

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 539.3

МОЙСЕЙЧИК
Александр Евгеньевич

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
И РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ
НАПРЯЖЕНИЙ ПО ЭВОЛЮЦИИ ДЕФОРМАЦИОННОГО
ТЕПЛООБРАЗОВАНИЯ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Минск 2017

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Василевич Юрий Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сопротивление материалов машиностроительного профиля» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **Можаровский Валентин Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной математики и программирования УО «Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины»;

Чигарев Анатолий Власович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика и мехатроника» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Защита состоится «24» ноября 2017 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.07 при Белорусском национальном техническом университете по адресу 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп.1, ауд. 202, тел. ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «24» октября 2017 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
канд. физ.-мат. наук,
доцент

П. И. Ширвель

© Мойсейчик А. Е., 2017

© Белорусский национальный
технический университет, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Разрушения стальных элементов возникают по различным причинам, но особенно опасны те из них, которые происходят в результате потери прочности в зонах концентраторов напряжений (конструктивно-технологических дефектов) при действии растягивающих напряжений. Такие дефекты в стальных конструкциях приводят к зарождению трещин, разрушениям элементов. В ряде работ различных авторов рассмотрены основные дефекты и повреждения стальных деталей, механизмов и конструкций, появляющиеся при различных технологических операциях изготовления, воздействиях коррозионных сред и их эксплуатации. При этом показано, что очаги зарождения разрушений как правило возникают на участках, содержащих различные концентраторы напряжений.

Часть дефектов, появляющихся в процессе жизненного цикла объектов, удается предотвратить благодаря прогнозируемому расчету на прочность и жесткость, анализу усталости, трещиностойкости элементов. Часть дефектов в конструкциях не поддается расчетному анализу по современным методикам. Кроме того, дефекты, в процессе работы элементов могут развиваться. Наличие таких дефектов, их развитие до критических уровней диагностируется различными методами. Стальные элементы ответственных изделий периодически контролируют традиционными методами диагностики, которые позволяют выявлять существующие дефекты и определять их характеристики, однако, такие методы малоинформативны как предвестники локализации и зарождения разрушения. Технологии выявления дефектов традиционными методами достаточно трудоемки и требуют вывода оборудования и изделий из технологического цикла на период проведения работ. Основной недостаток традиционных методов диагностики состоит в том, что выявление дефектов и их параметров производится вне связи с напряженно-деформированным состоянием элемента в зоне расположения дефекта и происходящими в этой зоне явлениями, связанными с деформированием и разрушением стальных элементов.

Поэтому востребованным является исследование явлений в зонах конструктивно-технологических дефектов, связанных с деформированием и разрушением твердых тел, в частности деформационного теплообразования, и изыскание и разработка научно-методических основ теплового дистанционного метода диагностики стальных элементов с целью увязки с расчетом напряженно-деформированного состояния изделий, достоверного определения технического состояния стальных изделий, работающих при растяжении, мест локализации их возможных разрушений.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует подпунктам 7.1, 7.5, 8.3 «Перечень приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы», утвержденного постановлением Совета Министров № 585 от

19.04.2010 г.

Диссертационные исследования частично проведены в рамках государственных программ:

ГПОФИ «Строительство и архитектура 10», «Исследование кинетики зарождения и развития разрушения в новых видах стальной арматуры для железобетонных конструкций при статических и квазистатических нагружениях и разработка научно-обоснованных методов определения ее расчетных, технологических и эксплуатационных параметров с целью повышения эксплуатационной надежности железобетонных конструкций» (2006–2010 гг.);

ГПНИ «Строительные материалы и технологии 41» «Разработка теории компьютерного термографирования предельного состояния материалов строительных конструкций и экспериментальное обоснование методологии контроля эксплуатационной надежности несущих строительных конструкций при нормальных и повышенных температурах» (2011–2013 гг.).

Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование закономерностей локализации пластических деформаций и теплообразования в зонах конструктивно-технологических концентраторов в стержнях из низкоуглеродистой стали и разработка научно-методических основ расчетно-экспериментального анализа упругопластического деформирования, локализации и зарождения разрушения.

Для достижения цели исследования потребовалось решить ряд **задач**:

– классифицировать на основании анализа аварий и разрушений стальных конструкций и их элементов конструктивно-технологические концентраторы напряжений, в которых происходит зарождение и развитие разрушений, и проанализировать особенности работы материала в таких зонах;

– исследовать напряженно-деформированное состояние в зонах концентраторов и деформационное теплообразование в растянутых стержнях при упругом, упруго-пластическом деформировании и в стадии предразрушения и проанализировать методики расчета предельных напряжений в опасном сечении элементов;

– выполнить конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния и энергии деформирования цилиндрических образцов с выточками для прогнозирования зарождения разрушения;

– экспериментально выявить закономерности теплообразования в растянутых стальных образцах с концентраторами при их упруго-пластическом деформировании и разрушении; установить взаимосвязь теплообразования с напряженно-деформированным состоянием в окрестности концентраторов.

Научная новизна

Новая методика расчета аксиального напряжения в поперечном сечении выточки растянутого цилиндрического стержня, основанная на введении в расчет поправочного множителя к среднему значению аксиального напряжения и использующая эффект образования шейки в выточке стержня в условиях стеснения пластических деформаций материалом примыкающих выступов.

Экспериментально обоснованная зависимость характеристик пластичности в корне выточек и вида излома от уклона поверхности, примыкающей к выточкам растянутого стержня.

Экспериментально установленные закономерности процесса деформирования и теплообразования в растянутых стальных элементах с конструктивно-технологическими концентраторами, заключающиеся в охлаждении материала при его упругой работе и нагреве в зонах локализации пластических деформаций, зарождении разрушения в опасных сечениях стержня.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально обоснованная методика расчета аксиального напряжения в поперечном сечении растянутого стального цилиндрического стержня с угловой выточкой при локализации пластической деформации в стесненных условиях.

2. Критерий перехода от вязкого к хрупкому излому для низкоуглеродистой стали, основанный на изменении объема пластически деформированного материала в основании выточки, и характеризующийся относительным сужением в поперечном опасном сечении в 30–40%.

3. Закономерности изменения характеристик пластичности стали в корне прямоугольных выточек цилиндрических стержней, содержащих группу равно отдаленных между собой выточек с одинаковой геометрией, показывающие, что для образцов круглого сечения с увеличением расстояния между выточками относительное сужение в месте разрушения уменьшается при увеличении отношения ширины выступов к ширине выточек от 1 до 4 в полтора и более раз, что следует учитывать при определении допустимых деформаций для растянутых резьбовых соединений.

4. Экспериментально установленная закономерность процесса деформирования растянутых стержней из низкоуглеродистой стали круглого и прямоугольного сечений, заключающаяся в том, что с момента перехода материала из упругого состояния в пластическое и вплоть до предельного состояния, теплообразование локализуется на участках, содержащих концентраторы напряжений, а появление скачков на температурных полях поверхности растягиваемых элементов свидетельствует о наступлении предельного состояния и требует принятия мер по обеспечению работоспособности изделий.

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. Научный руководитель профессор, д-р физ.-мат. наук Василевич Ю. В. принимал участие в постановке задач и анализе полученных результатов.

