

На правах рукописи



Шишкин Дмитрий Михайлович

**Методы расчёта остаточных напряжений в поверхностно  
упрочнённых призматических деталях с концентраторами  
напряжений в условиях реологического деформирования**

1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

**Радченко Владимир Павлович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

**Локощенко Александр Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией ползучести и длительной прочности Института механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

**Сазанов Вячеслав Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва», г. Самара

Ведущая организация:

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» (ИМСС УрО РАН) – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, г. Пермь

Защита состоится «23» декабря 2021 г., в 15 час. 30 мин. на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»:

[http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/diss\\_Shishkin.pdf](http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/diss_Shishkin.pdf)

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», главный корпус, учёному секретарю диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02).

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



А.Р. Луц

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы исследования**

Прочностные свойства любого изделия в зависимости от его назначения закладываются на стадии проектирования и определяются, как правило, качеством наружной поверхности – шероховатостью, волнистостью, отсутствием дефектов, качеством точности и т.д. Отклонение от нормированных значений хотя бы одного из приведённых параметров может привести к потере прочности при эксплуатации как отдельно взятого конструктивного элемента, так и всей конструкции в целом. Наличие на поверхности концентраторов напряжений технологического характера или возникающих в процессе эксплуатации приводит к существенной концентрации напряжений в деталях, что приводит к резкому снижению их ресурса по отношению к гладким «бездефектным» элементам конструкций.

Среди известных и существующих на сегодняшний день методов повышения ресурса изделий наиболее универсальными являются методы поверхностного пластического деформирования. Их универсальность заключается в положительном влиянии на микротвёрдость, износостойкость, прочностные и иные характеристики металлов и сплавов с сохранением материалоёмкости изделия за счёт появления приповерхностных остаточных напряжений сжатия, тормозящих раскрытие приповерхностных микротрещин и препятствующих выходу вакансий на поверхность детали.

В процессе эксплуатации упрочнённых деталей при температурно-силовом нагружении при появлении деформаций ползучести происходит релаксация остаточных напряжений. На данный момент методы расчёта релаксации остаточных напряжений вследствие реологического деформирования разработаны лишь для упрочнённых гладких цилиндрических и призматических образцов для различных видов напряжённого состояния. Однако для упрочнённых деталей с различного рода концентраторами напряжений технологического назначения или возникающими в процессе эксплуатации дефектами методы расчёта релаксации в условиях ползучести в научной литературе отсутствуют.

Вышеизложенное определяет актуальность тематики диссертационной работы.

**Объектом исследования** являются призматические детали с концентраторами напряжений типа надрезов и трещиноподобных дефектов после опережающего поверхностного пластического деформирования в условиях высокотемпературного реологического деформирования.

**Предметом исследования** являются методы и математическое обеспечение для решения задач реконструкции остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях с концентраторами напряжений и их релаксации в условиях высокотемпературной ползучести.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов реконструкции остаточного напряжённо-деформированного состояния в призматических образцах с

концентраторами напряжений после опережающего поверхностного пластического деформирования в упругой и упругопластической постановках и методов расчёта релаксации остаточных напряжений в этих деталях в условиях высокотемпературной ползучести.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были поставлены следующие задачи.

1. Разработка метода расчёта остаточных напряжений в призматических деталях с концентраторами напряжений типа сквозных надрезов полукруглого, квадратного, V-образного, полуэллиптического профилей после опережающего поверхностного пластического деформирования в упругой и упругопластической постановках задачи.
2. Исследование влияния формы и геометрических размеров надрезов, величины зоны упрочнения на формирование остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях.
3. Разработка метода для исследования остаточных напряжений в призматической детали с периодически повторяющимися концентраторами напряжений типа сквозных полукруглых надрезов.
4. Исследование влияния угла раскрытия сквозного трещиноподобного дефекта в упрочнённом призматическом образце на формирование остаточных напряжений для упругопластической постановки задачи.
5. Разработка численного метода реконструкции остаточных напряжений в призматическом образце с несквозной поперечной трещиной после опережающего поверхностного пластического деформирования.
6. Разработка метода расчёта релаксации остаточных напряжений в призматических упрочнённых деталях с концентраторами напряжений при высокотемпературной ползучести в условиях термоэкспозиции и силового воздействия при трёхточечном изгибе.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Разработан не имеющий аналогов метод расчёта остаточных напряжений в призматических деталях с концентраторами напряжений в виде сквозных надрезов различного профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования в упругой и упругопластической постановках задачи.
2. Получены новые результаты влияния формы и геометрических размеров надрезов, величины зоны упрочнения на формирование остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях из сплава ЭП742 после ультразвукового виброударного упрочнения и сформулированы рекомендации по оптимизации процесса упрочнения.
3. Разработан и реализован метод для исследования формирования остаточных напряжений в призматической детали с периодической системой концентрато-

ров напряжений после опережающего поверхностного пластического деформирования.

