

На правах рукописи



**Тулин Даниил Евгеньевич**

**Сопротивление хрупкому разрушению крановых  
сварных конструкций**

2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор, Соколов Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор, Крыжевич Геннадий  
Брониславович

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Балтийский государственный технический  
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»,  
профессор кафедры «Механика деформируемого  
твёрдого тела», г. Санкт-Петербург

кандидат технических наук, доцент,  
Ватулин Ян Семенович

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I»,  
доцент кафедры «Наземные транспортно-  
технологические комплексы», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург

Защита состоится 29.05.2024, 11:00 МСК

на заседании диссертационного совета У.2.5.11.37

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера П, Главный учебный корпус, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
и на сайте <https://www.spbstu.ru/>

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

дата

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.5.11.37

кандидат технических наук, Грачёв Алексей Андреевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Автомобили, суда, железнодорожные составы и специальная техника оборудуются мобильными грузоподъемными устройствами разных видов: подъемными кранами, крюковыми погрузчиками, гидropодъемниками и сравнительно новыми для региона ЕврАзЭС кранo-манипуляторными установками (КМУ) и гидроманипуляторами. Данная работа посвящена проблеме повышения прочности и надёжности сварных металлоконструкций этих машин, изготавливаемых с применением проката из низколегированных высокопрочных сталей. Сложность таких конструкций обуславливает наличие в них большого количества концентраторов напряжений. Высокая интенсивность эксплуатации часто приводит к возникновению усталостных повреждений. Существенная доля техники эксплуатируется в северных широтах. Сочетание упомянутых факторов приводит к возникновению хрупких разрушений. Этот вид отказа весьма опасен тем, что обычно приводит к полной потере несущей способности конструкции. Данное исследование актуально для проектирования сварных конструкций грузоподъемных, горнодобывающих, строительных машинах, сосудов давления, корпусах судов и строительных сооружениях, подверженных интенсивным динамическим нагрузкам и эксплуатируемым в условиях отрицательных температур и особенно в арктическом регионе.

### **Степень разработанности темы исследования**

При прогнозировании хрупких разрушений используют критерии механики разрушения, описывающие поведение материала с трещиной. Однако данные критерии являются сравнительными параметрами сталей, не учитывают конструктивно-технологические особенности конструкций и трудно применимы в инженерной практике. В настоящее время развиваются физические критерии, использующие базовые механические свойства материала. В этом направлении пока не получены надежные решения, пригодные для инженерных приложений.

Данная работа построена в русле развития нелинейной механики разрушения и посвящена развитию методики прогнозирования хрупкого разрушения сварных конструкций, с учетом их конструктивно-технологических особенностей и условий эксплуатации.

### **Цели и задачи исследования**

Цель работы: методика прогнозирования хрупкого разрушения сварного узла металлической конструкции с трещиной, эксплуатируемой в условиях отрицательных температур. Задачи, решаемые в рамках настоящего исследования:

- Выбор и обоснование базовой теории хрупкого разрушения;
- Анализ напряженно-деформированного состояния детали из упругопластического материала в области вершины трещины;
- Анализ математической модели напряженно-деформированного состояния материала в области вершины трещины. Определение границ и условий применения данной математической модели;
- Исследование влияния отрицательной температуры на предел текучести высокопрочных сталей, уточнение аналитического аппарата для определения зависимости предела текучести стали от температуры;
- Исследование влияния конструктивно-технологических особенностей сварного узла на напряженно-деформированное состояние материала в области вершины трещины, обобщение результатов, формулирование на их основе рекомендаций для инженерных расчётов;
- Исследование напряжения отрыва высокопрочных сталей, уточнение методики его определения;
- Создание методики прогнозирования хрупкого разрушения сварного узла металлоконструкции с трещиной с учётом его конструктивно-технологических особенностей и отрицательной температуры, формулирование рекомендаций по применению методики.

## **Научная новизна работы**

Научную новизну работы составляют следующие положения:

- Аналитическая методика оценки параметров упругопластического напряженно-деформированного состояния детали с полуэллиптической трещиной и ее подтверждение путем конечно-элементного анализа;
- Зависимость предела текучести низколегированных сталей высокой прочности от температуры и аналитическая модель этой зависимости в области температур от -196 до +20 °С;
- Расчетно-экспериментальная методика определения размера зоны предразрушения и напряжения отрыва для низколегированных сталей и ее экспериментальная проверка;
- Результаты конечно-элементного исследования влияние остаточных сварочных напряжений на напряженно-деформированное состояние конструкции с трещиной.

## **Практическая значимость работы**

Практическую значимость работы составляет методика прогнозирования хрупкого разрушения металлических конструкций в условиях отрицательных климатических температур с учетом свойств материала, наличия сварочных дефектов и остаточных напряжений.

## **Методология и методы исследования**

В данном исследовании использован физический критерий хрупкого разрушения Л.А. Копельмана, который в соответствии с подходом Нейбера-Новожилова применен к малой области материала в вершине трещины. В работе применён системный численный анализ процессов упругого и упругопластического деформирования моделей различных образцов с трещинами при различных температурах. Для исследования параметров трещиностойкости использовался экспериментально-расчетный метод, включающий численный

анализ результатов испытаний образцов в условиях отрицательных температур. Данные для численного анализа получены из массива результатов испытаний, полученных самостоятельно и представленных в научных публикациях. Механические испытания образцов из листового проката высокопрочной стали при различных температурах проведены с помощью поверенного оборудования и измерительных приборов. Численное исследование проводилось посредством программных пакетов *MathCAD* и *NX Nastran*.

### **Положения, выносимые на защиту**

К основным положениям, выносимым на защиту, относятся:

- Результаты численного исследования напряжено-деформированного состояния материала в области вершины полуэллиптической трещины;
- Расчетные параметры и границы применимости математической модели напряжено-деформированного состояния упругопластического материала в зоне предразрушения перед вершиной трещины;
- Расчётные параметры зависимости предела текучести высокопрочных сталей от температуры в области отрицательных температур;
- Результаты исследования влияния остаточных сварочных напряжений на напряженное состояние материала в зоне предразрушения в области вершины трещины;
- Методика вычисления размера зоны предразрушения и напряжения отрыва для низколегированных и высокопрочных сталей;
- Методика экспериментально-расчетного определения напряжения отрыва для низколегированных сталей с использованием результатов испытания стандартных образцов типа KCV на трехточечный изгиб в жидком азоте.
- Методика прогнозирования возможности хрупкого разрушения сварного узла с трещиной с учётом влияния конструктивных концентраторов и остаточных сварочных напряжений.