Экспериментальная часть работы выполнена в составе творческих коллективов, в которых автор являлся руководителем работы или основным исполнителем. Соавторами части опубликованных работ являются профессор Василевич Ю. В., доцент Мойсейчик Е. А., магистрант Титко А. Н.. Участие соавторов работ отражено в совместных публикациях, представленных в автореферате и диссертации, и заключается в обсуждении научных результатов или решении задач, не включенных в данную работу.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались на научно-технических конференциях в Беларуси и России:

- XXIV Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы машиноведения» (г. Москва, 24–26 октября 2012 г.);

- специализированной выставке и республиканском семинаре «Новые строительные технологии и материалы» (г. Минск, 12 сентября 2013 г.);

- VI Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика-2013» (г. Минск, 23–25 октября 2013 г.);

- Юбилейной XXV Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (г. Москва, 13–15 ноября 2013 г.);

- Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современное состояние и проблемы естественных наук» (г. Юрга Томской области, 17–18 апреля 2014 г.);

- Международной научно-технической конференции «Новые технологии и материалы, автоматизация производства» (г. Брест, 29–30 октября 2014 г.);

- XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (г. Гомель, 23–24 апреля 2015 г.);

- Международной научно-технической конференции «Моделирование и инжиниринг механических и мехатронных систем» (г. Минск, 3–5 февраля 2016 г.);

- Научно-практическом республиканском семинаре в институте прикладной физики НАНБ «Неразрушающий контроль в строительстве» (г. Минск, 9 декабря 2015 г.).

Результаты работы внедрены на двух предприятиях Республики Беларусь и в учебный процесс кафедры «Сопротивление материалов и теория упругости» БНТУ. Акты внедрения – в приложении А к диссертации.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, из них 8 статей – в научных журналах, входящих в перечень изданий ВАК, общим объемом 1 авторских листа, 1 статьи – в других научных журналах, 3 статьи – в сборниках материалов конференций, 5 – в форме тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертационной работы составляет 153 страницы, из них 127 рисунка занимают 46 страниц, 18 таблиц, количество используемых библиографических источников составляет 191 наименование, включая 17 публикаций автора на 2 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе отмечается, что в процессе конструирования и изготовления в элементах и узлах стальных конструкций появляются зоны, в окрестности которых под нагрузкой возникают локальные изменения напряженно-деформированного состояния, способствующие зарождению разрушения. Анализ причин аварий стальных конструкций с разрушением растянутых элементов, данные ряда экспериментальных и теоретических работ позволили

установить, что разрушению подвержены немногочисленные элементы и их соединения, при нагружении которых развиваются местные пластические деформации на участках расположения дефектов. В работах многих отечественных и зарубежных ученых (В. П. Багмутов, С. А. Баранникова, Г. И. Баренблатт, Ф. Дж. Белл, В. И. Беляев, А. Ф. Белый, П. Бриджмен, В. Вейс, С. И. Губкин, А. А. Гриффитс, Н. Н. Давиденков, А. Н. Динник, С. И. Дружинин, Т. Екобори, М. А. Журавков, Г. Закс, Е. Зибель, Л. Б. Зуев, А. Ю. Ишлинский, Л. М. Качанов, В. В. Клубович, В. Н. Ковалевский, С. М. Красневский, Г. Н. Кувыркин, В. А. Кукареко, И. С. Куликов, В. Кунце, В. В. Левкович, Д. В. Леоненко, П. Людвик, Ф. Макклиток, Е. М. Макушок, Е. И. Марукович, Н. А. Махутов, А. Надаи, Г. Нейбер, М. Д. Новопашин, Дж. Ф. Нотт, В. Е. Панин, Г. Пастернак, П. О. Пашков, Ю. М. Плескачевский, О. А. Плехов, В. П. Северденко, В. М. Сегал, С. В. Серенсен, Г. В. Смирнов, Э. И. Старовойтов, А. В. Степаненко, В. А. Томило, Г. В. Ужик, Я. Б. Фридман, А. В. Чигарев, П. И. Ширвель, П. И. Ящерицын и другие) показано, что развитие деформаций в этих зонах является сложным многоуровневым процессом, сопровождающимся рядом физико-химических явлений и изменением теплового состояния деформированного металла. Рассмотренный в 1 главе материал позволил выдвинуть предположение, что теплообразование в зонах конструктивно-технологических концентраторов напряжений в растянутых стальных элементах, отображает напряженно-деформированное состояние в этих зонах и может служить предвестником наступления предельного состояния, зарождения и развития разрушения. По результатам исследований 1-й главы сформулированы цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена исследованию автором диссертации напряженно-деформированного состояния в растянутых цилиндрических и плоских образцах с концентраторами напряжений и трещинами при упругом и пластическом деформировании материала и их работе при возникновении предельного состояния. Показано, что в окрестностях концентраторов (дефектов изготовления, эксплуатации, изменений сечений, отверстий и т.д.) при деформировании возникает неоднородное напряженно-деформированное состояние с неравномерным распределением напряжений по объему материала. Компоненты напряженного состояния для отдельных концентраторов могут определяться методами теории упругости, разработанными Г. Нейбером, Н. И. Мухелишвили, Г. Н. Савиным, Дж. Мейзом, Ф. Макклитоком и другими учеными. Зарождение трещин в окрестности концентратора в деформированном материале происходит по схемам нормального отрыва, поперечного, продольного сдвига или их комбинациям. Поле напряжений в окрестности вершины трещины определяют методами механики разрушения, разработанными в трудах Г. В. Колосова, Н. И. Мухелишвили, Дж. Р. Ирвина, А. А. Гриффитса, Дж. И. Тейлора, Е. О. Орована, Д. С. Дагдейла, Г. И. Баренблатта, В. В. Панасюка и других ученых. При росте нагрузки локальные напряжения у основания концентраторов могут превысить предел текучести материала, что приведет к образованию малой пластической зоны, форму и размеры которой определяют с использованием линий скольжения или экспериментальных методов.

В ряде рассмотренных в главе экспериментальных работ показывается, что для надрезанных образцов имеет место увеличение временного сопротивления при изменении коэффициента концентрации напряжений от 1 до 2,5–3. В диссертации это объясняется сдерживающим влиянием металла, примыкающего к ослабленному сечению 1–1 (рисунок 1, а). Действительно, элементарный кубик в окрестности точки А будет находиться в условиях одноосного растяжения, а наибольшие касательные напряжения будут равны половине главного, т.е. $\tau_{\max}^A = 0,5\sigma_1$. Элементарный кубик в окрестности точки В сечения 1–1 будет находиться в условиях двухосного растяжения под действием главных напряжений σ_1 и σ_2 . Наибольшие касательные напряжения в этом случае будут равны половине разности главных напряжений $\tau_{\max}^B = 0,5(\sigma_1 - \sigma_2)$. Тогда $\tau_{\max}^A > \tau_{\max}^B$, т.е. в точке А будут развиваться сдвиги, а у вершины надреза (точка В) сдвиги будут «сдерживаться» напряжениями σ_2 . Таким образом, в корне надреза сопротивление металла пластическому деформированию будет выше, чем для гладкого образца. По изложенной схеме деформирование в корне надреза будет развиваться, пока там не произойдет увеличение температуры металла, которое может вызвать как уменьшение сопротивления металла сдвигу, так и его увеличение за счет фазовых изменений в материале. При коэффициенте концентрации напряжений больше 3 эксперименты различных авторов показали, что происходит уменьшение временного сопротивления материала в надрезах. Способность металла пластически деформироваться будет зависеть от объема металла, примыкающего к вершине надреза или выточки, т.е. от угла α , характеризующего выточку (канавку, надрез, затемнен на рисунке 1, а). При $\alpha = 0^\circ$ имеем гладкий, не надрезанный образец, а при $\alpha \rightarrow 90^\circ$ выточка будет трещиноподобной.