4. Впервые выполнено исследование влияния угла раскрытия сквозного трещиноподобного дефекта в поверхностно упрочнённом призматическом образце на формирование остаточных напряжений для упругопластической постановки задачи.
5. Разработан не имеющий аналогов численный метод реконструкции остаточных напряжений в призматическом образце с несквозной поперечной трещиной после опережающего поверхностного пластического деформирования.
6. Разработан новый метод расчёта релаксации остаточных напряжений в призматических упрочнённых деталях с концентраторами напряжений при ползучести в условиях термосилового воздействия при трёхточечном изгибе, позволяющий учитывать начальное напряжённо-деформированное состояние в упругой и упругопластической постановках задач.

**Теоретическая значимость** работы заключается в разработке новых методов решения задач реконструкции остаточных напряжений в призматических деталях с концентраторами напряжений в виде надрезов и трещиноподобных дефектов после опережающего поверхностного пластического деформирования в упругой и упругопластической постановках задач и метода расчёта релаксации остаточных напряжений в этих элементах конструкций при ползучести, на основании которых получен ряд новых результатов при исследовании влияния типа надреза и его геометрических характеристик, величины зоны упрочнения, периодической системы концентраторов, температурно-силовых факторов нагружения на формирование и релаксацию остаточных напряжений.

**Практическая значимость** работы связана с тем, что в различных отраслях промышленности (авиадвигателестроении, энергомашиностроении, нефтехимическая отрасль и другие) процедура поверхностно пластического деформирования является обязательной штатной технологией, требующей оценки напряжённо-деформированного состояния деталей (в том числе и призматических) с концентраторами напряжений либо технологического назначения, либо приобретённых в процессе эксплуатации после опережающего поверхностного пластического деформирования с последующей оценкой кинетики остаточных напряжений в процессе высокотемпературного реологического деформирования. В связи с этим разработанные методы формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях с концентраторами напряжений могут быть использованы в расчётной практике профильных организаций в области энергетического машиностроения, авиадвигателестроения, машиностроительном комплексе как на стадии проектирования для оценки эффективности поверхностного упрочнения и его влияния на долговечность изделий, так и на стадии эксплуатации после соударения упрочнённых кон-

структивных элементов при возникновении дефектов (царапин, трещин, забоин, вмятин) для оценки остаточного ресурса по параметрическим критериям отказа (по величине остаточных напряжений).

**Диссертация соответствует** основным направлениям исследований специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твёрдого тела».

**Положения, выносимые на защиту**

1. Метод расчёта остаточных напряжений в призматических деталях с концентраторами напряжений в виде сквозных одиночных и периодически повторяющихся надрезов различного профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования, позволяющий впервые получить и анализировать решения в упругопластической постановке.
2. Результаты исследования влияния формы и геометрических параметров надрезов, величины зоны упрочнения, угла раскрытия сквозного трещиноподобного дефекта, пакета периодически повторяющихся надрезов на формирование остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях из сплава ЭП742 после ультразвукового виброударного упрочнения.
3. Не имеющий аналогов численный метод реконструкции остаточных напряжений в призматическом образце с несквозной поперечной трещиной после опережающего поверхностного пластического деформирования.
4. Новый метод расчёта релаксации остаточных напряжений в призматических упрочнённых деталях с концентраторами напряжений при ползучести в условиях термосилового воздействия при трёхточечном изгибе, позволяющий установить начальное напряжённо-деформированное состояние после упрочнения, полученное в упругой и упругопластической постановках задач.
5. Математическое и программное обеспечение для численной реализации разработанных методов решения задач реконструкции и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических элементах конструкций с концентраторами напряжений.

**Степень достоверности и обоснованности выносимых на защиту положений, выводов и рекомендаций** подтверждается адекватностью модельных представлений реальному физико-механическому поведению материала в упрочнённом слое рассмотренных элементов конструкций с концентраторами напряжений после опережающего поверхностного пластического деформирования и в условиях ползучести; корректностью использования математического аппарата, законов и постулатов механики деформируемого твёрдого тела; сравнением результатов расчётов по разработанным методам с известными экспериментальными данными после процедуры упрочнения и в процессе ползучести (в частном случае для гладкого образца и с данными расчётов из независимых источников).

**Основные результаты диссертации** были представлены на следующих научно-технических конференциях: IX Международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (г. Новосибирск, 2020 г.); XXIX Всероссийской школе-конференции «Математическое моделирование в естественных средах» (г. Пермь, 2020 г.); 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ «Прикладная математика и информатика» (г. Москва, 2020 г.); Международной конференции «Актуальные проблемы математики, информатики и механики» (г. Воронеж, 2020 г.); XXII Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2021 г.); XII областной научно-практической конференции молодых специалистов, студентов и школьников «Будущее города – в профессионализме молодых» (г. Новокуйбышевск, 2021 г.); VII Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых учёных «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» (г. Тольятти, 2021 г.); IV Всероссийской научно-практической конференции «Молодежная наука: вызовы и перспективы» (г. Сызрань, 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2021 г.); XXX Всероссийской школы-конференции «Математическое моделирование в естественных науках» (г. Пермь, 2021 г.). Результаты работы докладывались на научном семинаре кафедры «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета (руководитель профессор Радченко В. П., 2020–2021 гг.), на научном семинаре кафедры «Соппротивление материалов» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва (руководитель профессор Павлов В. Ф., 2021 г.).

**Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке** Российского фонда фундаментальных исследований (проект №19-01-00550-а).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них 4 статьи в рецензируемых журналах из перечня Web of Science и Scopus, 2 статьи в сборниках трудов конференций и 6 тезисов докладов.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук В. П. Радченко за постановки задач и поддержку работы.

**Внедрение.** Результаты диссертационной работы частично внедрены в учебный процесс Самарского государственного технического университета в лекционные курсы для студентов направления 01.03.02 «Прикладная математика и информатика» по дисциплине «Численные методы решения краевых задач» и аспирантов направления 01.06.01 «Математика и механика» по дисциплинам «Механика деформируемого твердого тела» и «Математические основы механики поверхностного пластического упрочнения», а также в расчетную практику профильных отделов ПАО «ОДК Кузнецов» (г. Самара).

### **Личный вклад автора.**

Работы [7, 12] выполнены автором самостоятельно. Постановка задач, разработка математических моделей реконструкции остаточного напряжённо-деформированного состояния после упрочнения в рассмотренных элементах конструкций и методов расчёта релаксации остаточных напряжений в процессе ползучести и подготовка к публикации полученных результатов в работах [1–6, 8–11] диссертантом проводилась совместно с соавторами. Исследование полей остаточных напряжений и деформаций после упрочнения и в процессе ползучести при температурно-силовых режимах нагружений, разработка алгоритмического и программного обеспечения, численное решение всех задач, анализ полученных результатов, формулировка основных научных положений и выводов выполнено автором диссертационной работы самостоятельно.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 глав, заключения, библиографии и двух приложений. Общий объём диссертации 168 страниц, из них 147 страниц текста, включая 66 рисунков, 2 приложения. Список литературы включает 158 наименований на 19 страницах.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

#### **Глава 1. Аналитический обзор и постановка задачи**

**В пункте 1.1** приведён обзор литературных источников, посвящённых описанию формирования в деталях остаточных напряжений после технологических операций. Проанализированы представленные в работах И. А. Биргера, А. С. Букатого, В. С. Вакулюка, И. Г. Гринченко, С. И. Иванова, И. Э. Келлера, В. А. Кирпичёва, Б. А. Кравченко, И. В. Кудрявцева, Н. Д. Кузнецова, В. Ф. Павлова, В. П. Радченко, В. П. Сазанова, Ю. П. Самарина, М. Н. Саушкина, П. В. Трусова, В. И. Цейтлина, Л. М. Школьника, J. Almen, H. Bühler, E. Heun, G. Sachs и многих других учёных различные причины появления остаточных напряжений, оказывающих как положительное, так и отрицательное влияние на прочностные свойства элементов конструкций.

**В пункте 1.2** выполнен анализ экспериментальных методов определения остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых гладких деталях и деталях с концентраторами напряжений. Показано, что существуют определённые трудности для экспериментального исследования остаточных напряжений в упрочнённых образцах и отмечено, что получить полную оценку напряжённого состояния таких тел только экспериментальным путём невозможно.

**В пункте 1.3** описаны аналитические и феноменологические подходы реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций поверхностно

упрочнённых образцов, позволяющие получить полную картину их распределения на основе одной-двух экспериментально полученных компонент тензора остаточных напряжений. Отмечается бурный рост количества публикаций оценки напряжённо-деформированного состояния упрочнённых тел с концентраторами напряжений и гладких деталей в связи с существенным развитием вычислительных методов на основе компьютерного программного обеспечения.

**В пункте 1.4** выполнен анализ экспериментальных и теоретических работ по оценке кинетики остаточных напряжений в упрочнённых деталях в условиях ползучести. Отмечается трудность исследования релаксации остаточных напряжений экспериментальными методами в силу длительности испытаний при ползучести в условиях высоких температур и измерениями полей остаточных напряжений в промежуточных временных сечениях, что является достаточно трудоёмкой и технически сложной задачей. Проанализированы работы в этом направлении И. Г. Гринченко, И. В. Кудрявцева, Л. М. Сулимы, О. В. Колотниковой, В. И. Цейтлина, В. Ф. Павлова и Г. И. Иванова с соавторами, В. П. Радченко с соавторами, D. J. Buchanan, R. John, V. J. Foss, J. Hoffman, M. Khadraoui и многих других. Из немногочисленных работ теоретической направленности выделены публикации О. В. Колотниковой, Т. И. Бербасовой, В. П. Радченко, М. Н. Саушкина, В. В. Цветкова, В. И. Цейтлина, с использованием идей которых развивалась тематика настоящего диссертационного исследования.

**В пункте 1.5** подробно рассмотрены методы оценки влияния остаточных напряжений на сопротивление усталостному разрушению цилиндрических полых и сплошных образцов, разработанные в научной школе Самарского национального исследовательского университета на кафедре «Сопротивление материалов» под руководством С. И. Иванова и В. Ф. Павлова, поскольку распределение остаточных напряжений по глубине упрочнённого слоя непосредственно связано с критериальными зависимостями по оценке повышения сопротивления усталости упрочнённых образцов с концентраторами напряжений по отношению к неупрочнённым образцам.