## Степень достоверности и апробация результатов

Результаты работы отмечены на конкурсе грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в 2021 году. Материалы исследования представлены на конференции Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции 26-27 ноября 2021 г. По теме диссертации опубликовано 9 статей в научных изданиях, входящих в перечень ВАК, индексируемых в РИНЦ и Scopus, а также доклад на конференции.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** приводятся результаты анализа случаев разрушения сварных металлических конструкций грузоподъемных машин, а также краткий обзор методик прогнозирования хрупкого разрушения деталей и конструкций.

Анализ случаев разрушения металлических конструкций показал, что хрупкое разрушение обусловлено сочетанием нескольких факторов, затрудняющих протекание пластической деформации: отрицательная температура, концентрация напряжений, значительная толщина проката и поле остаточных сварочных напряжений. Негативно влияет также несоответствующее качество материала, проявляемое в форме пониженной ударной вязкости. Практика обслуживания крано-манипуляторных установок (КМУ) свидетельствует, что во многих случаях возникновению хрупкого разрушения способствуют сварочные дефекты – несплавления, непровары, поры, трещины т.д. (Рисунок 1, *а, б*).

Инженерные методики расчёта учитывают только свойства основного металла и силовые эксплуатационные воздействия на конструкцию без учёта остаточных напряжений и структурных изменений материала, возникающих в результате термопластического цикла сварки, локальной концентрации напряжений и т.п.

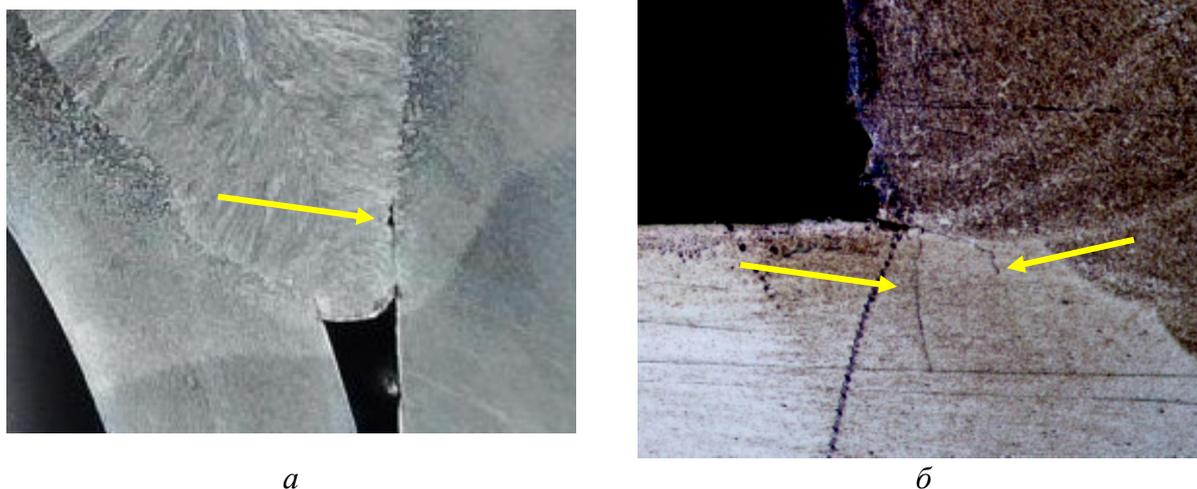


Рисунок 1 – Макрошлифы сварных узлов, *а* – несплавление, *б* – трещины в зоне термического влияния

Для оценки возможности хрупкого или квазихрупкого разрушения используют методы линейной и нелинейной механики разрушения. Для использования на стадии проектирования предложен ряд физических критериев. В области инженерных расчетов перспективным представляется использование локального подхода, например, критерий Нейбера-Новожилова, в котором рассматривается образование условий хрупкого разрушения в конечном объеме материала перед вершиной трещины. Результаты существующих на данный момент исследований по разработке интегрального локального критерия разрушения получены на простейших образцах с простыми концентраторами. Пока не найден достаточно обоснованный и адекватный метод прогнозирования хрупкого разрушения элемента конструкции с трещиноподобным дефектом, пригодный для инженерного применения.

**Во второй главе** приводится теоретическое обоснование работы, математическая модель напряжённо-деформированного состояния в области вершины трещины, а также результаты численного анализа для определения параметров предлагаемой модели.

В рамках исследования рассматривается подход Нейбера-Новожилова. Условие разрушения применяется к некоторой зоне усреднения конечных размеров

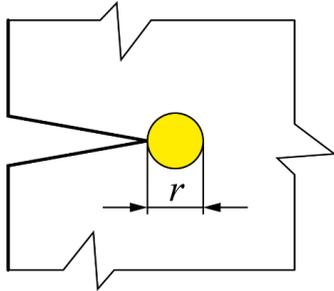


Рисунок 2 – Зона усреднения, выделяемая в вершине трещины

$r$  (Рисунок 2). В условии разрушения такая зона называется зоной предразрушения с характерным размером  $r_0$ . Критериальным параметром является среднее напряжение в зоне предразрушения.

