

На правах рукописи



**Лукьянов Алексей Александрович**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ  
ПРИ ИСПЫТАНИИ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ**

Специальность 05.16.05 - Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: Колбасников Николай Георгиевич  
доктор технических наук,  
профессор кафедры Технологии и  
Исследования материалов СПбПУ

Официальные оппоненты: Аксенов Леонид Борисович  
доктор технических наук,  
профессор кафедры Машин и Технологии  
обработки металлов давлением СПбПУ

Настич Сергей Юрьевич  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник ЦТСК  
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

Ведущая организация: ОАО «Северсталь Российская Сталь»

Защита состоится «\_\_\_» апреля 2013 г. в 18.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, СПб, Политехническая, 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» марта 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.03

кандидат технических наук



Климова О.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

В настоящее время предъявляются повышенные требования к надёжности современных магистральных газо- и нефтепроводов, которая обеспечивается, в том числе, высокими вязкими характеристиками трубных сталей. Для оценки вязкости разрушения трубных сталей используют испытания на ударную вязкость и испытание падающим грузом (ИПГ) полнотолщинных образцов, при котором в качестве характеристики используется определяемая визуально доля вязкого разрушения в изломе образца (ДВСИ).

Вязкость разрушения характеризуется работой пластической деформации, зарождения и развития трещины. На зависимости истинных напряжений от деформации эта работа зависит от предельных деформаций  $\varepsilon_{\text{пред}}$ , а также от параметров деформационного упрочнения материала, рис. 1. Поскольку параметры деформационного упрочнения и пластичность металлов являются структурно-чувствительными характеристиками, то можно ожидать, что изменение структуры должно приводить к изменению вязкости разрушения, а управление структурой – к управлению вязкостью разрушения. Однако, даже реализация современных методов управления структурой при помощи, например, параметров контролируемой прокатки, не всегда способна обеспечить требуемую вязкость разрушения при ИПГ. Например, толстолистовой прокат из трубной стали одной марки, прокатанный по одной технологии и удовлетворяющий требованиям по механическим свойствам, при ударной вязкости на уровне  $400 \div 450$  Дж/см<sup>2</sup>, должен иметь значения ДВС не менее 90%. Однако в массе прокатанных листов случаются внезапные «срывы» по ДВС до  $15 \div 30\%$  при удовлетворении остальных требований к металлу.

Таким образом, выявление причин непрогнозируемого снижения доли вязкой составляющей в изломе при испытании падающим грузом, а также поиск путей увеличения уровня вязких характеристик и обеспечение их стабильности при изменении технологии прокатки листов для труб большого диаметра является *актуальной задачей*.

### Цель работы и задачи исследования

*Целью работы является исследование процессов пластической деформации и характера разрушения образцов трубных сталей при испытаниях падающим грузом и разработка практических рекомендаций по корректировке технологии изготовления толстого листа со стабильно высокими вязкими характеристиками.*

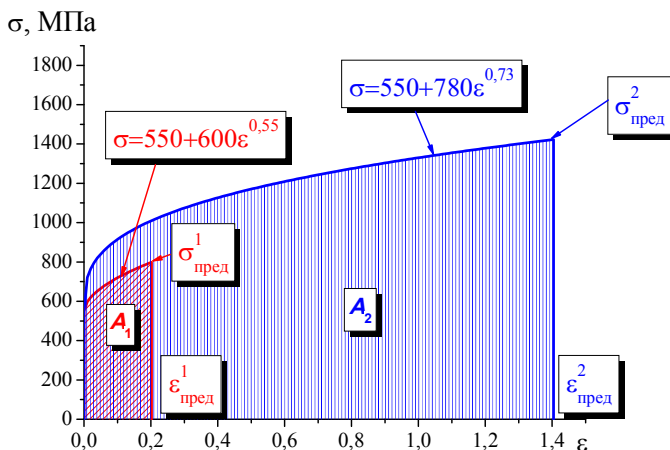


Рис. 1. Зависимости истинных напряжений от истинных деформаций  $\sigma(\epsilon)$ , аппроксимированные степенной функцией  $\sigma = \sigma_0 + \alpha\epsilon^\beta$  с различными значениями коэффициентов упрочнения  $\alpha$  и  $\beta$  ( $A_1$  – работа пластической деформации и разрушения малопластичного материала;  $A_2$  – работа пластической деформации и разрушения пластичного материала;  $\epsilon_{\text{пред}}$  – предельные деформации;  $\sigma_{\text{пред}}$  – предельные напряжения)

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Исследование структурных факторов, определяющих пластичность и вязкость разрушения при ИПГ образцов из трубной стали 10Г2ФБ, прокатанной по технологии контролируемой прокатки.
2. Разработка математической модели пластической деформации и разрушения, а также расчетного метода оценки доли вязкой составляющей при испытании падающим грузом для проведения масштабного численного эксперимента по определению основных факторов, отвечающих за характер вязкого или хрупкого разрушения при ИПГ.
3. Определение возможных причин снижения доли вязкой составляющей в изломе образцов после ИПГ и разработка критериев для поиска элементов структуры, отвечающих за резкое снижение ДВСИ при удовлетворительных механических свойствах, при помощи разработанной модели испытаний на ударный изгиб.
4. Целенаправленный поиск структурных элементов, способных

вызвать резкое снижение ДВСИ.

5. Разработка практических рекомендаций по коррективке технологии изготовления толстого листа для устранения или снижения его выбраковки по результатам испытания падающим грузом.