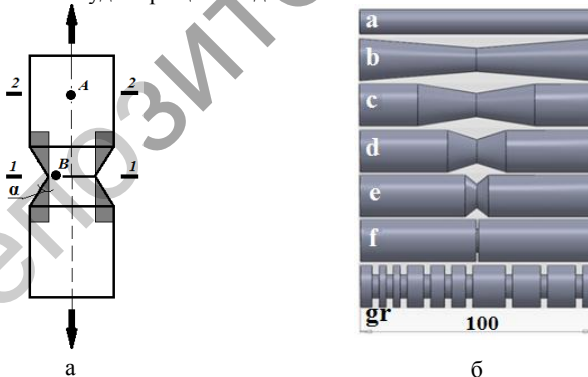


Рисунок 1. – Схема к анализу напряженного состояния надрезанных образцов (а) и вид твердотельных моделей образцов (б)

В работах П. Бриджмена, Г. Закса, Е. Зибеля, В. Кунце, Н. Н. Давиденкова и других ученых на основании экспериментальных исследований установлено, что предельная нагрузка P , воспринимаемая цилиндрическим образцом в стадии возникновения шейки, определяется пределом текучести материала σ_T , площадью ослабленного сечения S и коэффициентом K_R , зависящим от кри-

визны поверхности образца в минимальном сечении шейки:

$$P = \sigma_{PL} S = \sigma_T S K_R, \quad (1)$$

где $\sigma_{PL} = \sigma_T \cdot K_R$.

Коэффициент K_R определялся П. Бриджменом, Е. Зибелем, Н. Н. Давиденковым и Н. И. Спиридоновой и другими учеными по данным собственных экспериментов и соответствующих гипотез. Исследуя деформации зерен в радиальном и тангенциальном направлениях для наиболее узкого поперечного сечения шейки цилиндрического образца Н. Н. Давиденков и Н. И. Спиридонова показали, что при различных стадиях нагружения деформации зерен практически одинаковы (однородность деформации), а кривизна волокон в шейке растянутого образца пропорциональна расстоянию от оси образца. Приняв эти факты в качестве гипотезы, выражение для K_R ими было получено в виде

$$K_R = 1 + a/4R, \quad (2)$$

где a – радиус в минимальном сечении шейки; R – радиус кривизны поверхности шейки в направлении вдоль оси стержня. П. Бриджмен выражение для K_R представил в более общем виде

$$K_R = (1 + a/4R) \Psi(a/R), \quad (3)$$

где $\Psi(a/R)$ – функция определяемая экспериментально.

Из формул (1), (2) следует, что при одинаковых σ_T , S и a величина P будет возрастать с уменьшением R , а стеснение деформаций будет определяться стадией развития шейки. Это обосновывает, что способность к пластическому деформированию стали в корне конструктивно-технологического концентратора напряжений в расчетно-экспериментальных 3 и 4 главах диссертации необходимо исследовать на серии стальных цилиндрических образцов с выточками, имеющими одинаковые начальные значения σ_T , S и a .

Из законов термодинамики следует, что деформирование тел сопровождается изменением их температуры. В. Томсон впервые показал, что между мгновенными изменениями температуры упруго деформируемого тела и напряжениями существует линейная зависимость

$$\Delta T = -K \Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (4)$$

где K – константа материала в температурном диапазоне ΔT , $\Delta(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – соответствующее изменение суммы главных напряжений. Из формулы 4 следует, что при упругом одноосном растяжении стального образца будет происходить понижение температуры деформируемого объема, а при упругом сжатии – повышение. При пластическом деформировании материал стального образца нагревается. Нагрев является результатом физико-химических процессов, которые протекают в объеме пластически деформированного материала, расположенного в полосах скольжения (полосы Чернова–Людерса).

В третьей главе выполнен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния и теплообразования в экспериментальных образцах с использованием программного комплекса ANSYS. При расчете теплообразования в исследуемых образцах применялся объемный элемент

SOLID226, который позволяет определять тепловыделение \dot{Q}^P при пластических деформациях. Расчет производился с использованием формулы

$$\dot{Q}^P = \beta \dot{W}^P, \quad (5)$$

где β – коэффициент Тэйлора–Квинни, показывающий долю пластической работы \dot{W}^P , преобразуемую в тепло и рассчитываемую по выражению

$$\dot{W}^P = \{\sigma\}^T \{\dot{\epsilon}^P\}, \quad (6)$$

где $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}\}^T$; $\{\dot{\epsilon}^P\} = \{\dot{\epsilon}_x^P, \dot{\epsilon}_y^P, \dot{\epsilon}_z^P, \dot{\epsilon}_{xy}^P, \dot{\epsilon}_{yz}^P, \dot{\epsilon}_{xz}^P\}^T$,

$\{\sigma\}$ – вектор напряжений, $\{\dot{\epsilon}^P\}$ – вектор пластических деформаций.

В качестве основных физических моделей в работе приняты осесимметричные образцы «a-f» (аналогичные образцам Людвика–Шея), и комплексный образец «gr», показанные на рисунке 1, б. Эти образцы изготовлены из стержня диаметром 18 мм, в опасном сечении 1–1 (рисунок 1, а) имеют одинаковый диаметр 10 мм и удовлетворяют требованиям, вытекающим из анализа формул (2), (3) для образцов «a-f» с углом α от 0° до 90° .

На таких образцах в третьей главе исследованы основные закономерности деформирования и теплообразования. Твердотельные модели образцов выполнены в программе SolidWorks и импортированы в ANSYS. Размер конечных элементов в области концентраторов не превышал 0,4 мм. Конечно-элементная (КЭ) модель выточки приведена на рисунке 2.