*Условие хрупкого разрушения.* Для применения к зоне предразрушения выбраны условия хрупкого разрушения, сформулированные Л. А. Копельманом:

$$\sigma_{ir} \geq \sigma_{тТ}, \sigma_{1r} \geq S_c, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ir} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1r} - \sigma_{2r})^2 + (\sigma_{2r} - \sigma_{3r})^2 + (\sigma_{3r} - \sigma_{1r})^2}$  – усреднённая по зоне

предразрушения интенсивность напряжений при упругопластическом

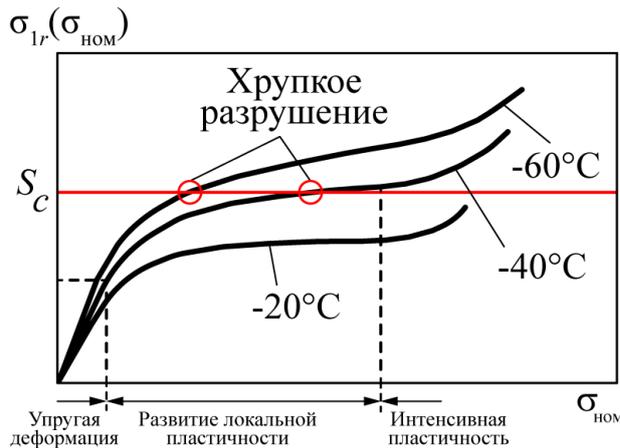


Рисунок 3 – Зависимость усреднённого первого главного напряжения  $\sigma_{1r}$  от номинальных напряжений  $\sigma_{ном}$

деформировании,  $\sigma_{1r}, \sigma_{2r}, \sigma_{3r}$  –

усреднённые по зоне предразрушения

главные напряжения,  $\sigma_{тТ}$  – предел

текучести при температуре нагружения,

$S_c$  – напряжение отрыва данного

материала, которое не зависит от

температуры, и является свойством

материала. В процессе нагружения

зависимость первого главного

напряжения от номинального  $\sigma_{1r}(\sigma_{ном})$  делится на три стадии (Рисунок 3): первая

– упругая деформация, вторая – развитие локальной пластичности и третья –

интенсивная пластичность. Условия хрупкого разрушения (1) могут быть

выполнены на второй стадии при пересечении кривой  $\sigma_{1r}(\sigma_{ном})$  с уровнем

напряжения отрыва  $S_c$ . При понижении температуры растет предел текучести,

поэтому уровень первого главного напряжения  $\sigma_{1r}(\sigma_{ном})$  повышается, что

способствует возникновению хрупкого разрушения.

Переход к безразмерным параметрам позволяет получить более универсальные зависимости, не зависящие от предела текучести стали и температуры:

$$s_r = \frac{\sigma_{1r}}{\sigma_{\tau T}}, \quad k = \frac{K_I}{\sigma_{\tau T} \sqrt{\pi r}} = \frac{Y_T \sigma_{ном} \sqrt{\pi b}}{\sigma_{\tau T} \sqrt{\pi r}}, \quad \eta = \frac{\sigma_{1r}}{\sigma_{ir}} \quad (2)$$

где  $Y_T$  – безразмерный коэффициент, учитывающий форму трещины и ограниченные размеры детали (К-тарировка),  $b$  – характерный размер трещины,  $\eta$  – коэффициент жесткости напряжённого состояния. Параметр  $k$  характеризует процесс локального нагружения детали с трещиной в упругом материале. Функция

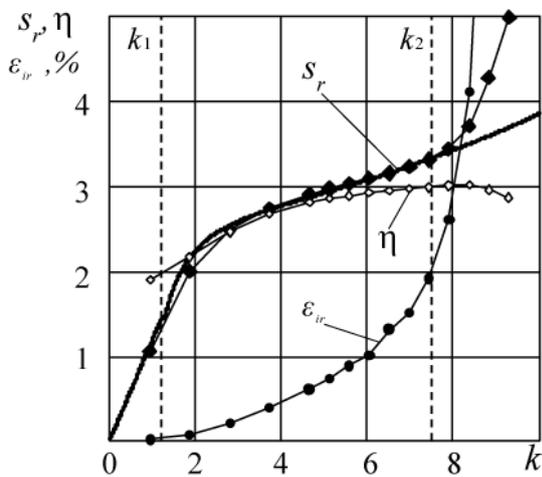


Рисунок 4 – Зависимости параметров  $s_r$  (♦),  $\eta$  (◇) (2) и  $\varepsilon_{ir}$  (•) от  $k$ , МКЭ.  $s_r(k)$  (сплошная линия) вычислено по (3) при  $U = 1,7, V = 1,2$

$s_r(k)$  не зависит от предела текучести и температуры, но зависит от геометрических параметров детали и трещины. Графики зависимости параметров  $s_r$  и  $\eta$  от  $k$  (2) получены МКЭ (Рисунок 4). График  $s_r(k)$  также разделяется на три участка, соответствующих стадиям нагружения. Первая стадия при  $k \leq k_1$  – зависимость  $s_r(k)$  линейная, пластическая зона не превышает зону усреднения. Вторая стадия при  $k_1 < k \leq k_2$  – развитие локальных пластических

деформаций  $\varepsilon_{ir}$  до 1–2% в условиях высокой жёсткости напряженного состояния  $\eta$ . Граница  $k_2$  соответствует максимальному значению  $\eta$ . Третья стадия при  $k > k_2$  – интенсивное развитие пластических деформаций, снижение  $\eta$ . Зависимость  $s_r(k)$  в области  $k \leq k_2$  с достаточной точностью описывается функцией:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 \leq k \leq k_1: \quad s_r &= 1,2k; \\ \text{при } k_1 < k \leq k_2: \quad s_r &= 1 + U \left( 1 - \frac{w}{k^2} \right) + V \frac{G_p}{E} k^2. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $G_p$  – модуль пластического упрочнения,  $E$  – модуль упругости,  $U, V, w$  – расчётные коэффициенты. С учётом (2) и (3) условие разрушения (1) примет вид:

$$\sigma_{ir} \geq \sigma_{TT}, \quad s_r(k)\sigma_{TT} \geq S_c$$

Коэффициенты зависимости (3) определялись с помощью МКЭ-анализа в среде *NX Nastran* по алгоритму *Nonlinear Static* и составили: для полуэллиптических трещин  $U=1,2$ ,  $V=1$ ,  $w=1$ ; для трещин в компактных образцах  $U=1,7$  и  $w=1,2$ . Коэффициент  $V=0,88 \div 2,2$  зависит геометрических характеристик образцов.