**Глава 2. Метод восстановления остаточных напряжений в призматических деталях с концентраторами напряжений после опережающего поверхностного пластического деформирования в упругой постановке**

**В пункте 2.1** приведена упругая постановка задачи главы 2.

**В пункте 2.2** приведён феноменологический метод реконструкции остаточных напряжений (ОН) и пластических деформаций (ПД) в поверхностно упрочнённом гладком призматическом образце, поскольку информация о напряжённо-деформированном состоянии (НДС) после упрочнения для гладкого образца является исходной в развиваемом далее методе расчёта ОН в деталях с концентраторами напряжений. Решение построено в декартовой системе координат, оси  $Ox$  (продольная координата) и  $Oz$  (поперечная координата) совмещены с упрочнённой поверхностью,

ось  $Oy$  направлена по глубине упрочнённого слоя. Тогда на основе известного распределения компоненты ОН  $\sigma_x = \sigma_x(y)$  получено<sup>1</sup>:

$$\sigma_z(y) = \frac{1 + \alpha\nu}{\alpha + \nu} \sigma_x(y), \quad q_z(y) = -\frac{1 - \nu^2}{E(\alpha + \nu)} \sigma_x(y), \quad q_x(y) = \alpha q_z(y), \quad q_y(y) = -(1 + \alpha)q_z(y), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – параметр анизотропии поверхностного упрочнения,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Таким образом, если известна экспериментальная зависимость  $\sigma_x = \sigma_x(y)$ , то задача реконструкции ОН и ПД решена. При этом экстраполяция известной экспериментальной компоненты  $\sigma_x = \sigma_x(y)$ , заданной в тонком упрочнённом слое, на все значения  $0 \leq y \leq H$  ( $H$  – толщина призматического образца) осуществляется с использованием зависимости

$$\sigma_x(y) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\left(\frac{y - y^*}{b}\right)^2\right), \quad (2)$$

где  $\sigma_0, \sigma_1, b$  и  $y^*$  – параметры аппроксимации, с использованием условия самоуравновешенности

$$\int_0^H \sigma_y(y) dy = 0. \quad (3)$$

Соотношения (1)–(3) представляют первый этап численного метода реконструкции ОН и ПД в поверхностно упрочненном гладком призматическом образце.

На следующем этапе расчёта компоненты тензора остаточных ПД  $q_i = q_i(y)$  ( $i = x, y, z$ ), численные значения которых получены по соотношениям (1), моделируются псевдотемпературными деформациями в неоднородном температурном поле. Расчётный этап сводится к вычислению коэффициентов температурного расширения из решения температурной задачи с граничными условиями 1-го рода:

$$\beta_i(T(y)) = \frac{T(y) - T_0}{q_i(y)} \quad (i = x, y, z), \quad (4)$$

где  $T = T(y)$  – температурное поле, заданное произвольным образом,  $T_0 = \text{const}$  – фиксированное значение температуры на нижней неупрочнённой грани образца (при  $y = H$ ).

Третий этап заключается в переносе полученных результатов псевдотемпературных деформаций (4) в блок прочностных расчётов для построенной в ANSYS конечно-элементной модели образца, после чего на четвёртом этапе численно решается задача фиктивной термоупругости.

Для проверки адекватности конечно-элементной математической модели выполнено сравнение результатов расчёта по этой модели с данными по зависимостям

<sup>1</sup>Радченко В. П., Саушкин М. Н., Бочкова Т. И. Математическое моделирование формирования и релаксации остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в условиях высокотемпературной ползучести // Вестник ПНИПУ. Механика. 2016. № 1. С. 93–112.

(1) и с экспериментальными данными для образца  $100 \times 10 \times 10$  мм из сплава ЭП742 после виброударного упрочнения одной из граней. Наблюдается хорошая согласованность расчётов по обеим моделям с экспериментальными данными. В дальнейшем призматический образец указанных геометрических размеров из сплава ЭП742 использовался во всех последующих расчётах в качестве модельного.

В пункте 2.3 рассматривается аналогичное решение задачи в упругой постановке применительно к образцу с полукруглым надрезом радиуса  $\rho$ , нанесённым по технологии опережающего поверхностного пластического деформирования (ОПД) на упрочнённый поверхностный слой верхней грани в центральном сечении, при различной высоте образца  $H \in [0; 10]$  мм. Алгоритм решения заключается в повторении первого и второго расчётных этапов для образца, когда надрез отсутствует. На третьем этапе моделируется процедура удаления части упрочнённого слоя радиусом  $\rho$ , в результате чего происходит перераспределение ОН в зоне концентратора напряжений. Дальнейшее исследование проводится и для других типов сквозных надрезов – квадратного, V-образного и полуэллиптического сечений. Анализ полученных результатов для всех расчётных случаев образца с надрезом показывает, что если глубина поперечного надреза рассмотренных типов не превышает толщины упрочнённого слоя, то величина компоненты  $\sigma_x = \sigma_x(y)$  в непосредственной близости от дна концентратора существенно превышает (по модулю) аналогичную величину для гладкого поверхностно упрочнённого призматического образца. Если же глубина надреза больше толщины упрочнённого слоя, то ОН в наименьшем сечении меньше (по модулю), чем в гладком образце. Установлена зависимость уровня ОН для всех компонент тензора  $\sigma_i = \sigma_i(y)$  ( $i = x, y, z$ ) в зависимости от величины концентрации напряжений. В качестве примера на рис. 1 приведено распределение компонент  $\sigma_x = \sigma_x(h)$  и  $\sigma_y = \sigma_y(h)$  от дна концентратора по глубине упрочнённого слоя  $h$  при  $H = 10$  мм для гладкого образца, образца с надрезом квадратного сечения со стороной  $a$ , V-образного надреза с глубиной  $b$  и углом раскрытия при вершине  $\varphi$ , полуэллиптического надреза с отношением полуосей  $c/d = 1/5$  при фиксированном значении  $c$ . Из этого рисунка видно, что концентрация напряжений существенно влияет на распределение ОН, причём для V-образного и полуэллиптического надрезов решения задач в упругой постановке дают завышенные результаты, не имеющие реальной трактовки.