### **Научная новизна**

При выполнении работы получены результаты, отличающиеся *научной новизной*, в том числе:

1. Разработаны математическая модель пластической деформации и разрушения металла при испытании падающим грузом, а также новая методика оценки доли вязкой составляющей с использованием результатов математического моделирования.
2. Установлено, что величина истинных деформаций в шейке образца из трубной стали при растяжении практически не зависит от скорости испытания в диапазоне скоростей  $10^{-4}$ – $10$  м/с, что позволяет использовать предельные деформации и напряжения, определенные при статических испытаниях, в качестве критерия разрушения в математической модели испытания падающим грузом.
3. Обоснованы критерии, которым должны удовлетворять структурные элементы, способные привести к резкому и непрогнозируемому снижению ДВСИ:
  - находиться в очаге пластической деформации и разрушения образца при испытании падающим грузом;
  - находиться в плоскости, поперечной плоскости листа, и быть ориентированы вдоль направления удара падающего груза;
  - иметь низкие значения предельной деформации  $\epsilon_{\text{пред}}$ ;
  - общий линейный размер данного структурного элемента должен превышать критические значения, зависящие от величины  $\epsilon_{\text{пред}}$ .
4. Показано, что разработанным критериям в структуре трубных сталей удовлетворяют выделения несмачиваемых включений, например, оксидной плены, расположенных на границах первичных зерен, формирующихся при кристаллизации из жидкого состояния.
5. Установлено, что границы первичных зерен с расположенными на них оксидными пленками имеют наследственный характер и частично или полностью сохраняются в горячекатаном металле.

## **Практическая значимость**

Разработана методика выявления границ первичных зерен для горячекатаной трубной стали, которая позволяет проследить их трансформацию во время прокатки и определить рациональную схему вытяжек для минимизации негативного влияния на пластичность стали при ИПГ.

Выявлена одна из основных причин непрогнозируемого снижения вязкости разрушения при ИПГ, которая состоит в возможности присутствия в очаге деформации (при ИПГ) дефекта в виде границы первичного зерна с расположенными на ней несмачиваемыми включениями, протяженность которых превышает критические значения.

Предложено повышение продольных вытяжек при горячей прокатке, которое может снизить вероятность выбросов по доле вязкой составляющей.

Помимо этого рекомендуется проводить дополнительные мероприятия по очистке металла от несмачиваемых включений, в т.ч. от оксидных плен, способные привести к повышению стабильности результатов испытаний падающим грузом и обеспечить высокие значения ДВСИ.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель пластической деформации и разрушения многофазного материала при испытании падающим грузом и разработанная на её основе методика оценки доли вязкой составляющей в изломе.
2. Критерии, которым должны удовлетворять структурные элементы, способные вызвать резкое снижение вязкости разрушения.
3. Наследственный характер границ первичных зерен в деформированном металле.

### **Апробация работы**

Основные положения работы доложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях «Современные металлические материалы и технологии», СПб, 2009, 2011 гг.; Всероссийских межвузовских конференциях студентов и аспирантов в рамках XXXVI - XXXVIII Недель науки СПбГПУ в 2007, 2011 гг.; Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 2009 г.; IX Международная научно-техническая

конференция «Пластическая деформация материалов», Днепропетровск, Национальная металлургическая академия Украины, 2011.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в т.ч. 5 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 150 наименований; изложена на 168 страницах машинописного текста, содержит 115 рисунков и 24 таблицы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** раскрыта актуальность и обоснована цель проведенных исследований, сформулированы задачи, научная новизна и практическое значение диссертационной работы.

В **первой главе** рассматривается современное состояние вопроса влияния химического состава и параметров контролируемой прокатки на вязкость разрушения низколегированных трубных сталей и обосновывается выбор направления исследований.

Показано, что большинство выполненных работ по исследованию вязкости разрушения посвящено исследованию закономерностей влияния структурных факторов на эту характеристику. Отмечается, что в настоящее время к горячекатаному листу из сталей для магистральных трубопроводов предъявляются очень высокие требования, как по механическим свойствам, так и по характеристикам вязкости разрушения – ударной вязкости и доли вязкой составляющей в изломе. Основные российские и зарубежные производители толстого листа и труб большого диаметра достигли высоких показателей по вязкости разрушения, однако стабильность вязких характеристик достигается не всегда. В ряде случаев на фоне удовлетворительных свойств нескольких партий листов из нескольких плавок случаются непрогнозируемые выбросы по доле вязкой составляющей в изломе или величине ударной вязкости.

При анализе выполненных работ показано, что эти выбросы носят случайный характер. Доля вязкой составляющей является функцией, зависящей от множества взаимосвязанных факторов, а в силу влияния дополнительных случайных факторов не поддается статистическому анализу и описанию при помощи множественных регрессий.

Во **второй главе** диссертации выполнен анализ микроструктуры образцов, показавших различное значение вязкости разрушения, для которых ДВСИ составила 15, 47 и 92%. Материал исследованных

образцов – сталь 10Г2ФБ, механические свойства образцов представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

**Свойства образцов стали 10Г2ФБ**

ДВСИ, %	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T/\sigma_B$	$\delta$ , %	$HV$ , кгс/мм <sup>2</sup>
15	510	608	0,89	18	236
47	540	606	0,89	20	235
92	528	610	0,89	19	205

Металлографический анализ выполняли на образцах, вырезанных в поперечном и продольном направлениях относительно направления прокатки минимум в трех сечениях (вблизи поверхности, а также на расстоянии 1/4 и 1/2 толщины полосы). Рассматривали такие параметры структуры, как средний размер зерен, фактор формы зерен (вытянутость зерен:  $R = L/B$ , где  $L$  – длина зерна,  $B$  – ширина) и степень изрезанности межзеренных границ ( $k_{из} = L_{из}/L_{спр}$ , где  $L_{из}$  – протяженность изрезанных границ,  $L_{спр}$  – протяженность спрямленных границ).

Анализ микроструктуры, выполненный с использованием анализатора изображений *Thixomet PRO*, показал, что структура всех исследованных образцов состоит из феррита, перлита и бейнита глобулярной и реечной морфологии вытянутых вдоль направления прокатки. Наибольшее содержание бейнита обнаружено в центральной части образцов, что может быть связано с неравномерным распределением легирующих и микролегирующих элементов по толщине листа. Размер зерен феррита увеличивается от поверхности к центральной части образца и мало отличается в образцах с различным значением ДВСИ.