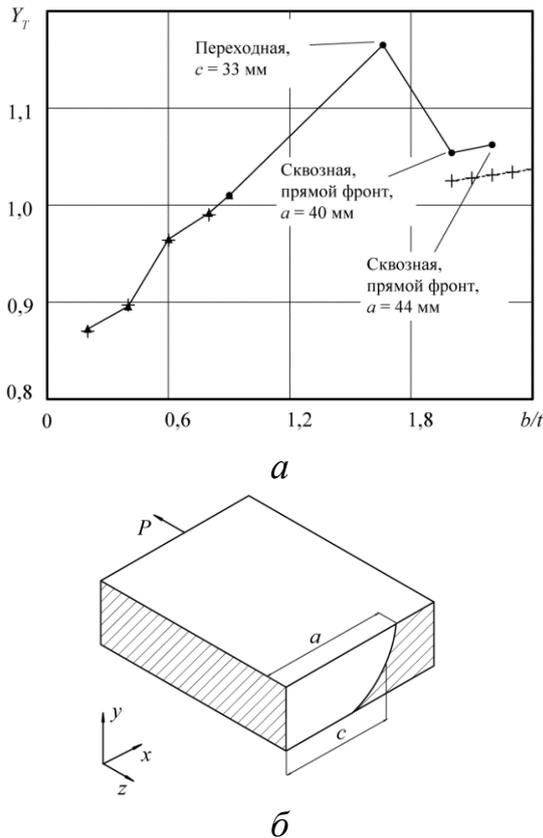


Рисунок 5 – Зависимость  $Y_T$  от размеров трещины ( $a$ ) и схема переходной трещины ( $b$ )

- ▲ – полуэллиптические трещины;
- – сквозные трещины; значения «+» приведены по справочнику;
- б – переходная трещина

В третьей главе изложены результаты конечно-элементного исследования влияния формы и размеров трещины, концентрации напряжений и поля остаточных сварочных напряжений на напряжённое состояние материала в области вершины трещины в сварном узле. Все расчеты выполнены в среде *NX Nastran* на моделях из конечных элементов типа *Solid*.

В первом параграфе исследуется коэффициент интенсивности напряжений (КИН) для трещин в гладкой пластине при одноосном нагружении, а также для случая перехода поверхностной полуэллиптической трещины в сквозную. Выражение КИН для трещины нормального отрыва в гладкой пластине имеет вид:

$$K_I = Y_T \sigma_1 \sqrt{\pi b}.$$

где  $Y_T$  – безразмерный коэффициент, учитывающий форму трещины и ограниченные размеры детали (К-тарировка). Анализ моделей с трещинами позволил установить, что переходная трещина (Рисунок 5, б) создает всплеск значения К-тарировки (Рисунок 5, а). Существенное увеличение уровня напряжений в переходной зоне может привести к хрупкому разрушению.

Второй параграф данной главы посвящен исследованию напряжённо-деформированного состояния материала в области вершины трещины, находящейся в концентраторе напряжений, и разработке инженерной оценки КИН для таких трещин. Инженерные расчёты тонкостенных сварных конструкций проводят без моделирования дефектов. При этом используют КЭ-модели с элементами размером  $D_e = (1 \div 2)t$ ,  $t$  – толщина элемента конструкции. В работе показано, что КИН для трещины в концентраторе рассчитывается по формуле:  $K_I = Y_T k_D \sigma_D \sqrt{\pi b}$ , где  $k_D$  – коэффициент, учитывающий влияние концентратора,  $\sigma_D$  – напряжения в наиболее нагруженном конечном элементе. Для обоснования коэффициента  $k_D$  выполнен расчёты упругих конечно-элементных моделей из элементов типа *Solid* с трещиной у основания уступа и моделей из элементов типа *Plate* аналогичной конфигурации без трещины с грубой разбивкой, характерной для инженерных моделей. Расчёты показали, что зависимость значения коэффициента  $k_D$  от геометрических параметров модели может быть аппроксимирована функцией  $k_D = p_D (D_e/b)^m$ , где  $p_D$ ,  $m$  – коэффициенты, зависящие от типа трещины. Для краевых трещин  $p_D = 0,75$ ,  $m = 0,3$ , для полуэллиптических поверхностных и сквозных трещин:  $p_D = 0,95$ ,  $m = 0,2$ .

Для оценки влияния концентратора на процесс нагружения материала в области вершины трещины была выполнена серия расчетов на моделях из упругопластического материала. В качестве критериев влияния использованы границы второй стадии деформирования, величины  $k_2$  и  $s_2$ . Проведён МКЭ-анализ моделей сварных соединений, содержащих трещину непосредственно в области концентратора. Массивы данных для моделей с концентраторами сравнивались с

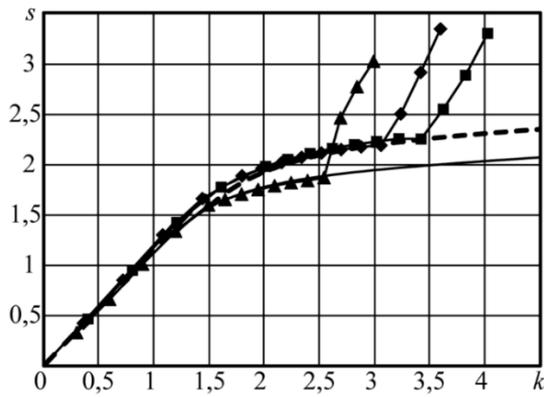
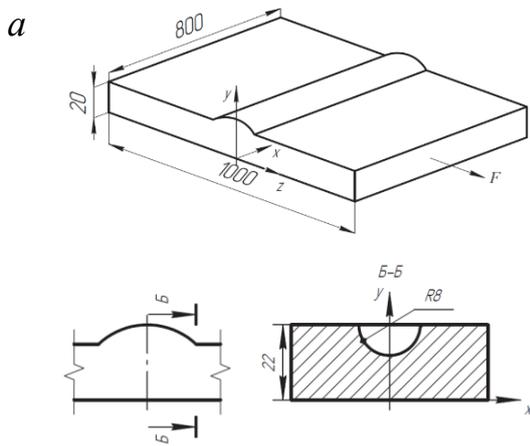


Рисунок 6 – Зависимость  $s_r$  от  $k$  по расчету МКЭ и по формуле (3) для гладкой пластины и для таврового соединения;  $\blacktriangle$  – гладкая пластина,  $\blacksquare$ ,  $\blacklozenge$  – модели с концентратором, сплошная линия – (3) для гладкой пластины, штриховая линия – (3) с  $\gamma_k, \gamma_s$ ; тавровое соединение

величинами  $k_2, s_2$ , полученными на моделях гладких пластин с аналогичными трещинами. Выявлен рост величины  $s_2$  на 13-20% и параметра  $k_2$  на 13-35%. Рост жёсткости НДС в зоне усреднения составил 5-18%. Рекомендовано учитывать концентратор введением в функцию (3) соответствующих коэффициентов:  $\gamma_k = 1,22$  и  $\gamma_s = 1,17$  (Рисунок 6).