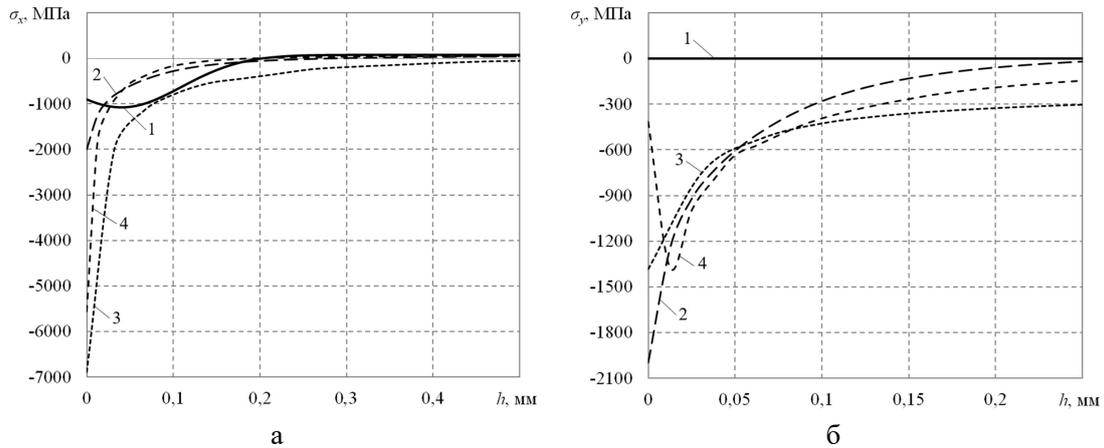


Рис. 1. Распределение компонент  $\sigma_x = \sigma_x(y)$  и  $\sigma_y = \sigma_y(h)$  от дна концентратора по глубине упрочнённого слоя  $h$  при  $H = 10$  мм: 1 – гладкий образец, 2 –  $a = 0,1$  мм, 3 –  $b = 0,1$  мм,  $\varphi = 15^\circ$ , 4 –  $c = 0,1$  мм

В пункте 2.4 оценивается влияние размера зоны упрочнения ( $k$ ) в области полукруглого надреза того же образца на характер распределения и уровень ОН. Здесь упрочнению подвергается не вся верхняя грань образца, а лишь малая её часть относительно концентратора. Из анализа результатов расчёта следует, что в гладком образце (см. рис. 2,а) распределение  $\sigma_x = \sigma_x(y)$  в центральном сечении при  $k > 8$  мм практически не изменяется и близко к напряжённому состоянию для гладкой модели образца с полностью упрочненной гранью. При наличии надреза  $\rho = \{0,1; 0,3; 0,5\}$  мм в образце аналогичное распределение напряжений практически стабилизируется и близко к случаю упрочнения всей грани также при  $k \geq 8$  мм.

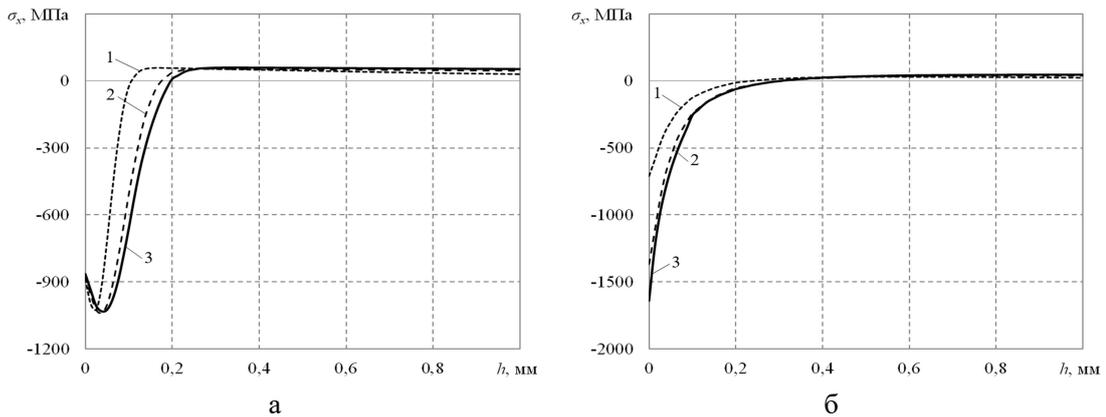


Рис. 2. Распределение  $\sigma_x = \sigma_x(y)$  в гладком образце (а) и в центральном сечении образца с надрезом  $\rho = 0,1$  мм (б) в зависимости от величины  $k$ : 1 –  $k = 2$  мм, 2 –  $k = 6$  мм, 3 –  $k = 50$  мм (а),  $k = 49,9$  мм (б)