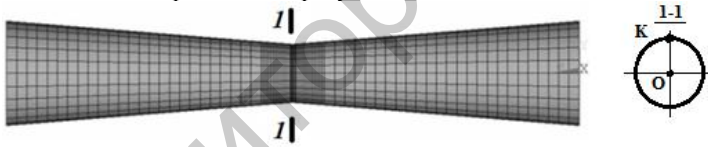


Рисунок 2. – Вид конечно-элементной модели образца на участке конструктивного изменения формы

Материал расчетных моделей образцов наделялся следующими характеристиками: плотность – 7850 кг/м^3 ; модуль Юнга – $2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; коэффициент Пуассона – $0,3$; теплопроводность – $46 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; теплоемкость – $490 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; коэффициент Тэйлора–Квинни – $0,9$. Принималась полилинейная диаграмма растяжения, особенность которой заключается в табличном представлении данных зависимости напряжений от деформации для пластической стадии деформирования. При экспериментальном определении механических свойств стали образцов получены характеристики пластичности, которые применены для КЭ модели. При расчете также учитывались следующие факторы: 1) увеличивающаяся с постоянным шагом нагрузка, с максимальным значением, соответствующим достижению предела прочности в корне выточек (с точностью до $0,5\%$ от σ_B), и 2) жесткое защемление одного торца стержня с приложением растягивающей нагрузки к другому, свободному, торцу. Для повышения достоверности анализа в настройках решателя включалась опция учета больших перемещений (Large Displacement Static). По результатам ко-

нечно-элементного расчета определялись компоненты напряженно-деформированного состояния, вычислялись коэффициенты концентрации напряжений и коэффициенты стеснения, объем пластически деформируемого материала и температура в корне выточки. Так, при упругой работе материала изменение коэффициента концентрации для образцов «а-г» получено в интервале 1 – 4,42, а упругопластический коэффициент стеснения – 1–2,26.

В результате конечно-элементного расчета образцов «а-г» определены компоненты напряженного и деформированного состояния точек в окрестности ослабленного сечения. На рисунке 3 приведено изменение области распространения пластических деформаций для образцов с выточками.

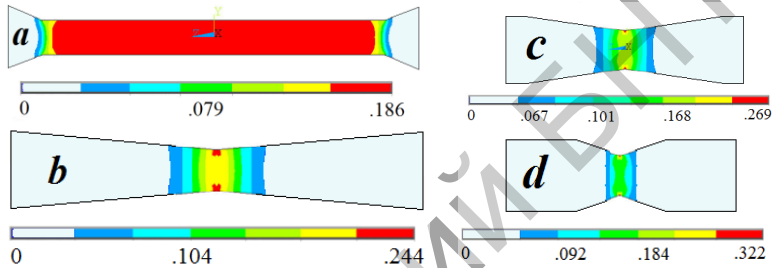


Рисунок 3. – Влияние угла выточки на размер области с пластическими деформациями и локализацию деформаций в корне выточки в момент предразрушения каждого образца (для образцов «а-д»)

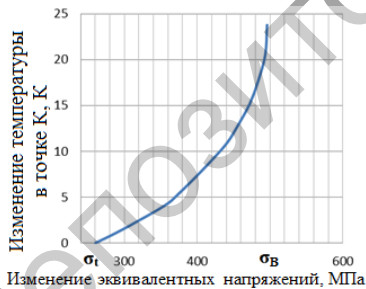


Рисунок 4. – Нагрев стали (ΔT) в окрестности опасной точки при изменении эквивалентных напряжений в этой же точке выше предела текучести

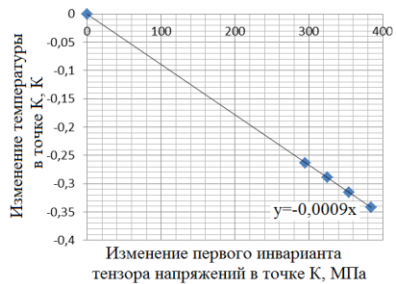


Рисунок 5. – Охлаждение материала на величину ΔT в точке К при изменении первого инварианта тензора напряжений в этой же точке при упругой работе стали

Уменьшение объема пластически деформированного материала в окрестности опасных точек сказывается на развитии теплообразования в этой зоне и при последующем зарождении разрушения. Увеличение температуры поверхности в произвольной точке К опасного сечения (рисунок 2) при развитии пла-

стических деформаций приведено на рисунке 4. Расчетom получено, что при упругом деформировании сталь охлаждалась (на 0,35 К для образца «e» (рисунок 5)). Для образца с групповыми концентраторами «gr» конечно-элементный расчет выявляет их взаимное влияние на напряженно-деформированное и тепловое состояния.

В четвертой главе экспериментально выявлены закономерности деформирования и деформационного теплообразования в стальных образцах и моделях конструкций с концентраторами и полученные результаты сопоставляются с данными конечно-элементных расчетов и данными, полученными другими авторами. Для этого были изготовлены три партии образцов: осесимметричные (с выточками, типа образцов Людвига–Шея), листовые (с конструктивно-технологическими концентраторами) и балочные. Образцы выполнялись из низкоуглеродистой стали Ст3. Размеры и материал образцов и физических моделей соответствовали принятым при конечно-элементном анализе.

При изготовлении осесимметричных образцов оказалось затруднительным обеспечение полной их идентичности с образцами, принятыми в экспериментах П. Людвига и Р. Шея. Поэтому такие образцы изготавливали из близкой им по составу и механическим свойствам современной гладкой арматурной стали А240. Общий вид подготовленных к испытаниям образцов показан на рисунке 6. Для экспериментального исследования влияния группы концентраторов на деформационные процессы, развитие разрушения и теплообразование были изготовлены образцы типа «gr» (рисунок 7).



Рисунок 6. – Вид экспериментальных образцов типа «a–f»



Рисунок 7. – Общий вид образца типа «gr»

С целью повышения точности измерения температуры, поверхность рабочей зоны образца обработана в соответствии с требованиями ГОСТ 23483–79. Образцы с выточками изготавливались в двух сериях и испытывались на растяжение при двух различных скоростях движения траверсы испытательной машины. Нагружение производилось: образцов «a–f» – на разрывной машине Р–50, листовых – на Р–100 с записью диаграммы «нагрузка–удлинение», балочных – на специализированном испытательном прессе. Испытания и обработка экспериментальных данных проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 1497 и с использованием аттестованного оборудования. Процесс де-

формирования образцов и физических моделей отображался в термофильмах с помощью компьютерного термографа «ИРТИС–2000» и методом фотофиксирования. После разрушения образцов и моделей измерялись геометрические размеры (длины, изменения поперечных сечений), фотографировались характерные виды образцов и их фрагментов, изломы. Обработка результатов термографирования велась по программному пакету IRTIS.

В экспериментах автора показано, что в выточках образцов развивается шейка в условиях стеснения деформаций. Поэтому в диссертации предложена гипотеза, заключающаяся в том, что формулы (1) и (2) позволяют и для таких условий определить напряжения в опасном сечении σ_{PL} и предельную нагрузку на растянутые цилиндрические образцы с выточкой в стадии образования шейки и в процессе изменения ее геометрии при растяжении стержня. Предполагалось, что на любой стадии развития шейки в выточке, до зарождения разрушения, формулы (1), (2) применимы. Для ослабленных сечений образцов с выточками серии «а–е», изготовленных из стали одной и той же марки, можно записать зависимости, аналогичные формуле 2. Тогда отношение σ_{RM} к σ_{RN} запишется в виде

$$\beta(\alpha) = \frac{\sigma_{RM}}{\sigma_{RN}} = \frac{\sigma_T \left(1 + \frac{a_M}{4R_M}\right)}{\sigma_T \left(1 + \frac{a_N}{4R_N}\right)} = \frac{\sigma_T K_{RM}}{\sigma_T K_{RN}}, \quad (7)$$

где $\beta(\alpha)$ – функция от угла α , а индексами m и n обозначены соответственно данные, относящиеся к образцам с выточками и гладким образцам в стадии шейкообразования.