б

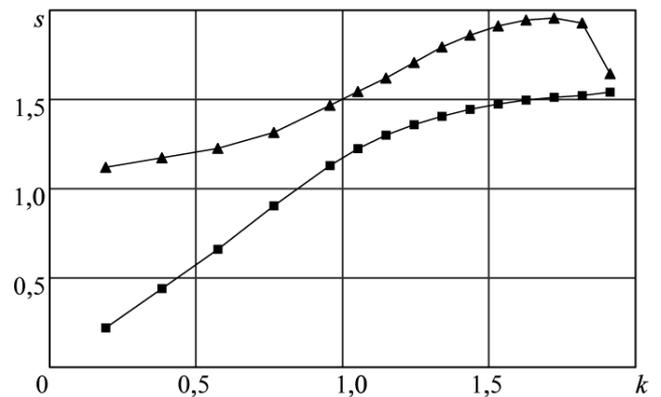


Рисунок 7 – схемы модели (а) и результаты расчета зависимости  $s(k)$  (б) для трещин при отсутствии ( $\blacksquare$ ) и наличии ( $\blacktriangle$ ) остаточных напряжений

Третий параграф посвящен анализу влияния остаточных сварочных напряжений на напряженное состояние материала в вершине трещины. Поле остаточных сварочных напряжений в моделях создавалось понижением температуры в области шва, что моделировало процесс охлаждения неравномерно нагретой области сварного соединения. Моделировались сварные соединения с трещиной, поперечные относительно направления нагружения. Модели рассчитаны в среде *NX Nastran* по алгоритму *Nonlinear Static* по двум вариантам нагружения: а) только силовое нагружение без остаточных напряжений; б) формирование поля остаточных напряжений, далее силовое нагружение. Поле остаточных напряжений приводит к повышению максимальных значений

параметра  $s_r$ , что связано с увеличением жесткости напряженного состояния  $\eta_r$  (Рисунок 7).

Повышение параметра  $\eta_r$  (2) обусловлено увеличением относительных значений компонентов объемного напряженного состояния зоны усреднения  $\sigma_2/\sigma_1$  и  $\sigma_3/\sigma_1$ . Влияние остаточных сварочных напряжений на значение  $\sigma_{1r}$  предложено учитывать коэффициентом  $\beta = \sigma_{1rR}/\sigma_{1r} = \eta_R/\eta$ , где  $\sigma_{1rR}$  – среднее по объему зоны усреднения первое главное напряжение в условиях действия внешней нагрузки и поля остаточных напряжений,  $\sigma_{1r} = \eta\sigma_{тТ}$ ,  $\sigma_{1rR} = \eta_R\sigma_{тТ}$ . Исследование коэффициента  $\beta$  методом статистического моделирования показало, что его распределение вероятностей имеет существенную асимметрию, математическое ожидание  $M_\beta = 1,26$  и среднеквадратическое отклонение  $S_\beta = 0,20$ . Для величины  $\beta$  характерны отдельные маловероятные выбросы в большую сторону. Коэффициент  $\beta$  можно считать стабильным на второй стадии нагружения. С учётом ряда допущений и полученного распределения вероятностей для инженерных приложений рекомендуется принимать  $\beta = 1,25$ .

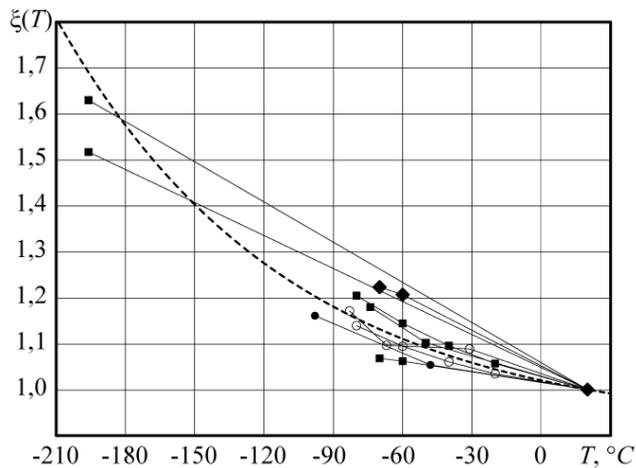


Рисунок 8 – Зависимость  $\xi_T(T)$  для низколегированных сталей: ■ — основной металл; ○ – металл шва сварного соединения; ● – зона перекристаллизации сварного соединения; ◆ – предварительная пластическая деформация; штриховая линия – (4) при  $u = 0,1$

В четвертой главе изложены результаты исследования зависимости предела текучести от температуры, а также механических характеристик сталей: напряжение отрыва и размера зоны предразрушения.

Первый параграф содержит описание математических моделей зависимости предела текучести стали от температуры. На

основании анализа указанных зависимостей вводится коэффициент температурного упрочнения стали:

$$\xi_T = 1 - u \left[ 1 - e^{-0,01(T-T_0)} \right], \quad (4)$$

где  $T$  – температура испытания, К;  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $u$  – коэффициент, зависящий от свойств стали, и имеющий постоянное значение для определенного типа или группы сталей. Результаты расчётов по данным из источников и собственных испытаний представлены в координатах  $\xi_T - T$  (Рисунок 8). Расчёты по (4) дают погрешность  $\pm 10\%$ . Для низколегированных сталей рекомендуется использовать зависимость (4) с параметром  $u = 0,1$ , соответствующим усреднённой оценке разброса экспериментальных данных.

Для исследования напряжения отрыва и размера зоны предразрушения были выполнены конечно-элементные расчеты напряженно-деформированного состояния образцов, на которых были получены хрупкие разрушения.