В пункте 2.5 проводится исследование полей ОН для случая упрочнённого образца с периодически повторяющимися полукруглыми надрезами в количестве  $n = \{3; 5; 7; 9\}$ . Алгоритм численного решения задачи в рассматриваемом случае отли-

чается лишь особенностью геометрического и конечно-элементного моделирования концентраторов образца в зависимости от их количества. Анализ данных расчёта (рис. 3) свидетельствует о том, что периодическая система концентраторов существенно «ослабляет» поверхностно упрочнённый образец, поскольку величины ОН от дна любого концентратора становятся существенно меньше (по модулю), чем в гладком образце. При этом при глубине надреза, меньшем толщины упрочнённого слоя, ОН ещё сохраняют значительную величину (особенно при  $n = 3$  и  $n = 5$ ). Маркеры на рис. 3 соответствуют порядковой нумерации концентраторов по мере удалённости от центрального (маркер 5) симметрично слева и справа: {1, 9}, {2, 8}, {3, 7}, {4, 6}. Маркер 0 соответствует распределению ОН в гладком упрочнённом образце.

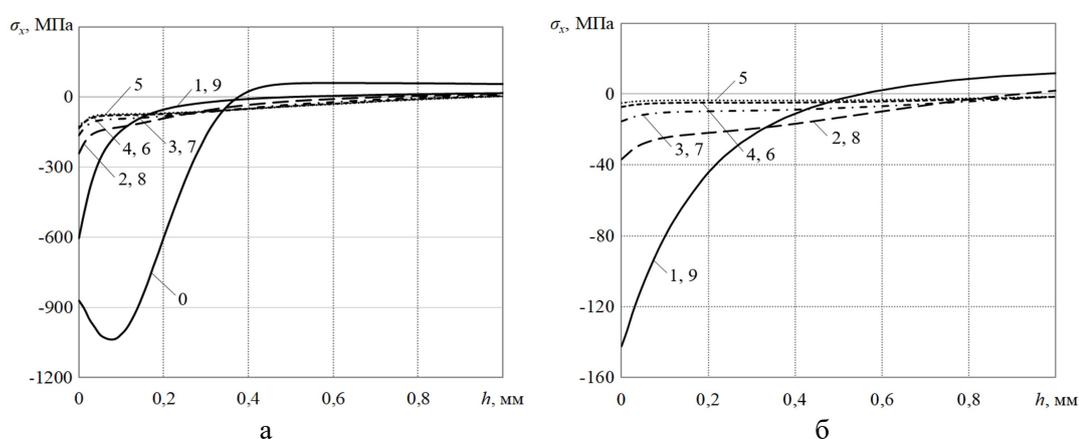


Рис. 3. Распределение компоненты  $\sigma_x = \sigma_x(y)$  для случая  $n = 9$ : а – при  $\rho = 0,1$  мм, б – при  $\rho = 0,3$  мм

В пункте 2.6 сформулированы выводы по главе 2.

**Глава 3. Методы восстановления остаточных напряжений в призматических упрочнённых деталях с концентраторами напряжений в упругопластической постановке.**

В пункте 3.1 приведена упругопластическая постановка задачи главы 3.

В пункте 3.2 приведена методика расчёта ОН в призматическом образце с учётом вторичных пластических деформаций, возникающих в концентраторах напряжений после их нанесения на упрочнённую поверхность (в соответствии с процедурой ОПД) вследствие перераспределения ОН. Отличие данной постановки задачи от упругой заключается в том, что на последнем этапе необходимо решать задачу фиктивной термоупругопластичности. Поскольку в качестве вычислительного инструмента используется пакет ANSYS, то необходимо иметь диаграмму упругопластического деформирования с монотонно возрастающей функцией  $\sigma_0 = \sigma_0(\varepsilon)$ , где  $\sigma_0$  – номинальное напряжение,  $\varepsilon$  – деформация. Но при развитых пластических деформациях экспериментальная диаграмма  $\sigma_0 \sim \varepsilon$  не является монотонной и имеет участок разупрочнения (в том числе и для сплава ЭП742, см. рис. 4). Поэтому в настоящей диссертацион-

ной работе предлагается использовать диаграмму не в координатах  $\sigma_0 \sim \varepsilon$ , а в координатах  $\sigma \sim \varepsilon$ , где  $\sigma$  – истинное напряжение, связанное с  $\sigma_0$  в соответствии с теорией реологического деформирования соотношениями<sup>2</sup>:

$$\sigma = \sigma_0(1 + \omega), \quad \dot{\omega} = \gamma \sigma \dot{q}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – параметр повреждённости,  $q$  – пластичная деформация,  $\gamma = \text{const}$  (феноменологический параметр),  $\sigma$  и  $\sigma_0$  соответствуют одному и тому же уровню пластической деформации  $q$ . При этом для жёсткого режима нагружения одноосного образца ( $\dot{\varepsilon} = \text{const}$ ) получена неявно заданная зависимость  $\sigma_0 = \sigma_0(q)$ :

$$q = c \left[ \sigma_0 \exp \left( \int_0^q \gamma \sigma_0(\xi) d\xi \right) - \sigma_T \right]^n, \quad (6)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести (пропорциональности),  $c$  и  $n$  – параметры модели.