Зависимость (7) получена в результате обобщения экспериментальных данных для цилиндрических образцов с выточками и представляется в виде

$$\beta(\alpha) = K\alpha + C, \quad (8)$$

где C – значение β при $\alpha=0$, C – безразмерная величина, соответственно, размерность K – 1/градус, α – в градусах. Значения K и C определяются по графику экспериментальной зависимости $\beta(\alpha)$.

Из (7), (8) с учетом (1) получаем

$$K = K(K\alpha + C). \quad (9)$$

Для стали Ст3 выражение K_{RM} (9) приобретает вид $K_{RM} = K_{RN}(0,0097\alpha + 1,1117)$, а $\sigma_{PL} = \sigma_T \cdot K_{RM} = \sigma_T \cdot K_{RN}(0,0097\alpha + 1,1117)$.

Объем пластически деформируемого материала в области концентратора оказывает влияние на вид разрушения. На рисунке 8 приведена зависимость относительного сужения от угла выточки для кривых трех серий образцов: 1 – данные эксперимента Людвика–Шея, 2 – данные авторского эксперимента (скорость траверсы не выше 0,05 мм/с), 3 – данные авторского эксперимента (средняя скорость траверсы – 0,5 мм/с). Для гладкого образца (рисунок 8, угол выточки $\alpha=0$) вязкое разрушение (разрушение скольжением) сопровождалось значительным относительным сужением (около 70%). С уменьшением пластически деформируемой области (при увеличении угла выточки) в изломе сокращается площадь разрушения скольжением и увеличивается область отрыва (квазихрупкое разрушение, образцы «b–d»). При относительном сужении в

изломе менее 30% происходило хрупкое разрушение образцов (рисунок 8, образцы «e-f»). Как сказывается на локализации пластической деформации и развитии шейки объем примыкающего к выточке металла в эксперименте установлено по результатам испытания образца типа «gr», который показал, что в стержне с кольцевыми ребрами жесткости (выступами) наблюдается локализация деформации, образование и развитие шейки. При этом шейка развивается в корнях выточек, ширина которых соизмерима с шириной примыкающего выступа. Материал выступа участвует в пластическом течении смежных выточек, оказывая сдерживающее действие на процесс образования шейки. Сдерживающее действие выступа на процесс пластического деформирования выточек зависит не только от ширины ребра, но и от отношения диаметров выточки и выступа. При величине этого отношения, близком к единице, работают многие резьбовые соединения. В стержне болта таких соединений из пластичной стали в предельном состоянии образуется шейка, в резьбовой части болтов из малопластичной стали зарождается начальная трещина и происходит хрупкий излом стержня.

Выполненные автором эксперименты показали, что процессы теплообразования при деформировании образцов и начальной температуре 16,5 °С характеризуются приведенными ниже закономерностями. Из термограмм рисунков 9, 10 следует, что при растяжении гладкого стержня пластические деформации развиваются последовательно от концов стержня к его середине.

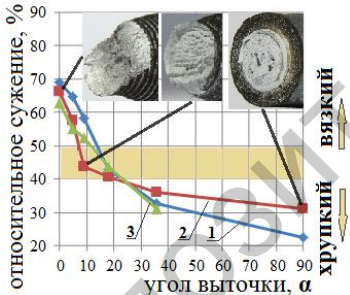


Рисунок 8. – Связь относительного сужения образцов с выточкой с видом излома

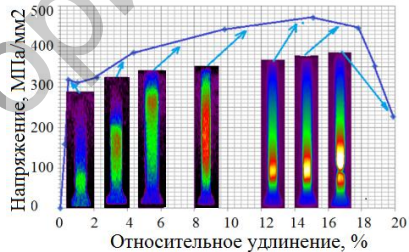


Рисунок 9. – Диаграмма растяжения и вид термограмм в характерных точках

Фронт соответствующих пластическим деформациям тепловых волн распространяется вдоль стержня вплоть до локализации деформации (образования шейки). С этого момента и до разрушения температура поверхности в зоне шейки резко возрастает. Малая скорость движения траверсы испытательной машины (не выше 0,05 мм/с), соответственно, деформирования способствует распространению тепла вдоль оси стержня, нагревая значительный объем металла. Зафиксированная максимальная температура контрольной поверхности гладкого образца в зоне шейки возрастает на 19,4 °С. В образцах «b-c» пластические деформации и теплообразование локализовывалось в ослабленном сечении. Особенностью теплообразова-

ни в образце «e» является то, что вследствие повышения временного сопротивления материала ослабленного сечения примыкающие к выточке части образца работали упруго и равномерно охлаждались (примерно на 0,7–1,1 °С). Из-за локализации деформации в корне выточки образца «e» фиксируемый нагрев поверхности был относительно небольшим (на 0,8 °С), а тепло быстро рассеивалось в материал образца. Образец типа «gr» деформировался при скорости движения траверсы 0,46 мм/с. Во всех 9 выточках образца «gr» развивались пластические деформации. Кольцевые ребра жесткости большой ширины не нагревались, т.е. работали упруго. Значительный нагрев произошел в зоне узких ребер жесткости. Температура боковой поверхности ребер жесткости увеличивалась на 19 °С (температура поверхности выточки увеличивалась на 50,2 °С). При средней скорости перемещения подвижной траверсы 0,5 мм/с (ускоренное нагружение) заметно значительное возрастание температуры поверхности (на 81,4 °С для образца «a»), обусловленное возросшей мощностью деформационных процессов. Термограммы деформирования образца «a» отчетливо выявляют волновой ход процесса деформирования. Вид изломов образцов «b–e» второй серии практически не отличается от соответствующих видов для образцов 1-й серии. В месте локализации деформации (образования шейки) на образцах с выточками наблюдалось наибольшее охлаждение, которое сменялось последующим нагревом (вплоть до максимального при разрушении).

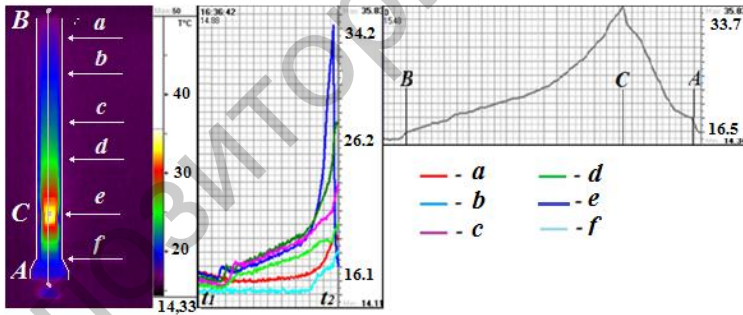


Рисунок 10. – Данные термографии образца «a»: кадр 194

По изложенной в предыдущей главе методике выполнен конечно-элементный расчет напряженно-деформированного состояния стальных плоских листовых образцов с различными конструктивными концентраторами напряжений и балочной модели. Расчетом получено характерное распределение напряженно-деформированного состояния листовых образцов с концентраторами (рисунок 11), при котором внешние и внутренние дефекты связаны полосами пластически деформированного материала. Между этими полосами располагается материал, находящийся в основном в упругом состоянии.