Были исследованы численные характеристики структуры и дисперсии их распределения, в том числе размера зерна, анизотропии размера зерна, изрезанности границ. Выполнены измерения микротвердости феррита, твердости, соотношений структурных составляющих, остаточных напряжений I-го рода в образцах с различной долей вязкой составляющей. Анализ результатов исследования показал, что все изученные факторы для образцов с разным значением ДВСИ отличаются незначительно, *а выявленные различия в структуре не могут служить однозначной причиной резкого перехода от вязкого к хрупкому разрушению.*

Поскольку анализ структурных факторов не позволил обнаружить явного фактора, ответственного за внезапные выбросы по ДВСИ, для



расширения возможностей поиска закономерностей и случайностей изменения вязкости разрушения при ИПГ было решено использовать возможности математического моделирования.

В **третьей главе** разработана конечно-элементная математическая модель испытания падающим грузом. Для этого использовали лицензионный программный пакет *ANSYS/LS-DYNA*, предназначенный для решения динамических задач.

Трехмерная конечно-элементная модель, рис. 2 состоит из 117 660 8-узловых элементов и имеет 397 749 степеней свободы. В качестве начальных условий моделирования задаются следующие параметры: деформационная кривая нагружения  $\sigma = \sigma_{t0} + \alpha \varepsilon^\beta$ , предел текучести  $\sigma_t$ , модуль Юнга, коэффициент Пуассона, критерий разрушения.

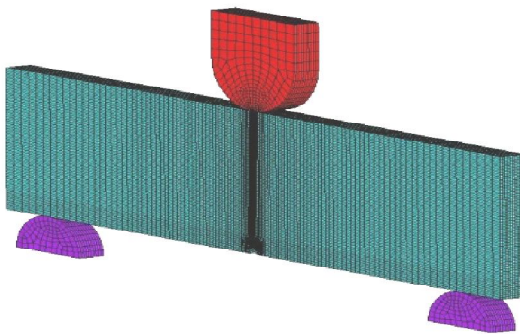


Рис. 2. Конечно-элементная сетка для моделирования испытаний падающим грузом

При моделировании процессов пластической деформации, сопровождающихся разрушением, важным является правильный выбор критерия разрушения. В качестве этого критерия были приняты истинные деформации, действующие в шейке образцов при сиаимческом растяжении непосредственно перед разрушением  $\varepsilon_{\text{пред}} = -\ln(1-\psi)$  и соответствующие им напряжения  $\sigma_{\text{пред}}$ . Однако, скорость деформирования при ИПГ значительно превосходит скорость стандартных статических испытаний на растяжение. Вследствие этого для определения влияния скорости деформации на  $\varepsilon_{\text{пред}}$  были проведены испытания на термомеханическом симуляторе *Gleeble-3800* со скоростями деформации от  $10^{-4}$  до 2 м/с и на высокоскоростной испытательной машине *HTM-100* фирмы *Zwick/Roell* со скоростями до 10 м/с. Испытания показали, что истинные деформации в шейке при

растяжении образцов в исследованном диапазоне скоростей остаются практически постоянной величиной, рис. 3. Это подтвердило возможность использования степени деформации  $\varepsilon_{\text{пред}} = -\ln(1-\psi)$  и напряжения  $\sigma_{\text{пред}}$ , определяемых при статических испытаниях, в качестве критерия разрушения в математической модели ИПГ.

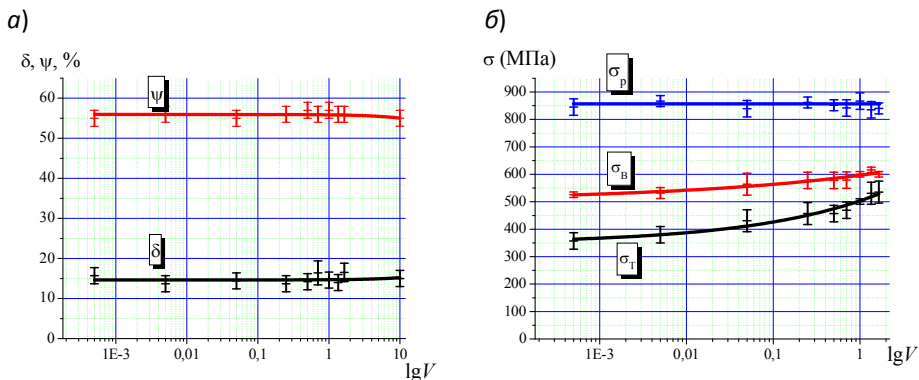


Рис. 3. Результаты испытаний на растяжение при различных скоростях:  
 а – зависимость пластических свойств; б – зависимость прочностных свойств;  
 $\sigma_T$  – предел текучести;  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\sigma_P$  – истинное напряжение разрыва

Для определения доли вязкой составляющей при помощи метода конечных элементов предстояло решить принципиально новую задачу – описание визуальной характеристики поверхности разрушения методами механики сплошной среды. Решение состоит в том, что на поверхности образца, образованной при разрушении, определяется деформация каждого конечного элемента, предшествующая разрушению. При помощи подпрограммы, встроенной в *ANSYS/Ls-DYNA*, строится гистограмма распределения поверхностных элементов по степеням деформации, рис.4. Если принять, что хрупким является разрушение со степенью деформации  $\varepsilon \leq 2\%$ , то величина доли вязкой составляющей в изломе может быть определена при помощи интеграла

$$\text{ДВСИ} (\%) = \int_{0,02}^{\varepsilon_{\text{пред}}} f(\varepsilon) d\varepsilon (\times 100\%), \quad (1)$$

где  $f(\varepsilon)$  – плотность распределения элементов по деформациям.

Разработанная математическая модель ИПГ была протестирована на соответствие экспериментальным данным. Во-первых, характерные признаки разрушения металла при ИПГ, такие как форма поверхности разрушения, деформация участков образца, соприкасающихся с опорами,

образование вмятин, утяжка образца, а также образование мелких частиц, отлетающих от образца, воспроизводятся при численных экспериментах.