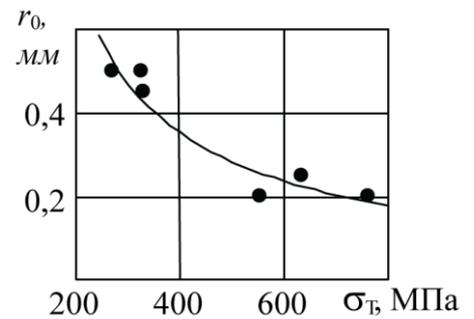


Рисунок 9 – Зависимость размера зоны предразрушения  $r_0$  (5) от предела текучести  $\sigma_T$

*Размер зоны предразрушения.* В рамках исследования установлено, что размером  $r_0$  зоны предразрушения следует считать такой размер  $r$  зоны усреднения, при котором  $\sigma_{1r}$  практически перестает зависеть от температуры. Для сталей с  $\sigma_T \leq 800$  МПа размер

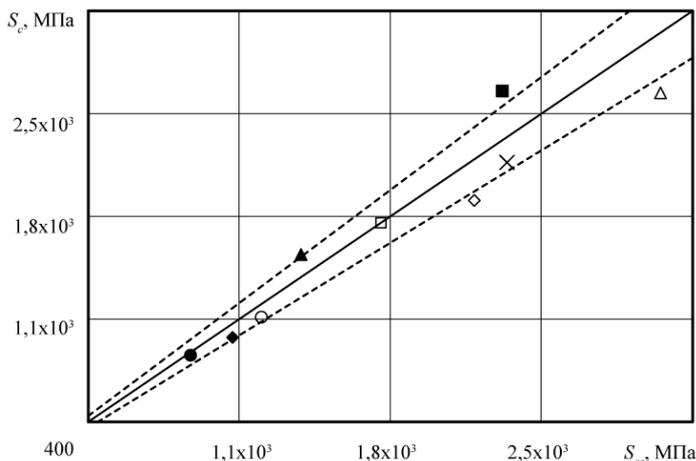


Рисунок 10 – Сопоставление расчетных  $S_c$  и экспериментальных  $S_{ce}$  значений напряжения отрыва для:  $\times$  – А517F,  $\square$  – UXW,  $\blacktriangle$  – CrMoV,  $\blacklozenge$  – А302В,  $\circ$  – 09Г2С,  $t = 36$  мм,  $\bullet$  – 09Г2С,  $t = 100$  мм; образцы S700:  $\blacksquare$  –  $t = 10$  мм;  $\triangle$  –  $t = 20$  мм;  $\diamond$  –  $t = 40$  мм;

зоны предразрушения может быть вычислен как  $r_0 = r_{ном} \sigma_{ном} / \sigma_T$  (5) (Рисунок 9). Здесь  $r_{ном} = 0,5$  мм;  $\sigma_{ном} = 280$  МПа. Найденные размеры зоны предразрушения имеют тот же порядок, что и СТОД для подобных сталей, а также близки к значениям 0,3-0,5 мм, полученным в других исследованиях.

*Напряжение отрыва.* Значения напряжения отрыва  $S_c$ , полученные по результатам конечно-элементного анализа образцов, испытанных в ходе выполнения данной работы и представленных в источниках, продемонстрировали зависимость от базового предела текучести, а также толщины заготовки  $t_B$ , из которой вырезаны образцы. На основании обобщения экспериментальных данных выражение для вычисления напряжения отрыва для низколегированных сталей с пределом текучести  $\sigma_T \leq 800$  МПа можно представить как (Рисунок 10):

$$S_c = \left[ 2 + 0,065 \left( \frac{E}{\sigma_T} \right)^{0,5} \left( \frac{t_0}{t_B} \right)^{0,25} \right] \sigma_T \quad (6)$$

где  $t_B$  – толщина заготовки,  $t_0 = 20$  мм. Толщина в данном выражении косвенно характеризует качество стали, хотя такая оценка является весьма грубой.

Для экспериментального определения напряжения отрыва предложена

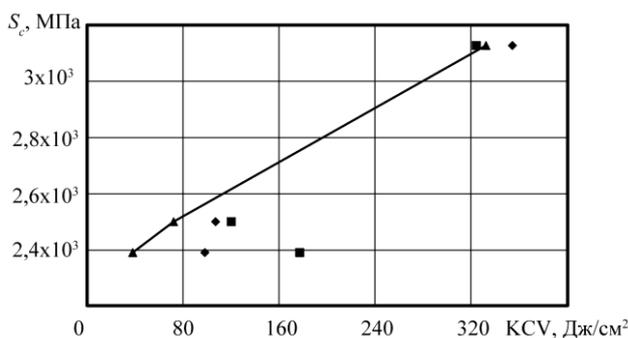


Рисунок 11 – Зависимость экспериментальных значений  $S_{ce}$  от KCV для стали S700, образцы из листов 10, 20 и 40 мм. Температура испытаний: ■ –  $-20^{\circ}\text{C}$ , ◆ –  $-40^{\circ}\text{C}$ , ▲ –  $-60^{\circ}\text{C}$

методика испытания образцов KCV на трехточечный изгиб в среде жидкого азота. Методика реализована на стали S700. Напряжение отрыва для стали S700 при разных толщинах показало почти линейную корреляцию с ударной вязкостью KCV при температуре  $-60^{\circ}\text{C}$  (Рисунок 11). Это подтверждает сходство процессов разрушения

материала в испытаниях на ударный изгиб и изгиб в условиях криогенной температуры. Так прокат толщиной 20 мм показывает максимальное значение напряжения отрыва и максимальную ударную вязкость.

**В пятой главе** представлена методика прогнозирования хрупкого разрушения сварных узлов с учетом их конструктивно-технологических особенностей, построенная на базе разработанных моделей. Приведён пример инженерного расчёта на её основе. Методика состоит из условия хрупкого разрушения (1), модели НДС зоны предразрушения  $s_r(k)$  (3), а также формул для

определения размера зоны предразрушения  $r_0$  (5) и напряжения отрыва  $S_c$  (6). Считая, что в момент разрушения второе условие (1) выполняется по равенству  $s_r(k_c)\xi_T\sigma_T = S_c$ , и используя выражения (1) - (3) и  $\sigma_{T,T} = \xi_T\sigma_T$ , получим  $k_c$ :

$$k_c = \sqrt{A + \sqrt{A^2 + 4UwB}/2B}, \quad (7)$$

где  $A = S_c/\xi_T\sigma_T - 1 - U$ ,  $B = V G_p/E$ . Из выражений (2) и (7) найдем критическое значение КИН:

$$K_c = k_c\sigma_T\xi_T\sqrt{\pi r_0} \quad (8) \quad K_{II} = k_1\sigma_T\xi_T\sqrt{\pi r_0}, \quad K_{I2} = k_2\sigma_T\xi_T\sqrt{\pi r_0} \quad (9)$$