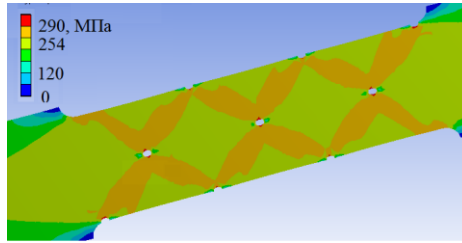


Рисунок 11. – Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в сечениях образца: наибольшее напряжение – 250 – 290 МПа (оранжевый цвет)

Экспериментальные исследования подтвердили проявление основных закономерностей деформирования и теплообразования в таких образцах. Источниками тепла в таких образцах является деформированный металл у концентраторов, а стоком служит боковая поверхность. Накопление тепловой энергии в окрестности надрезов предопределяет и место зарождения разрушения. Не нагруженные второстепенные (нулевые) элементы изменяют жесткость рабочего элемента, условия деформирования стержней и участвуют в отводе тепловой энергии деформирования (рисунок 12).

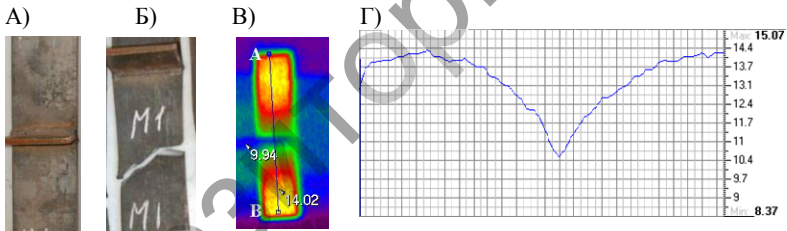


Рисунок 12. – Вид образца с поперечным больsherазмерным элементом жесткости в исходном состоянии (А), после разрушения (Б) термограммы (В) и распределение температуры поверхности вдоль выделенной на термограмме оси АВ (Г)

Элементы экспериментальной двутавровой балки пролетом 1200 мм и высотой 150 мм, с поясами толщиной 10 мм и стенкой толщиной 3 мм, в средней части пролета работают в условиях чистого изгиба, а в приопорных отсеках, в основном, стенка воспринимает поперечную силу, т.е. работает на сдвиг. Тепловое поле в приопорном участке балки в начале потери устойчивости стенки выявляет ту ее часть (полосу), которая работает на растяжение. При изгибе такой балки до предельного состояния температура в точках приопорного участка стенки не изменялась. Ее рост на (3–5) °С замечен только на последней стадии приложения нагрузки. В пролетной части сжатая верхняя полка и примыкающая часть стенки балки имеют более высокую температуру, чем ниж-

няя, растянутая. Участки теплообразования в экспериментальной модели балки хорошо соответствуют результатам моделирования упруго-пластической и пластической стадий работы стальной модели в программной среде ANSYS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Впервые выявлены закономерности теплообразования в растянутых элементах из низкоуглеродистой стали с конструктивно-технологическими концентраторами напряжений, позволившие определять тепловым методом с вероятностью не ниже 95% возникновение зон предельных состояний, участков зарождения трещин и их развития в элементах, находящихся под действием возрастающей квазистатической нагрузки. При использовании современных телевизионных приборов метод применим при стандартных испытаниях машин и их конструктивных элементов и других изделий, является дистанционным, экологически безопасным и экономичным [3, 5, 7, 9, 10].

2. Установлены закономерности локализации пластической деформации и изменения объема деформируемого материала в основании выточек цилиндрических образцов, включающие:

- методику расчета аксиальных напряжений в предельном состоянии растянутых стержней с углом выточки $\alpha = 5 - 90^\circ$, основанную на введении поправочного множителя $\beta = K\alpha + C$, к среднему значению аксиальных напряжений в шейке, подтвержденную конечно-элементными расчетами, где коэффициенты K и C определяются экспериментально по разработанной методике, для низкоуглеродистой стали Ст3 – $K = 0,0114$, $C = 1,0767$, размерность $K - 1/\text{градус}$ [2, 4, 6, 7, 13];

- зависимость величины объема пластически деформируемого материала в основании выточки растянутого стержня от угла выточки α , основанную на результатах экспериментальных исследований и конечно-элементного расчета, в которых установлено, что для $\alpha = 5 - 90^\circ$ объем пластически деформируемого материала уменьшается, например, при изменении угла α от 5° до 18° объем уменьшается в 2,3 раза, что приводит к изменению механизма излома от вязкого к хрупкому, критерием чего является относительное сужение в изломе на 30–40% [2, 8];

- изменения характеристик пластичности низкоуглеродистой стали Ст3 в корне прямоугольных выточек цилиндрических стержней, содержащих группу равно отдаленных между собой выточек с одинаковой геометрией, показывающие, что для образцов круглого сечения с увеличением расстояния между выточками относительное сужение в месте разрушения уменьшается при увеличении отношения ширины выступов к ширине выточек от 1 до 4 в полтора и более раз, что следует учитывать при определении допустимых деформаций для растянутых резьбовых соединений [3, 7 – 9, 15].

3. Экспериментально установленные закономерности теплообразования в образцах из низкоуглеродистой стали заключающиеся в том, что данный процесс сопровождается локализацией теплообразования в конструктивно-технологических концентраторах напряжений, а увеличение скорости дефор-

мирования приводит к возрастанию температуры поверхности в корне выточек экспериментальных стержней, в том числе для углов выточек меньших 10° температура поверхности возрастает при квазистатическом нагружении (скорость траверсы не выше $0,05 \text{ мм/с}$) – на $15\text{--}19,4^\circ\text{C}$, при ускоренном (средняя скорость траверсы $0,5 \text{ мм/с}$) – на $31\text{--}81^\circ\text{C}$, а при угле выточки больше 18° , при квазистатическом нагружении – на $0,7\text{--}1,7^\circ\text{C}$, при ускоренном нагружении – на $6,5\text{--}13,4^\circ\text{C}$, и позволяющие прогнозировать наступление предельного состояния [1, 7, 8, 14].

4. При упругой работе стальной балки температура растянутого пояса понижается на $0,3\text{--}0,4^\circ\text{C}$, а сжатого – повышается на такую же величину. Развитие пластических деформаций в растянутых зонах балки инициирует скачок температуры на поверхности до 5°C , по которому идентифицируется местоположение опасной зоны [3, 9, 11, 12, 16, 17].

Рекомендации по практическому использованию результатов

В производственный процесс предприятия ОАО «Завод сборного железобетона №1» г. Минска внедрены результаты моделирования в программной среде ANSYS работы типичных конструктивных форм с использованием термоупрочненных арматурных стержней, что позволило обеспечить работоспособность арматурных изделий, усовершенствовать технологию их изготовления и эксплуатации (акт внедрения – в приложении А к диссертации).