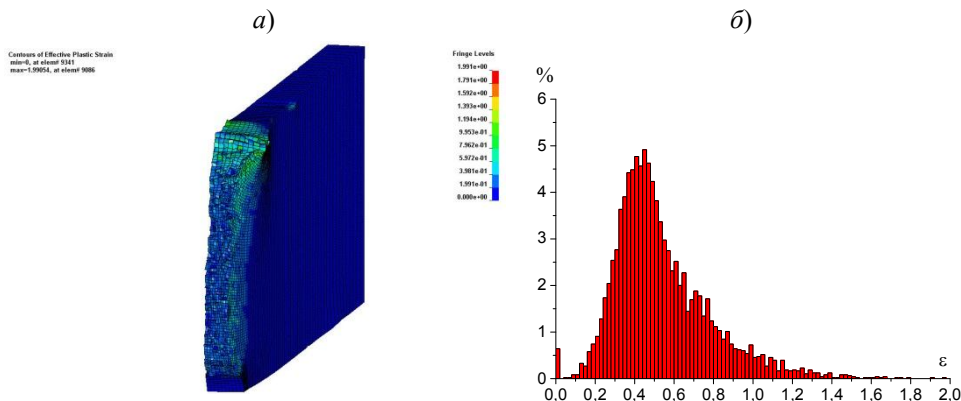


Рис. 4. Методика оценки ДВСИ по результатам моделирования: *а* – поверхность разрушения образца после ИПГ; *б* – характерная гистограмма распределения поверхностных элементов по деформациям после разрушения образца

Во-вторых, расчетная зависимость ДВСИ от предела текучести для образцов с одинаковой интенсивностью деформационного упрочнения (рис. 5) имеет идентичный характер с кривой ДВСИ ( $\sigma_T$ ), полученной по результатам статистического анализа заводских данных, рис. 6.

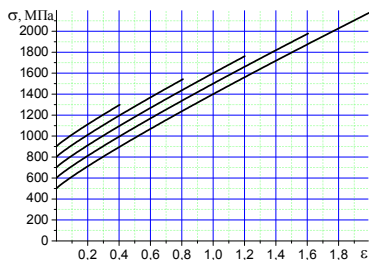


Рис. 5. Кривые растяжения для тестирования решения задачи о влиянии предела текучести на ДВСИ

под кривой за счет изменения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  приводит к возрастанию ДВСИ.

Таким образом, тестирование разработанной математической модели ИПГ и определения доли вязкой составляющей показало, что они

отражают основные закономерности изменения вязкости разрушения. Это определило принятие решения об использовании разработанных моделей для проведения численного эксперимента по поиску причин непрогнозируемого снижения ДВСИ.

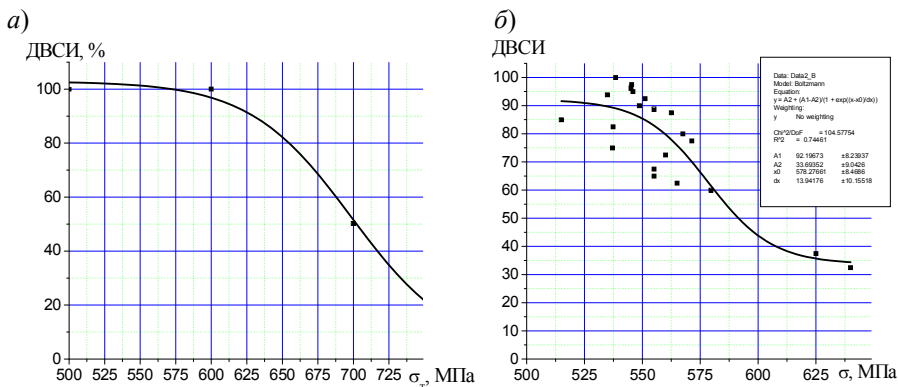


Рис. 6. Сравнение результатов компьютерного эксперимента с результатами статистического анализа промышленных полос: *a* – результаты эксперимента; *б* – результаты статистического анализа экспериментальных данных

При проведении дальнейших исследований с использованием математической модели ИПГ и методики определения ДВСИ учитывали следующие положения:

- поскольку современные трубные стали являются в основном двухфазными (ферритно-перлитными, ферритно-бейнитными или состоят из смеси бейнита различной морфологии), то в качестве деформируемой среды принимали двухфазный материал, состоящий из пластичной матрицы и более прочных включений;
- свойства отдельных модельных структурных составляющих задавали зависимостью истинных напряжений от деформаций: для основной структурной составляющей (матрица – квазиполигональный феррит)  $\sigma(\epsilon) = 500 + 900 \cdot \epsilon^{0.9}$ , для второй структурной составляющей (включения перлита)  $\sigma(\epsilon) = 714 + 1940 \cdot \epsilon^{0.8}$ . Предельные деформации: для матрицы  $\epsilon_{\text{пред}} = 1,6$ , для перлита  $\epsilon_{\text{пред}} = 0,29$ . Аналогично могут быть заданы уравнения для любой структурной составляющей.

Было выполнено несколько численных экспериментов, в том числе:

Исследование влияния фазового состава стали. Задавали различное содержание включений второй фазы в материале – от 0 до 40%. На рис. 7 представлена расчетная схема испытаний падающим грузом стали,

содержащей 10% и 40% включений. Распределение второй фазы задавали методом Монте-Карло.

Исследования показали, что увеличение доли включений второй структурной составляющей приводит к снижению ДВСИ, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными. Таким образом, для повышения и стабилизации ДВСИ при ИПГ содержание второй малопластичной структурной составляющей необходимо снижать, что соответствует современной тенденции развития трубных сталей, для которых содержание перлита минимизируют.

Исследование влияния свойств отдельных структурных составляющих. Поскольку в исследуемой стали содержание перлитной или бейнитной структур не превышает 10%, то для расчетов использовали модель материала, представленную на рис. 7,а. Задавали уравнения  $\sigma(\epsilon)$  для матрицы и включений, приведенные ранее, а изменяли величину предельных деформаций и напряжений.