Результаты расчетной оценки  $K_c$  сопоставлены с экспериментальными данными,

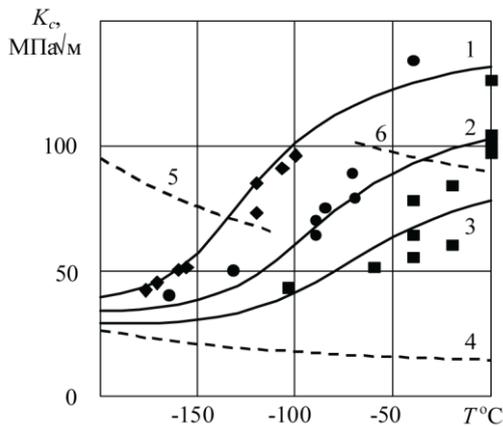


Рисунок 12 – Экспериментальные и расчетные (8)  $K_c$  для 09Г2С:

- ◆ и 1 – образцы 12 мм;
- и 2 – образцы 36 мм;
- и 3 – образцы 100 мм.
- 4-6 – граничные  $K_c$  по (9),  
кривые 5 и 6 для образцов  
с 12 и 36 мм соответственно

полученными при испытании нескольких серий образцов с трещинами при отрицательных температурах (Рисунок 12). На графиках также показаны значения  $K_I$ , соответствующие границам первой и второй стадий нагружения (5.4). Графики зависимости  $K_c(T)$ , рассчитанные по формуле (8), не противоречат результатам эксперимента. В области хрупких разрушений расчетные графики в большинстве случаев лежат в области разброса экспериментальных значений.

*Математическая модель хрупкого разрушения с учетом конструктивно-технологических особенностей сварного узла.* Согласно принятому критерию (1), можно утверждать, что хрупкое разрушение детали с трещиной не произойдет, если при  $k = k_2$  будет выполнено условие:

$$\beta\gamma_s s_r(\gamma_k k_2)\sigma_T\xi_T \leq S_c$$

где коэффициенты  $\gamma_s$ ,  $\gamma_k$  учитывают влияние концентратора напряжений, коэффициент  $\beta$  учитывает влияние остаточных напряжений.

Пример применения методики в прикладных инженерных расчётах. На Рисунке 13 представлены зависимости критической температуры нагружения  $T_c(t_B)$  сварного узла с трещиной от толщины элемента (проката)  $t_B$  для марок сталей 09Г2С и S700, выполненные по предложенной методике. Оценена безопасная температура нагружения сварного узла в случаях первого нагружения новой конструкции (Рисунок 13, а) и нагружения узла с усталостной трещиной, полученной в результате длительной эксплуатации (Рисунок 13, б).

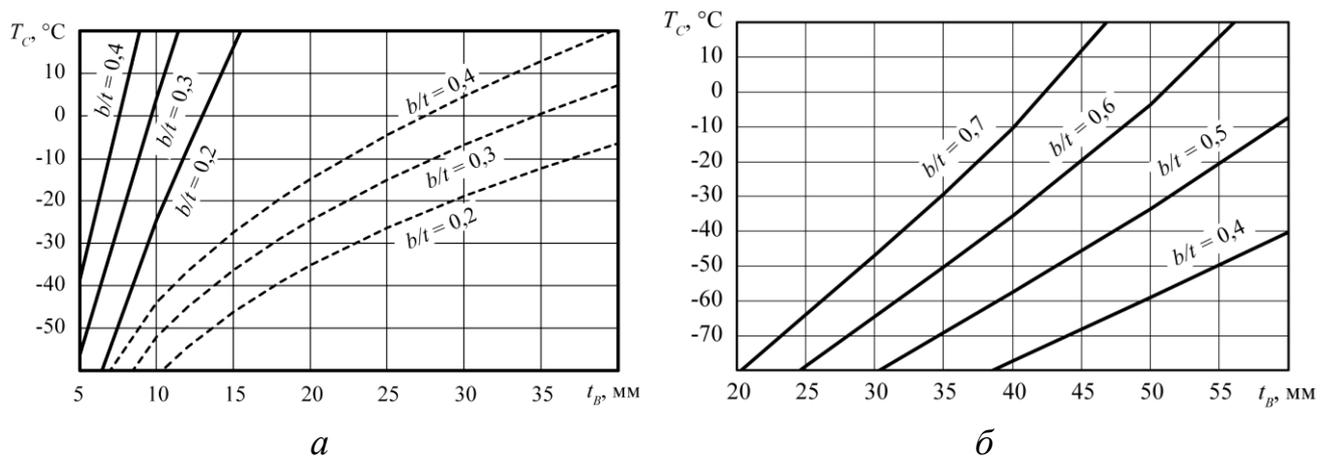


Рисунок 13 – Зависимость  $T_c$  от  $t_B$  при различных  $b/t$ ;  $b/a = 0,6$ . Сплошные линии – сталь S700, пунктирные линии – сталь 09Г2С; а – концентратор и поле остаточных напряжений; б – усталостная трещина (без влияния остаточных напряжений и концентратора)

Показано, что сварные узлы с трещинами, изготовленные из высокопрочных низколегированных сталей, более склонны к хрупкому разрушению. Например, при  $t_B = 10$  мм и росте трещины трещины с 20% до 30% от  $t_B$  температурный диапазон эксплуатации смещается на  $\Delta T \approx 25^\circ\text{C}$  в область положительных температур (Рисунок 13, а). При проектировании изделий из высокопрочных сталей, предназначенных для эксплуатации при отрицательных климатических температурах, следует гарантировать повышенный контроль качества сварных соединений, учесть в технологии изготовления снятие остаточных сварочных напряжений. Следует также ограничить температурный диапазон эксплуатации уровнем  $-20 - -30^\circ\text{C}$ , или обеспечить проведение первых нагружений конструкции в условиях положительных температур, тогда после некоторого количества нагружений остаточные напряжения релаксируют и опасность хрупкого разрушения снизится.