Внедрение результатов диссертационной работы, включая выявление дефектов в растянутых элементах тепловым пассивным методом, в процесс стендовых испытаний стальных траверс производства СЗАО «ФИДМАШ», позволяет повысить надежность траверс и обеспечить безопасность грузоподъемных работ (акт внедрения – в приложении А к диссертации).

Метод расчетно-экспериментального выявления дефектов в стальной балочной конструкции, обеспечивающий возможность усвоения практических приемов работы с программным комплексом „ANSYS” магистрантами кафедры "Сопротивление материалов и теория упругости" БНТУ, и пример применения инфракрасных технологий при выполнении экспериментально исследовательских работ, позволяющий значительно улучшить качество подготовки специалистов-магистрантов кафедры (акт внедрения – в приложении А к диссертации).

Областями приоритетного применения результатов диссертационной работы являются стальные конструкции и изделия, для обеспечения работоспособности которых необходимо контролировать образование пластических деформаций, зарождение и развитие трещин в элементах, работающих при квазистатических, повторно-переменных, усталостных и динамических нагрузках.

Список публикаций соискателя ученой степени

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК

1. Василевич, Ю.В. О взаимосвязи ударной вязкости стали с деформационным теплообразованием в надрезе / Ю.В. Василевич, А.Е. Мойсейчик, Е.А. Мойсейчик // Машиностроение. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Вып.27. – 2013. – С. 168–172.
2. Мойсейчик, А.Е. Теплообразование и сопротивление деформированию конструкционной стали / А.Е. Мойсейчик, Ю.В. Василевич // Наука и техника. – 2015. – № 5.– С. 33–38.
3. Мойсейчик А.Е. Деформационный нагрев цилиндрических образцов типа Людвика–Шея при растяжении / А.Е. Мойсейчик, Ю.В. Василевич, Е.А. Мойсейчик // Механика машин, механизмов и материалов. – 2015. – № 4 (33). – С. 55–58.

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах

4. Мойсейчик, А.Е. Контроль усилий в стальных элементах коэртициметром КИПФ-1 / А.Е. Мойсейчик // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – №3. – С. 15–20.
5. Мойсейчик, А.Е. Инфракрасная термография растянутых стальных элементов с конструктивно-технологическими дефектами / А.Е. Мойсейчик, Е.К. Мойсейчик, Е.А. Мойсейчик // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – №1.– С. 3–13.
6. Мойсейчик, А.Е. Основы технологии выявления полей деформаций, трещин и скрытых дефектов в стальных подкрановых балках производственных зданий и сооружений с использованием компьютерной термографии / А.Е. Мойсейчик, Ю.В. Василевич, Е.А. Мойсейчик // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. ст. / ОИМ НАН Беларуси, под науч. ред. С.Н. Поддубко. – Минск, 2013. – С. 474–479.
7. Мойсейчик, А.Е. Основы теплового контроля несущих конструкций с использованием деформационного теплообразования / А.Е. Мойсейчик, Е.А. Мойсейчик // Неразрушающий контроль и диагностика. –2014. –№ 3. – С.3–19.
8. Василевич Ю.В. Закономерности деформирования образцов типа Людвика–Шея и образцов с групповыми выточками / Ю.В. Василевич, А.Е. Мойсейчик // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. – Вып. 31. – 2016. – С. 238–241.

Другие издания

9. Мойсейчик, Е.А. Теплообразование в элементах статически нагруженной стальной балки / Е.А. Мойсейчик, А.Е. Мойсейчик, И.А. Пахомчик // Вестник НИЦ «Строительство». – 2012. – С. 53–64.

Материалы конференций

10. Мойсейчик, А.Е. Численное моделирование растянутых стальных об-

разцов с боковыми U-образными вырезами / А.Е. Мойсейчик, Ю.В. Василевич // МИКМУС – 2012: XXIV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 24–26 октября 2012 г. / ИМАШ РАН; редкол.: Н.А. Татусь [и др.]. – Москва, 2012. – С. 120–122.

11. Мойсейчик, А.Е. Неразрушающий контроль стальных подкрановых балок по деформационным тепловым полям поверхности / А.Е. Мойсейчик, Е.А. Мойсейчик // МИКМУС – 2013: Юбилейная XXV Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 13–15 ноября 2013 г. / ИМАШ РАН; редкол.: Н.А. Татусь [и др.]. – Москва, 2013. – С. 216–220.

12. Мойсейчик, А.Е. О физико-аналитической технологии неразрушающего контроля изделий / А.Е. Мойсейчик // Современное состояние и проблемы естественных наук: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов: материалы междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 17–18 апреля 2014 г. / Юргинский технологический институт; редкол.: С.Б. Сапожков [и др.]. – Юрга, 2014. – С. 143–146.

Тезисы докладов

13. Мойсейчик, А.Е. Расчётная оценка деформации в пластине с надрезами / А.Е. Мойсейчик, Е.А. Мойсейчик // Наука–образованию, производству, экономике: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22 апреля 2011 г.: в 4 т. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 214.

14. Мойсейчик А.Е. Дефекты производства арматуры и их термографический контроль / А.Е. Мойсейчик, Ю.В. Василевич, Е.К. Мойсейчик // Наука–образованию, производству, экономике: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23 июля 2011 г.: в 4 т. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 3. – С. 121.

15. Мойсейчик А.Е. Изломы многослойных арматурных стержней при деформировании растяжением / А.Е. Мойсейчик, Ю.В. Василевич, Е.К. Мойсейчик // Наука – образованию, производству, экономике: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23 июля 2011 г.: в 4 т. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 3. – С. 120.

16. Мойсейчик, А.Е. Возможности неразрушающего контроля стальных конструкций по изменению температурных полей в элементах и узлах (на примере подкрановой балки при передвижении мостового крана) / А.Е. Мойсейчик, Е.А. Мойсейчик // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: материалы междунар. науч. конф., Москва, 16–18 октября 2013 г. / Мос. гос. строй. ун-т. – Москва, 2013 – С. 114–116.

17. Мойсейчик А.Е. Деформационное теплообразование при статических испытаниях стальных балок и возможность их неразрушающего контроля с использованием инфракрасных технологий / А.Е. Мойсейчик, Ю.В. Василевич // Сборник научных работ студентов республики Беларусь «НИРС–2013» / редкол.: А.И.Жук (пред.) [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2014. – С. 164–165.

РЭЗІЮМЭ

Майсейчык Аляксандр Яўгенавіч

**РАЗЛІКОВА-ЭКСПЕРЫМЕНТАЛЬНЫ АНАЛІЗ ДЭФАРМАВАННЯ
І РАЗБУРЭННЯ СТАЛЁВЫХ ЭЛЕМЕНТАЎ З КАНЦЭНТРАТАРАМІ
НАПРУЖАННЯ ПА ЭВАЛЮЦЫІ ДЭФАРМАЦЫЙНАГА
ЦЕПЛАЎТВАРЭННЯ**

Ключавыя словы: сталёвыя канструкцыі, пругкапластычнае дэфармаванне, разбурэнне, дэфармацыйнае цеплаўтварэнне.

Аб'ект даследавання: развіццё пластычных дэфармацый і дэфармацыйнае цеплаўтварэнне ў зонах канструктыўна-тэхналагічных канцэнтратараў напружання расцягнутых элементаў сталёвых канструкцый.