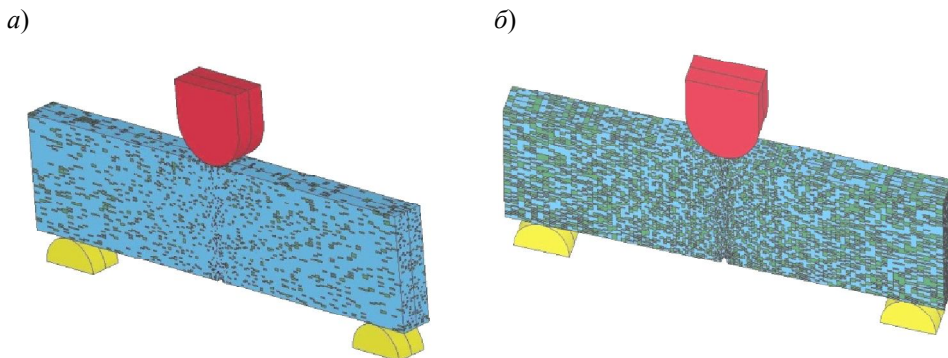


Рис. 7. Расчетная конечноэлементная модель двухфазного материала, содержащего 10 % (а) и 40 % (б) перлита

Как видно по рис. 8, при небольшом содержании включений второй фазы определяющее влияние на ДВСИ оказывают предельные деформации матрицы (феррита), которые, согласно экспериментальным данным, для современных трубных сталей составляют  $\epsilon_{\text{пред}} = -\ln(1-\psi) = 1,2 \div 1,5$ . Редко встречаются образцы, имеющие  $\psi = 95\%$  и  $\epsilon_{\text{пред}} \approx 3$ . Однако уменьшение предельных деформаций до значений  $\epsilon_{\text{пред}} < 1$  может привести к резкому снижению ДВСИ. Аналогичные результаты наблюдаются и для современных бейнитных сталей.

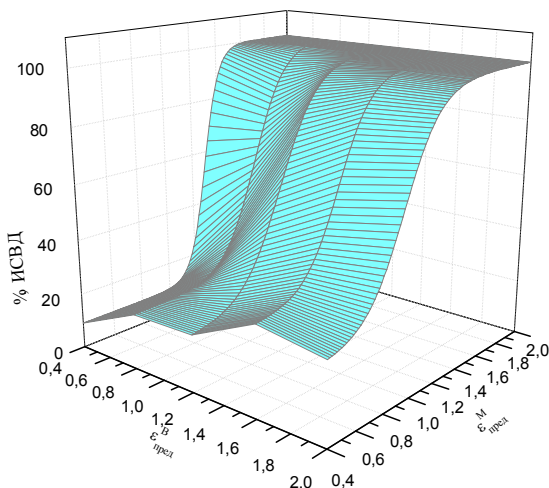


Рис. 8. Влияние предельных деформаций отдельных структурных составляющих на ДВСИ

Как известно, пластичность основной фазы – например, феррита, определяется как химическим составом, так и параметрами обработки. Пластические свойства феррита как полигонального, так и квазиполигонального, в современных микролегированных трубных сталях, являются высокими и стабильными. Таким образом, маловероятно, что при достаточно стабильной технологии контролируемой прокатки может произойти непрогнозируемое снижение пластичности феррита  $\epsilon_{\text{пред}}^{\Phi}$ , которое может вызвать провал по ДВСИ.

Таким образом, выполненные компьютерные эксперименты подтвердили закономерности изменения вязкой составляющей, но не показали причин непрогнозируемого снижения ДВСИ. Из полученных результатов следует отметить возможность резкого снижения ДВСИ при уменьшении предельной деформации  $\epsilon_{\text{пред}}$ . Это позволяет ввести в рассмотрение некий элемент структуры, обладающий малыми предельными деформациями – «слабое звено».

**В четвертой главе** проведен анализ непрогнозируемого снижения ДВСИ, обусловленного наличием в структуре стали структурного элемента – «слабого звена», которое характеризуются низкими значениями предельных деформаций. В качестве объекта исследования был принят двухфазный материал, в котором вторая фаза имеет низкие предельные деформации, например  $\epsilon_{\text{пред}} = 0,02$ , и более высокий, чем у основного материала, предел текучести.

На первом этапе анализировали влияние «слабого звена» на ДВСИ, расположенного в плоскости листа. Предполагали, что такие дефекты, как перлитная полосчатость или зональная ликвация могут иметь низкие

предельные деформации. Зональную ликвацию задавали в виде сплошной полосы, проходящей по центральной части образца, а перлитную полосчатость – в виде случайно распределенных по образцу конечных элементов, имеющих  $\varepsilon_{\text{пред}} = 0,02$ , рис.9.

Результаты расчета показали, что «слабое звено» в виде сплошной полосы или фрагментарно разбросанных выделений, расположенных в плоскости листа, практически не влияет на ДВСИ независимо от своей формы и размеров, но может привести к образованию такого дефекта, как расслой, который часто обнаруживают на поверхности разрушения. Расслой встречается на образцах для ИПГ из стали, прокатанной по технологии контролируемой прокатки.

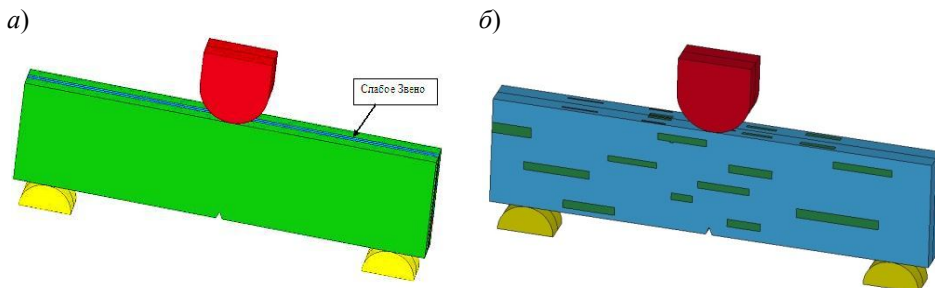


Рис. 9. Трехмерная конечно-элементная сетка: *а* – «слабое звено» в виде зональной ликвации – сплошной полосы; *б* – «слабое звено» в виде перлитной полосчатости – локальных выделений в плоскости листа

На следующем этапе было проведено исследование влияния произвольной ориентации «слабого звена» в объеме образца. Результаты численного эксперимента по влиянию ориентации и размеров «слабого звена» (СЗ) на ДВСИ при ИПГ показали, что резкое снижение вязкости разрушения наблюдается при выполнении следующих условий:

- СЗ должно располагаться в области деформации и разрушения при ИПГ
- СЗ располагается поперек плоскости листа;
- СЗ ориентировано в направлении удара падающим грузом;
- общий размер СЗ превышает критические значения, зависящие от его предельных деформаций.

