличием в структуре материала «слабого звена», способного приводить к непредсказуемому снижению ДВСИ из-за пониженных значений предельных деформаций.

Целью данной работы является выявления слабого звена в структуре металла.

Исследование микроструктуры образцов с различным значением ДВСИ. Были исследованы образцы с различными значениями ДВСИ, изготовленные из промышленных полос стали 10Г2ФБ, полученных по технологии контролируемой прокатки.



а



б

Рис. 1. Структура исследуемых образцов:

а – образец с 15 % ДВСИ; б – образец с 92 % ДВСИ. Микроструктура на расстоянии 1/2 толщины образца

Исследовали структуру образцов в трех сечениях по высоте полос (у поверхности, на расстоянии  $\frac{1}{4}$  толщины и в центре). Определяли средний размер зерен, вытянутость зерен и степень изрезанности их границ. На рис. 1 представлены примеры микроструктуры образцов с ДВСИ 15 % и 92 %. Анализ показал, что структура всех образцов является двухфазной и состоит из зерен квазиполигонального феррита и расположенных между ними включений перлита.

Соотношение структурных составляющих измерялось по толщине листа с шагом 2 мм по 4-е точки на сечение. Изменение соотношения структурных составляющих по толщине проката представлены на рис. 2, а. Видно, что характер изменения соотношения перлита и феррита от поверхности к центру в образцах с различным значением ДВСИ существенно отличается. В образцах с низким значением ДВСИ (15 %) наблюдается увеличение доли перлита от 4 до 6 % (по объему, тогда как, в образцах с высоким значением ДВСИ (92 %), количество перлита снижается с 8 до 6,5 %. Было высказано предположение, что подобное различие связано с изменением концентрации неравновесного углерода в феррите, которое могло бы повлиять на величину ДВСИ.

Таблица 1

## Параметры микроструктуры исследованных образцов

ДВСИ	Место определения	Статистический параметр	Размер зерна, мкм	Вытянутость зерен $R$ ,	Изрезанность \ границ $k_{из}$
15%	Поверхность	Среднее значение	4,55	3,34	1,05
		Дисперсия	6,07	1,91	0,002
	¼ толщины	Среднее значение	5,02	3,2	1,05
		Дисперсия	7,35	1,65	0,002
	½ толщины	Среднее значение	5,39	3,24	1,05
		Дисперсия	10,05	1,62	0,002
92%	Поверхность	Среднее значение	3,98	3,13	1,05
		Дисперсия	2,37	1,33	0,002
	¼ толщины	Среднее значение	4,79	3,32	1,05
		Дисперсия	4,96	1,85	0,002
	½ толщины	Среднее значение	4,58	3,37	1,05
		Дисперсия	4,82	1,85	0,002

$R = L/B$ , где  $L$  – длина зерна,  $B$  – ширина;  $k_{из} = L_{из}/L_{спр}$ , где  $L_{из}$  – протяженность изрезанных границ,  $L_{спр}$  – протяженность спрямленных границ

В качестве критерия концентрации неравновесного углерода в феррите была выбрана микротвёрдость феррита. Пошаговое измерение микротвёрдости показало отсутствие каких-либо закономерностей этой характеристики по толщине проката во всех образцах (рис. 2, б). Следовательно, обнаруженные различия не оказывают существенного влияния на свойства материала и не могут являться причиной значительного изменения значений ДВСИ.

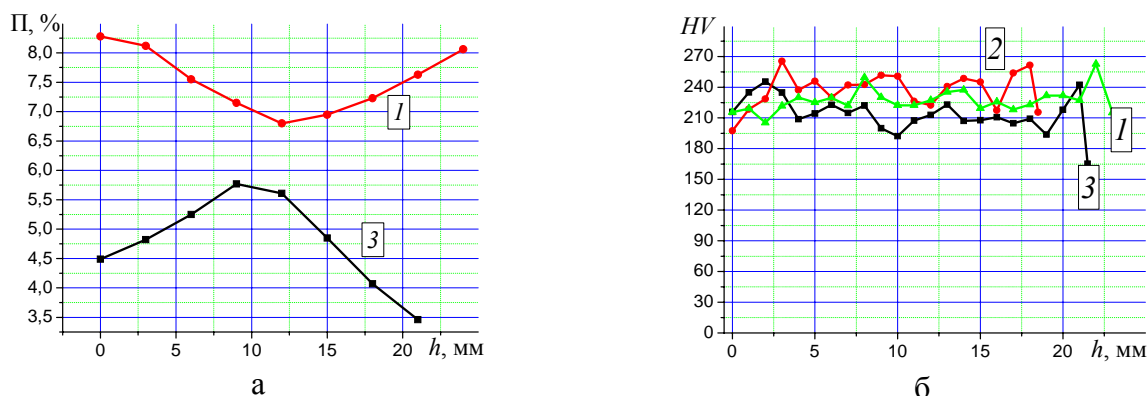


Рис. 2. Изменение количества перлита (а) и распределение микротвёрдости феррита по толщине проката для образцов после ИПГ при различных значениях ДВСИ: 1 – 92 %; 2 – 47 %; 3 – 15 %