При оценке надёжности узлов с усталостными трещинами рассматриваются такие трещины, которые могут быть обнаружены при визуальном осмотре металлоконструкции, т.е. не менее 30 мм в длину. По результатам оценки предельного безопасного размера трещины могут быть составлены требования к обслуживанию и эксплуатации проектируемой машины. Так из графика на Рисунке 13, б видно, что при  $-40^{\circ}\text{C}$  усталостная трещина глубиной до  $0,7t_B$  может вырасти до длины 75 мм без риска возникновения хрупкого разрушения. При  $-60^{\circ}\text{C}$  длина безопасной усталостной трещины составит уже 61 мм.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Данное исследование посвящено разработке физического критерия хрупкого разрушения. В основу исследования положена теория разрушения Л.А.Копельмана, которая согласно принципу Нейбера-Новожилова применена к малой области материала у вершины трещины, названной областью предразрушения.

Проведено конечно-элементное исследование коэффициентов интенсивности напряжений полуэллиптических, сквозных и краевых трещин, а также трещин, расположенных в конструктивных концентраторах. Предложена приближенная модель оценки КИН для полуэллиптических поверхностных трещин. Показана особенность, возникающая при переходе поверхностной полуэллиптической трещины в сквозную.

Показано, что конструктивный концентратор напряжений повышает жёсткость НДС  $\eta$  материала в области вершины трещины. Даны рекомендации по учёту эффекта концентрации напряжений при расчёте КИН и анализе упругопластического напряженного состояния материала в области вершины трещины.

Выполнено системное численное исследование напряжённо-деформированного состояния упругопластического материала в вершине трещины. По результатам анализа установлены величины безразмерных параметров

математической модели напряжённо-деформированного состояния в области вершины поверхностных трещин и трещин в компактных образцах. Даны рекомендации по учёту эффекта конструктивной концентрации напряжений на упругопластическое напряженное состояние материала в области вершины трещины.

Проведён анализ влияния остаточных сварочных напряжений на напряженное состояние сварного соединения с трещиной. Показано, что поле остаточных напряжений может приводить к увеличению жёсткости НДС и первого главного напряжения в области вершины трещины на 10-30%. Дано предложение по учёту влияния остаточных сварочных напряжений в математической модели напряжённо-деформированного состояния материала в области вершины трещины.

Проведено исследование зависимости предела текучести низколегированных сталей от температуры. Экспериментальным путём определена зависимость предела текучести высокопрочной стали марки S700 от температуры в диапазоне +20 – -196°C. Дана рекомендация по расчету предела текучести низколегированных сталей в условиях отрицательных температур.

Обоснована методика определения размера зоны предразрушения в вершине трещины. Показано, что размер зоны предразрушения зависит от предела текучести и для более прочных сталей имеет меньшее значение.

Предложена экспериментально-расчетная методика определения напряжения отрыва для низколегированных сталей путем испытания стандартных образцов типа KCV на трехточечный изгиб в жидком азоте. Результаты применения этой методики не противоречат данным, полученным другим способом.

Установлена зависимость напряжения отрыва  $S_c$  от предела текучести при +20°C и дано ее математическое описание. Влияние качества материала, его структуры и химсостава приближенно учтены введением в этом выражении толщиной проката  $t_B$ . Отклонение экспериментальных данных от расчетных составляет  $\pm 15\%$ .

Критерий хрупкого разрушения и разработанные модели напряженно-деформированного состояния позволяют вычислить критическое значение коэффициента интенсивности напряжений и его изменение в зависимости от температуры испытаний. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными свидетельствует об адекватности методики.

Практическую значимость работы составляет система моделей, которая включает условие хрупкого разрушения, модель напряжённо-деформированного состояния материала зоны предразрушения, а также формулы для определения размера зоны предразрушения и напряжения отрыва. Систему моделей можно использовать для прогнозирования хрупкого разрушения сварных металлоконструкций с учетом минимальной температуры эксплуатации, влияния остаточных сварочных напряжений и размера возможного дефекта.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Соколов С. А., Тулин Д.Е. Методика вычисления коэффициента интенсивности напряжений для трещины в области концентратора напряжений // Известия ТулГУ. 2020. No 5. С. 328—335.
2. Тулин Д.Е. Исследование напряженно-деформированного состояния материала в области вершины трещины, расположенной в зоне конструктивного концентратора // Механика машин, механизмов и материалов. 2023. No 3. С. 37—42.
3. Тулин Д.Е., Соколов С. А., Грачев А.А. Влияние остаточных сварочных напряжений на сопротивление конструкций хрупкому разрушению // Вестник машиностроения. 2022. No 3. С. 24—30. DOI: 10.36652/0042-4633-2022-3-24-30
4. Соколов С. А., Тулин Д.Е. Влияние собственных остаточных напряжений на сопротивление сварного соединения хрупкому разрушению // Деформация и разрушение материалов. 2023. No 1. С. 2—10. DOI: 10.31044/1814-4632-2023-1-2-10

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную базу данных Scopus:

5. Sokolov S., Tulin D., Vasiliev I. Investigation of the size of the fracture process zone and the cleavage stress in cracked steel parts // *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2023. № 3 (46). С. 1159–1169. <https://doi.org/10.1111/ffe.13927>

6. Sokolov S. A., Vasil'ev I. A., Tulin D. E. Estimation of the Increase in the Yield Strength of Building Steels at Negative Temperatures // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022. № 4 (2022). С. 396–399. DOI: 10.1134/S0036029522040279

7. Sokolov S. A., Tulin D. E. Mathematical Model of Brittle Fracture of a Cracked Part // *Physical Mesomechanics*. 2022. № 1 (25). С. 72–79. DOI: 10.1134/S1029959922010088

8. Tulin D. E. State of Stress in a Plate with a Semielliptical or Through Crack // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. № 10 (2021). С. 1213–1216. DOI: 10.1134/S0036029521100347

9. Sokolov S. A., Tulin D. E. Modeling of Elastoplastic Stress States in Crack Tip Regions // *Physical Mesomechanics*. 2021. № 3 (24). С. 237–242. DOI: 10.1134/S1029959921030024

Доклад на конференции:

10. Тулин Д. Е. Исследование упруго-пластического деформирования материала в вершине трещины компактного образца // *Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции 26-27 ноября 2021 г. / Под ред. к.т.н., О.А. Михайленко / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2021. С. 244 – 250.*