Если принять для «слабого звена»  $\varepsilon_{\text{пред}}^{\text{СЗ}} = 0,02$  (хрупкий материал), то его общая критическая длина при ширине испытуемого образца 75 мм составляет 3,5 мм, рис. 10.

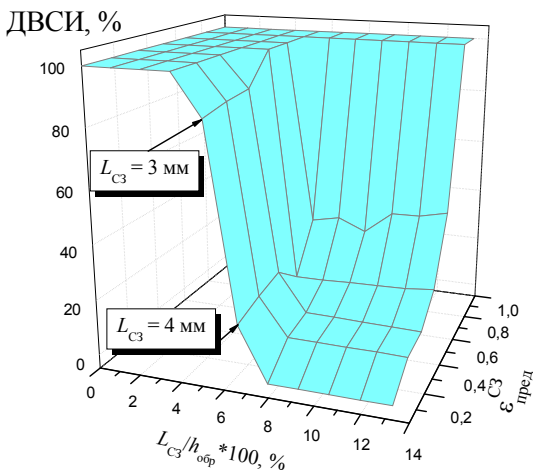


Рис. 10. Зависимость ДВСИ от безразмерной длины слабого звена ( $L_{сз}$  – длина слабого звена;  $h$  – высота образца для ИПГ) и его предельных деформаций

формирующиеся при кристаллизации из расплава. Фрагменты первичных зерен в литом металле могут быть ориентированы поперек плоскости литой заготовки в направлении удара падающим грузом. Эти границы в силу особенностей кристаллизации могут быть обогащены примесными и легирующими элементами, на них возможно присутствие неметаллических включений и других дефектов, в том числе пор и оксидной пленки.

В работе выполнен эксперимент по определению пластичности литого металла с предварительно выявленной структурой при одновременной видеозаписи деформации образца. Показано, что в случае расположения границ первичных зерен поперек оси растяжения, трещины зарождаются и распространяются именно по этим границам, на которых методом энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа было обнаружено присутствие оксидной пленки. Предельные деформации в этом случае оказались низкими:  $\epsilon_{пред} < 5\%$ , что в 5 раз меньше, чем в случае продольного расположения подобных границ относительно оси растяжения.

Таким образом, было показано, что в литом материале границы первичных зерен могут служить причиной снижения ДВСИ при ИПГ. Но поскольку ИПГ проводят на горячекатаном металле, необходимо было

Таким образом, выполненный численный эксперимент позволил сформулировать критерии, которым должно удовлетворять «слабое звено», способное привести к резкому снижению ДВСИ. Это позволило сориентировать вектор поиска этого элемента структуры.

Анализ структурных элементов, удовлетворяющих по масштабному фактору признакам «слабого звена», показал, что в этом качестве могут выступать границы первичных зерен,



подтвердить наличие первичных границ в готовом штрипсе.

Принято считать, что при горячей деформации первичные границы аустенита не сохраняются ввиду того, что на них образуются зародыши рекристаллизации, которые растут равновероятно по всем направлениям, поглощая исходную границу. Аналогичные процессы, связанные с образованием зародышей новой фазы и последующим их ростом, происходят при ферритном превращении. Таким образом, многократная рекристаллизация и фазовые превращения должны приводить к исчезновению границ первичных зерен.

Однако образовавшиеся при кристаллизации границы первичных зерен обогащены примесными и легирующими элементами, повышенная концентрация которых сохраняется при нагреве под прокатку, что обуславливает диффузионную неподвижность границ за счет эффекта «примесного торможения». По этой причине границы первичных зерен, предположительно, должны сохраняться при рекристаллизации и фазовых превращениях.

Для подтверждения высказанного предположения была разработана новая двухступенчатая методика травления сталей для выявления исходных границ зерен, формирующихся при кристаллизации расплава, применимая как к литому, так и к горячекатаному металлу, макроструктура которого представлена на рис. 11.

Выявление границ первичных зерен в горячекатаном металле, см. рис. 11,б, обеспечило возможность проведения эксперимента по влиянию границ первичных зерен на пластичность горячекатаного металла, выполненный ранее для литого. Показано, что при деформации горячекатаных образцов с низким значением

ДВСИ пластичность приблизительно в 5 раз ниже по сравнению с образцами, имеющим высокое значение ДВСИ, и составляет в среднем лишь 2%. Разрушение в образцах с высоким значением ДВСИ происходит по телу зерна, а в образцах с низким ДВСИ – по границам первичных зерен. В образцах с низким значением ДВСИ на этих границах методом энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа также была выявлена оксидная плена, как и в литом металле,

Т а б л и ц а 2

**Химический состав стали на поверхности трещины и вблизи нее**

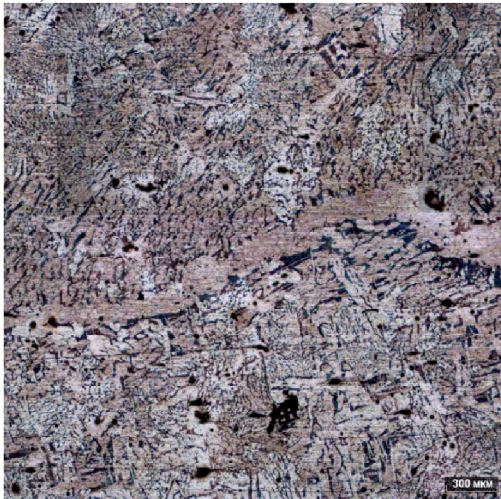
Точка	Содержание элементов, масс. %					
	O	Al	Si	Mn	Fe	Итог
1	0,75	1,08	1,3	1,72	95,15	100
2	0	0	0,44	1,83	97,73	100

явившаяся источником зарождения трещин, см. рис. 11,з, табл. 2.