На рис. 4 приведены диаграммы деформирования для сплава ЭП742 для истинных и номинальных напряжений. Для реализации численного метода расчёта в упругопластической постановке использовались те же расчётные (конечно-элементные) модели, что и при решении задач фиктивной термоупругости. Подробно проанализированы поля ОН для сквозных надрезов полукруглого, квадратного, V-образного и полуэллиптического профилей, полученных решением задачи в упругопластической постановке.

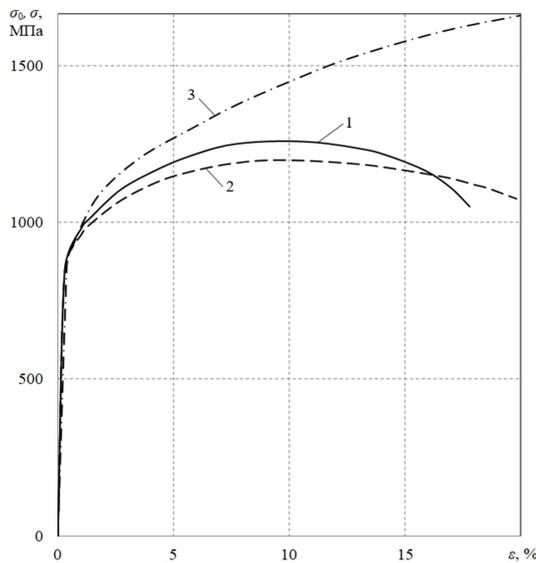


Рис. 4. Кривые упругопластического деформирования сплава ЭП742 при  $T = 20$  °С: 1 – экспериментальные данные, 2 – расчёт в координатах  $\sigma_0 \sim \varepsilon$ , 3 – расчёт в координатах  $\sigma \sim \varepsilon$

На основе полученных данных сделан вывод, что значительное расхождение наблюдается между результатами остаточных сжимающих напряжений из решения задач фиктивной термоупругости и термоупругопластичности по мере увеличения концентрации напряжений в области поперечного сквозного надреза. В качестве примера на рис. 5 приведена типичная картина для компоненты  $\sigma_x = \sigma_x(y)$ , полученная при решении задачи с V-образным надрезом ( $b$  – глубина надреза).

**В пункте 3.3** проводится исследование влияния угла  $\varphi$  сквозного V-образного надреза на характер распределения и уровень остаточных сжимающих напряжений вблизи концентратора при  $b = \{0,1; 0,3\}$  мм. В ходе изучения полученных результатов между упругим и уп-

<sup>2</sup>Радченко В. П., Ерёмин Ю. А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. М.: Машиностроение-1, 2004. 264 с.

ругоупругими решениями задачи отмечается, что по мере увеличения угла раскрытия расхождение между результатами ОН в указанных постановках задач уменьшается.

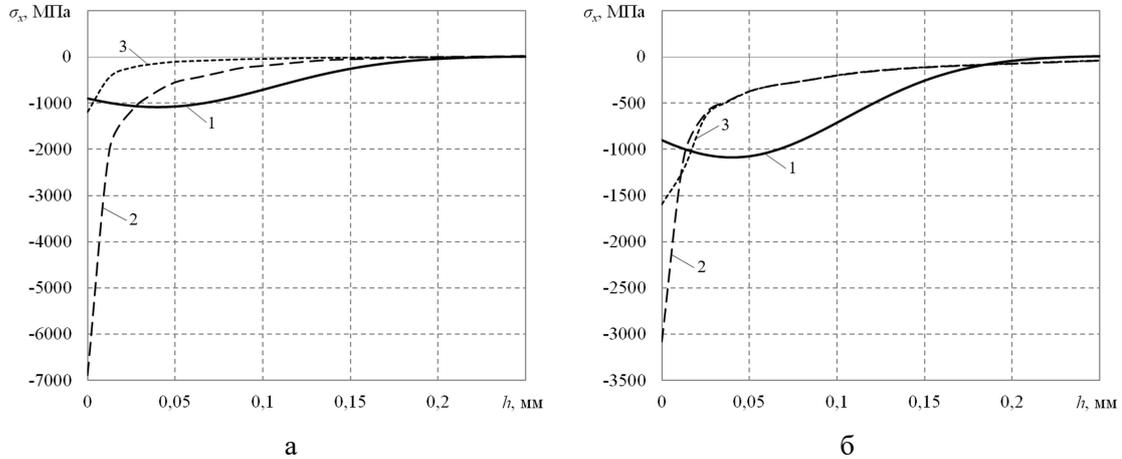


Рис. 5. Распределение  $\sigma_x = \sigma_x(y)$  в зоне концентратора V-образного профиля с углом раскрытия  $\varphi = 15^\circ$  при  $b = 0,1$  мм (а) и  $b = 0,3$  мм (б): 1 – гладкий образец, 2 – упругое решение, 3 – решение в упругопластической постановке