Мэта даследаванняў – даследаванне заканамернасцей лакалізацыі пластычных дэфармацый і цеплаўтварэння ў зонах канструктыўна-тэхналагічных канцэнтратараў у стрыжнях з малавуглегляродзістай сталі і распрацоўка навукова-метадычных асноў разлікова-эксперыментальнага аналізу пругкапластычнага дэфармавання, лакалізацыі і зараджэння разбурэння.

Метады даследавання – комплекс сучасных метадаў, якія ўключаюць: аналіз крыніц інфармацыі; выкарыстанне вытворчых і лабараторных эксперыментальных даследаванняў канструктыўных элементаў сталёвых канструкцый з ужываннем сучасных метадык, прыбораў і абсталявання і канечна-элементнага мадэлявання.

Навуковая навізна атрыманых вынікаў – прапанавана новая метадыка разліку аксіяльнага напружання ў папярочным сячэнні вытачкі расцягнутага цыліндрычнага стрыжня, якая заснавана на ўвядзенні ў разлік паправачнага множніка да сярэдняга значэння аксіяльнага напружання, і выкарыстоўвае эфект з'яўлення шыйкі ў вытачцы стрыжня ва ўмовах стрымвання пластычных дэфармацый матэрыялам прымыкаючых выступаў. Эксперыментальна абгрунтавана залежнасць характарыстык пластычнасці ў корані вытачак і выгляду злому ад ухілу паверхні, якая прымыкае да вытачкі расцягнутага стрыжня. Эксперыментальна ўсталяваны заканамернасці працэсу дэфармавання і цеплаўтварэння ў расцягнутых сталёвых элементах з канструктыўна-тэхналагічнымі канцэнтратарамі, складнікамі якіх ёсць ахалоджанне матэрыялу пры яго пружай працы і нагрэў ў зонах лакалізацыі пластычных дэфармацый, з'яўленне разбурэння ў небяспечных перасеках стрыжня.

Ступень выкарыстання: вынікі працы ўкаранены ў вытворчы працэс прадпрыемстваў ААТ «Завод зборнага жалезабетону №1» г. Мінска, СЗАТ «ФІДМАШ», а метады разлікова-эксперыментальнага выяўлення дэфектаў у сталёвай бэлечнай канструкцыі, які забяспечвае магчымасць засваення практычных прыёмаў працы з праграмным комплексам "ANSYS" і прыклад прымянення інфрачырвоных тэхналогій – у навучальных працэсах кафедры «Супраціўленне матэрыялаў і тэорыя пругкасці» БНТУ.

РЕЗЮМЕ**Мойсейчик Александр Евгеньевич****РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ЭВОЛЮЦИИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ТЕПЛООБРАЗОВАНИЯ**

Ключевые слова: стальные конструкции, упруго-пластическое деформирование, разрушение, деформационное теплообразование.

Объект исследования: развитие пластических деформаций и деформационное теплообразование в зонах конструктивно-технологических концентраторов напряжений растянутых элементов стальных конструкций.

Цель исследований – исследование закономерностей локализации пластических деформаций и теплообразования в зонах конструктивно-технологических концентраторов в стержнях из низкоуглеродистой стали и разработка научно-методических основ расчетно-экспериментального анализа упруго-пластического деформирования, локализации и зарождения разрушения.

Методы исследования – комплекс современных методов, которые включают: анализ источников информации; использование производственных и лабораторных экспериментальных исследований конструктивных элементов стальных конструкций с применением современных методик, приборов и оборудования и конечно-элементного моделирования.

Научная новизна полученных результатов – предложена новая методика расчета аксиального напряжения в поперечном сечении выточки растянутого цилиндрического стержня, основанная на введении в расчет поправочного множителя к среднему значению аксиального напряжения и использующая эффект образования шейки в выточке стержня в условиях стеснения пластических деформаций материалом примыкающих выступов. Экспериментально обоснована зависимость характеристик пластичности в корне выточек и вида излома от уклона поверхности, примыкающей к выточкам растянутого стержня. Экспериментально установлены закономерности процесса деформирования и теплообразования в растянутых стальных элементах с конструктивно-технологическими концентраторами, заключающиеся в охлаждении материала при его упругой работе, и нагреве в зонах локализации пластических деформаций, зарождении разрушения в опасных сечениях стержня.

Степень использования: результаты работы внедрены в производственный процесс предприятий ОАО «Завод сборного железобетона №1» г. Минска, СЗАО «ФИДМАШ», а метод расчетно-экспериментального выявления дефектов в стальной балочной конструкции, обеспечивающий возможность усвоения практических приемов работы с программным комплексом „ANSYS” и пример применения инфракрасных технологий – в учебный процесс кафедры «Сопротивление материалов и теория упругости» БНТУ.

SUMMARY

Moyseychik Alexander E.

CALCULUS-EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE DEFORMATION AND DESTRUCTION FOR STEEL ELEMENTS WITH STRESS CONCENTRATORS ON THE EVOLUTION OF DEFORMATION HEAT DEVELOPMENT

Keywords: steel structures, elastic-plastic deformation, destruction, deformation heat formation.

Object of investigation: development of plastic deformations and deformation heat formation in zones of structural and technological stress concentrators of stretched elements of steel structures.

The purpose of the research is to study the regularities of the localization of plastic deformations and heat formation in the zones of constructive technological concentrators in rods made of low-carbon steel and the development of scientific and methodological foundations for the calculation and experimental analysis of elastic-plastic deformation, localization and nucleation of fracture.

Research methods – a complex of modern methods, which include: analysis of information sources; use of industrial and laboratory experimental studies of structural elements of steel structures using modern techniques, instruments and equipment and finite element modeling.

Scientific novelty of the results – A new technique for calculating the axial stress in the cross section of a groove of an elongated cylindrical rod is proposed, based on the introduction of a correction factor in the calculation of the mean value of the axial stress and using the effect of neck formation in the core outflow in conditions of constraining plastic deformations by the material of the adjacent protrusions. The dependence of the ductility characteristics in the root of the recesses and the type of fracture on the surface slope adjacent to the extensions of the stretched rod is experimentally substantiated. The regularities of the process of deformation and heat formation in stretched steel elements with constructive technological concentrators are established experimentally, consisting in cooling the material during its elastic operation, and heating in the zones of localization of plastic deformations, initiation of fracture in dangerous rod sections.

Degree of use: the results of the work are introduced into the production process of the enterprises of JSC "Factory of prefabricated reinforced concrete No. 1" in Minsk, SZAO "FIDMASH", and the method of calculation and experimental detection of defects in a steel beam structure, providing the possibility of mastering practical methods of working with the software complex "ANSYS" and an example of application of infrared technologies – in the educational process of the Faculty of «Resistance of materials and the theory of elasticity» BNTU.

Научное издание

МОЙСЕЙЧИК Александр Евгеньевич

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
И РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ
НАПРЯЖЕНИЙ ПО ЭВОЛЮЦИИ ДЕФОРМАЦИОННОГО
ТЕПЛООБРАЗОВАНИЯ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Подписано в печать 20.10.2017. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 60. Заказ 925.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий №1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.