а)



б)



в)



г)

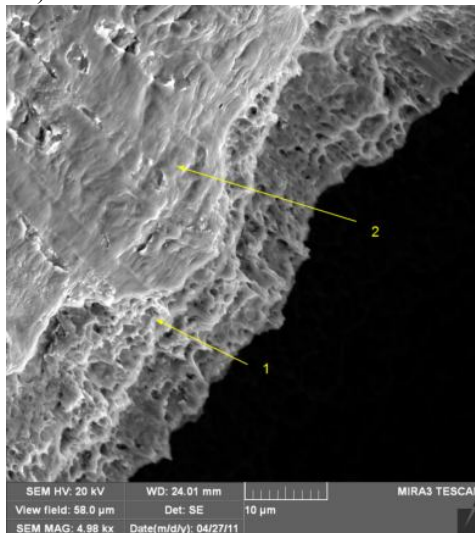


Рис. 11. Границы первичного зерна в литом слябе, протравленном по новой методике (а), протравленном на микроструктуру (б), в горячекатаном толстом листе (в); очаг зарождения трещины на первичной границе с оксидной пленой (г)

Следует особо отметить, что оксидная пленка, представляющая собой преимущественно оксиды алюминия и кремния, не смачивается железом, и, таким образом, представляет собой плоскую трещину,

поскольку поверхностная энергия границы раздела «металл-оксид» практически равна энергии свободной поверхности. В этом случае можно считать, что присутствие оксидных плен ослабляет границу первичного зерна аналогично острым трещинам и может являться источником хрупкого разрушения, значительно снижения ДВСИ.

Разработанная методика выявления границ первичных зерен в горячедеформированном металле позволила, также, выполнить эксперимент по исследованию изменения формы первичных зерен и ориентации их границ во время горячей прокатки. Прокатку выполняли на лабораторном стане при температуре 1200 °С с промежуточными подогревами от толщины 30 мм до конечного размера 1 мм. Суммарная логарифмическая деформация составила  $\varepsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) = 3,4$ , что приблизительно соответствует вытяжкам при прокатке толстого листа для изготовления труб большого диаметра на стане 5000.

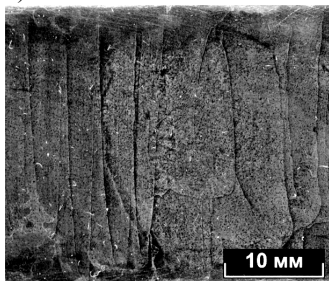
Было обнаружено, что первичные границы сохраняются вплоть до конечного размера прокатанного металла. При прокатке первичные зерна изменяют свою форму, вытягиваются в направлении вытяжки, рис. 12. Одновременно с изменением формы зерен изменяется также ориентация первичных границ с расположенными на них дефектами в виде оксидных плен, см. рис. 12,в,г. *Часть включений оксидной пленки переходит в плоскость листа и не может оказывать негативного влияния на вязкость разрушения (2 и 3 на рис. 12,г).* Это было показано ранее.

Другая часть первичных границ с выделениями оксидной пленки остаются в поперечной плоскости листа после прокатки, и могут быть ориентированы вдоль удара падающим грузом (4 и 5 на рис. 12,г). Для них можно предложить следующую схему влияния на вязкость разрушения: предполагая, что оксидные пленки, расположенные на первичных границах, являются недеформируемыми и сохраняются при прокатке, изменение направленности первичных границ и увеличение их длины в сторону вытяжки должно приводить к возрастанию промежутков между включениями оксидных плен; это в свою очередь *приводит к снижению вероятности попадания «слабого звена» в зону деформации и разрушения образца при ИПГ.*

Таким образом, для получения материала со стабильно высокими вязкими характеристиками при ИПГ требуется повышение вытяжки металла в продольном направлении. Кроме того, введение дополнительных технологических операций по очистке металла от несмачиваемых включений, отсортировка металла с повышенным уровнем несмачиваемых включений при производстве толстолистового

проката, полученного из непрерывно-литого сляба должны снизить провалы по вязким характеристикам при ИПГ.

а)



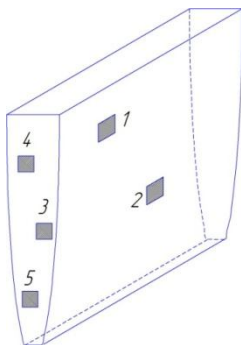
б)



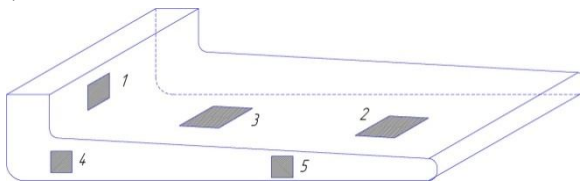
Форма первичного зерна в  
литой заготовке

Форма первичного зерна  
после прокатки,  $\epsilon = 64\%$

в)



г)



Направление прокатки



— оксидная пленка на границах первичного зерна

Рис. 12. Возможные изменения формы первичного зерна и расположения оксидных плен по границам при прокатке: а, б – первичная макроструктура литого и горячедеформированного металла; в, г – схема ориентации первичных границ с расположенными на них неметаллическими включениями

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. При помощи экспериментального и математического анализа установлена одна из основных причин резкого и непрогнозируемого снижения пластичности трубных сталей при испытании падающим грузом – наличие структурных элементов в виде несмачиваемых включений на границах первичных зерен. Разработаны технологические рекомендации для повышения стабильности вязких характеристик, полученных при испытании на ударный изгиб.

2. Разработаны конечно-элементная математическая модель пластической деформации и разрушения металла при испытании падающим грузом и метод оценки доли вязкой составляющей в изломе позволившие по результатам математического моделирования выявить закономерности изменения ДВСИ от предельных деформаций, предела текучести, параметров упрочнения, свойств отдельных структурных составляющих материала. Показано, что ДВСИ высокопрочных трубных сталей определяется свойствами основной (матричной) фазы.