Таким образом, образцы, отобранные от полос, изготовленных по одинаковой технологии и близкие по химическому составу, имеют практически идентичную микроструктуру, характер изменения которой по толщине проката также одинаковый. Следовательно, исследованные параметры микроструктуры не могут быть причиной различия доли вязкого разрушения при испытаниях падающим грузом.

Численный эксперимент по влиянию слабого звена и его ориентации в объеме металла при помощи математической модели ИПГ, изложенной в [1] показал, что в наибольшей степени влияние слабого звена проявляется, если оно имеет вытянутость вдоль направления удара и ориентировано поперек плоскости проката. Последующие исследования были направлены на поиски подобных структурных факторов. В результате исследований в литом и деформированном металле были обнаружены структурные элементы в виде протяженных границ, разделяющих значительные объемы металла, рис. 3. Очевидно, формирование подобных границ происходит на стадии кристаллизации заготовки.

На рис. 3, а представлена структура непрерывно-литого металла, протравленная для выявления зерна, а на рис. 3, б – для выявления дендритов. Видно, что первичные границы литого металла представляют собой именно граничные стыки колоний (друз) дендритов, которые кристаллизуются на последней стадии затвердевания металла.

Исследование особенностей деформации металла с первичными границами в литом и деформированном состояниях. Для определения деформационных первичных границ и их участия в процессах разрушения металла был проведен следующий эксперимент. Из литого и горячекатаного металла с различной долей вязкой составляющей (15 и 92 %) были вырезаны плоские образцы с размерами рабочей части  $55 \times 35$  мм. На поверхности образцов была выявлена макроструктура с первичными границами.

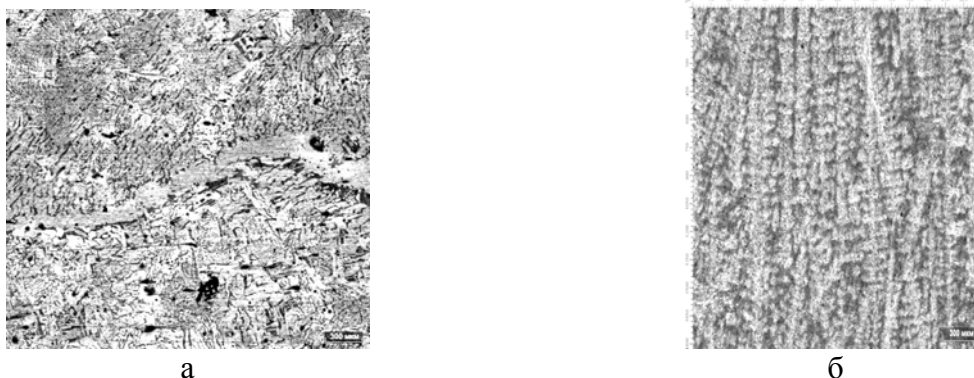


Рис. 3. Первичные границы в литой заготовке:  
а – травление «на структуру»; б – травление «на дендриты»

Затем образцы были помещены в захваты разрывной машины Zwick/Roell и испытаны на растяжение. Было обнаружено, что в тех случаях, когда в образце присутствовали первичные границы, разрушение зарождалось и развивалось именно по этим границам, рис. 4.

Величины истинных напряжений, при которых происходило раскрытие трещины, составили в среднем  $580 \div 620$  МПа. Это значительно меньше, чем напряжения разрушения металла шейки, принятые в качестве предельных деформаций в математической модели разрушения падающим грузом  $\varepsilon_{пред} = 1,2 \div 1,4$  [1], которые соответствуют 100 % вязкой составляющей при ИПГ.