3. Показано, что истинные деформации при испытаниях трубных сталей на растяжение не зависят от скорости деформирования в пределах от  $10^{-4}$  до 10 м/с. Это позволяет использовать предельные деформации и напряжения, соответствующие моменту разрушения при статических испытаниях, в качестве критериев разрушения для математической модели испытаний падающим грузом.

4. Дефекты, расположенные в плоскости листа, не оказывают существенного влияния на вязкость разрушения при ИПГ. Резкое снижение доли вязкой составляющей может происходить в том случае, если в очаге деформации и разрушения при ИПГ присутствует структурный элемент («слабое звено»), который обладает следующими свойствами:

- располагается поперек плоскости листа и ориентирован вдоль направления удара падающего груза;
- общий размер вдоль направления удара превышает критические значения, зависящие от его предельных деформаций.

5. Сформулированным требованиям к «слабому звену» удовлетворяют границы первичных зерен с выделениями несмачиваемых включений, формирующиеся при кристаллизации металла из расплава. Эти границы обогащены легирующими и примесными элементами, неметаллическими включениями и являются диффузионно неподвижными вследствие эффекта «примесного торможения»; они характеризуются пониженной пластичностью и обладают наследственным характером, сохраняясь при многократной рекристаллизации во время горячей прокатки и фазовых превращениях.

6. Горячая прокатка и увеличение суммарной вытяжки при производстве толстого листа приводят к изменению формы первичных зерен и увеличению протяженности первичных границ. При возрастании вытяжки расстояние между выделениями оксидной плены увеличивается, что снижает вероятность попадания «слабого звена» в зону деформации и разрушения образца при испытании падающим грузом. При изменении формы первичных зерен часть выделений

оксидной пленки – «слабого звена» переходит в плоскость листа и не оказывает влияния на снижение вязкости разрушения

7. Практическими методами борьбы с прогнозируемым снижением доли вязкой составляющей в изломе могут быть

- дополнительные меры по очистке металла от несмачиваемых включений, в т.ч. от оксидных плен;
- перемешивание расплава для получения равномерного распределения химических элементов по объему металла с целью очистки исходных границ зерен от избытка легирующих и примесных элементов;
- модифицирование расплава для измельчения литой структуры, что должно обеспечить более благоприятное расположение первичных границ зерен и расположенных на них несмачиваемых включений;
- увеличение вытяжек при горячей прокатке, что увеличит расстояние между отдельными несмачиваемыми включениями и снизит вероятность их попадания в область деформации и разрушения образца при испытании падающим грузом.

**Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях**

1. Лукьянов А.А., Колбасников Н.Г. Расчет температурной зависимости ударной вязкости//Материалы Всероссийской межвузовской конференции студентов и аспирантов 26-1 дек. 2007. С. 139-141.
2. Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А. Исследование причин формирования вязкого и хрупкого излома при испытаниях трубных сталей падающим грузом//VIII конференция молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИКМ «Прометей». Тезисы докладов 22–23 июня 2009. С. 12–13
3. Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А. Исследование причин формирования вязкого и хрупкого излома при испытаниях трубных сталей падающим грузом//Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии» СММТ'09, СПб, 2009. С. 507-508
4. Колбасников Н.Г., Боровков А.И., Немов А.С., Лукьянов А.А., Величко А.А. Математическое моделирование вязкой и хрупкой составляющих поверхности разрушения при испытании металлов падающим грузом//Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии» СММТ'09, СПб, 2009. С. 498-505

5. Колбасников Н.Г., Боровков А.И., Зотов О.Г., Немов А.С., Лукьянов А.А. Компьютерное моделирование и металлографический анализ вязкого и хрупкого излома при испытаниях трубных сталей падающим грузом//Сборник материалов третьей международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN'09 Т.2, Москва, 2009. С. 330-331
6. Колбасников Н.Г., Боровков А.И., Немов А.С., Лукьянов А.А. Компьютерное моделирование испытаний на ударную вязкость//Сборник материалов третьей международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN'09 Т.2, Москва, 2009. С. 332-333
7. Рудской А.И., Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А. Компьютерное моделирование испытаний на ударную вязкость. Температурная зависимость ударной вязкости//Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 4, СПб, 2010. С. 271-278.
8. Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А. Математическое моделирование испытаний сталей падающим грузом и доли вязкой составляющей в изломе//Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 4, СПб, 2010. С. 335-341.
9. Рудской А.И., Колбасников Н.Г., Боровков А.И., Немов А.С., Зотов О.Г., Лукьянов А.А. Компьютерное моделирование ударной вязкости структурно-неоднородных металлов//Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 1, СПб, 2011. С. 226-234.
10. Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А., Соколов Д.Ф., Адигамов Р.Р. Регрессионная модель ударной вязкости//Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 1, СПб, 2011. С. 262-268.
11. Лукьянов А.А., Колбасников Н.Г. Математическое моделирование испытаний сталей падающим грузом//XXXIX международная научно-практическая конференция «неделя науки СПбГПУ». Материалы докладов. СПб, 2011. С. 131-133.
12. Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А. Математическое моделирование влияния свойств структурно-неоднородных материалов на характеристики разрушения при испытаниях падающим грузом//Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии» СММТ'11, СПб, 2011. С. 38-40.
13. Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А. Исследование влияния структурных особенностей материала на характеристики разрушения при испытании падающим грузом//Международная научно-техническая конференция «Современные металлические материалы и технологии»

СММТ'11, СПб, 2011, С. 198-200.

14. Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А. Исследование влияния структурных особенностей материала на характеристики разрушения//IX Международная научно-техническая конференция «Пластическая деформация металлов», Днепропетровск, 2011

**15. Колбасников Н.Г., Зотов О.Г., Лукьянов А.А, Шамшурин А.И. Моделирование испытаний падающим грузом: исследование слабого звена//Сталь, Москва, 2011. С. 53-61.**