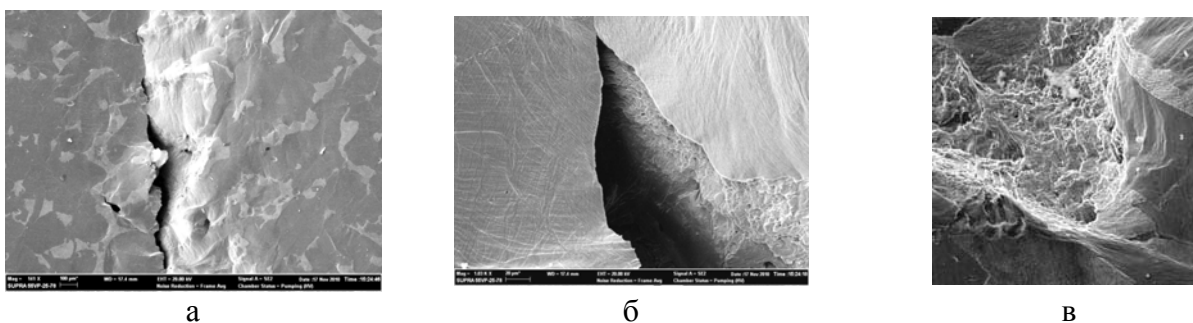


Рис. 4. Развитие (а) и вершина (б) трещины, проходящей по первичной границе; участок трещины с окисной пленой на поверхности (в)

Фрактографический анализ изломов образцов выполнен на сканирующем микроскопе Mira-3 «TESCAN». Установлено (рис. 4, б, в), что в изломе образцов вблизи поверхности присутствуют следы окисных плёнок, которые образовались при кристаллизации на первичных границах и, вероятно, являлись источником зарождения трещины. Методом энергодисперсионного анализа был качественно определён химический состав поверхности трещины (точки 1 и 2) и основного металла (точка 3, рис. 4, в). По результатам анализа, табл. 2, видно, что на поверхности трещины наблюдается повышенное содержание кислорода и алюминия, характерное для окисных плёнок.

Таким образом, характер разрушения образцов, низкая энергия разрушения и наличие окисных плёнок в изломе свидетельствуют, что первичная граница, сформировавшаяся при кристаллизации, действительно является «слабым звеном», играющим негативную роль в процессах разрушения.

Таблица 2

Химический состав стали на поверхности трещины и вблизи нее

Точка	Содержание элементов, масс. %					
	O	Al	Si	Mn	Fe	Итого
1	9,3	1,57	0,62	2,58	85,27	100
2	6,1	0,84	0,57	1,86	90,63	100
3	–	–	0,58	1,95	97,47	100

### ВЫВОДЫ

В результате проведённых исследований образцов с различной долей вязкой составляющей в изломе образцов из сталей близкого химического состава и прокатанных по одной технологии, отобранных после испытаний падающим грузом, установлено следующее:

1. Параметры микроструктуры, механические свойства, твердость и микротвердость структурных составляющих исследованных образцов практически одинаковы и, как следствие, не могут влиять на характер разрушения при испытаниях падающим грузом.

2. Исследования макроструктуры образцов показали, что в образцах, разрушенных хрупко, присутствуют протяженные первичные границы, разделяющие большие объемы металла. Установлено, что эти границы возникают при кристаллизации металла из расплава и ограничивают колонии (друзы) дендритов, которые кристаллизуются на последней стадии затвердевания металла.

3. Образовавшиеся при кристаллизации первичные границы в наибольшей степени обогащены примесными и ликвирующими легирующими элементами и окисной пленкой. Вследствие этого первичные границы практически неподвижны и наследуются металлом как при рекристаллизации, так и при фазовых превращениях.

4. Первичные границы имеют высокую энергию и являются источником возникновения трещины при пластической деформации, в том числе и при испытаниях падающим грузом. При этом предельные напряжения, вызывающие разрушение первичных границ, в 2 и более раз ниже, чем в среднем по металлу.

Таким образом, именно первичные границы, наследуемые горячекатаным металлом от стадий кристаллизации, являются «слабым звеном», определяющим возрастание доли хрупкой составляющей при разрушении падающим грузом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Колбасников Н. Г. Математическое моделирование испытаний сталей падающим грузом и доли вязкой составляющей в изломе / Н. Г. Колбасников, О. Г. Зотов, А. А. Лукьянов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2010. – № 4. – С. 335–341.

2. Компьютерное моделирование ударной вязкости структурно-неоднородных металлов / Рудской А. И., Колбасников Н. Г., Боровков А. И., Немов А. С., Зотов О. Г., Лукьянов А. А. // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. – 2011. – № 117. – С. 226–233.

Колбасников Н. Г. – д-р техн. наук, проф. СПбГПУ;

Зотов О. Г. – канд. техн. наук, доц. СПбГПУ;

Лукьянов А. А. – аспирант СПбГПУ.

СПбГПУ – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: sklv.d.f@gmail.com