**В пункте 3.4** решается упругопластическая задача для образца с несквозной поперечной трещиной (царапиной), образованной, например, в процессе эксплуатации при соударении поверхностно упрочнённой детали с инородным твёрдым телом. Отмечается, что сложность построения расчётной конечно-элементной модели в программной среде ANSYS для данного случая в разы больше, чем при построении модели для сквозного концентратора. В процессе решения исследованы поля ОН в различных сечениях упрочнённой детали в области несквозного концентратора напряжений. Из полученных результатов для данной задачи сделан вывод о целесообразности применения разработанной методики решения задачи в упругопластической постановке как для случая, когда дефект находится в тонком упрочнённом слое, так и для случая выхода концентратора в область основного материала образца.

**В пункте 3.5** сформулированы выводы по главе 3.

#### **Глава 4. Исследование релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом призматическом образце с концентраторами напряжений типа сквозных надразов в условиях ползучести**

**В пункте 4.1** приведена постановка задачи главы 4.

**В пункте 4.2** предварительно для отработки конечно-элементной модели и её экспериментальной проверки рассматривается решение задачи релаксации ОН в упрочнённом гладком (бездефектном) призматическом образце ( $100 \times 10 \times 10$  мм) из сплава ЭП742 в условиях термоэкспозиции при ползучести в течение 100 часов при  $T = 650$  °С. В качестве начального НДС при  $t = 0$  для гладкой балки использовалось решение на основе метода конечных элементов в упругой постановке при  $T_0 = 20$  °С и

модуле Юнга  $E_0(T_0) = 2,21 \cdot 10^5$  МПа. При температуре  $T_1 = 650$  °С использовались значения  $E_1(T_1) = 1,96 \cdot 10^5$  МПа. Основным элементом методики является выбор теории ползучести. Для сплава ЭП742 при  $T = 650$  °С деформация ползучести, накопленная на первой стадии, незначительна<sup>2</sup>, и ей можно пренебречь и использовать в расчётах лишь деформацию установившейся ползучести. Поэтому в качестве математической модели, позволяющей учитывать установившуюся стадию ползучести материала, выбирается степенная модель Нортона, заложенная в соответствующей библиотеке теорией ползучести в пакете ANSYS в виде (для одноосного напряжённого состояния)

$$\dot{\rho} = \beta \sigma^n,$$

где  $\beta$  и  $n$  – константы материала.

Результаты решения по методу конечных элементов, а также их сравнение с экспериментальными данными и данными расчёта, выполненных по методу сеток<sup>1</sup>, представлены на рис. 6, анализ которых свидетельствует о хорошей коррелированности расчётов по обоим численным методам с экспериментальными данными. Этот факт свидетельствует об адекватности метода на основе метода конечных элементов в данном частном случае для гладкого образца, что даёт основание применять разработанную модель и в расчётах ползучести поверхностно упрочнённых призматических образцов с концентраторами напряжений.

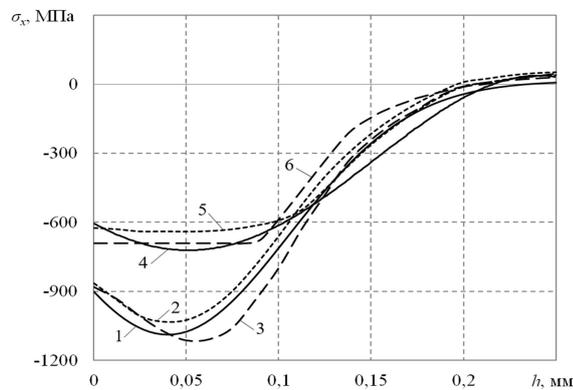


Рис. 6. Графики для компоненты  $\sigma_x = \sigma_x(y, t)$  при ползучести: 1 – экспериментальные данные при  $t = 0$  (после упрочнения), 2 – расчётные данные по методу конечных элементов ( $t = 0$ ), 3 – расчётные данные по методу сеток<sup>1</sup> ( $t = 0$ ), 4 – экспериментальные данные при  $t = 100$  ч, 5 – расчётные данные по методу конечных элементов ( $t = 100$  ч), 6 – расчётные данные по методу сеток<sup>1</sup> ( $t = 100$  ч)

**В пункте 4.3** рассматривается решение задачи упрочнённого образца с концентратором напряжений (полукруглый и V-образный надрезы) в условиях термоэкспозиции и при термосиловом нагружении для схемы трёхточечного изгиба. Для случая температурно-силового воздействия исследуемый образец с концентратором подвергается нагружению распределённой нагрузкой  $q = 90$  Н/мм, действующей вертикально вверх со стороны нижней грани в центральном поперечном сечении. В качестве

примера на рис. 7 приведена кинетика продольной компоненты  $\sigma_x = \sigma_x(h)$  ( $h$  – глубина от дна надреза) в процессе ползучести для образцов с полукруглым надрезом и для сравнения – для гладкого образца. По результатам расчётов для образцов с полукруглым и V-образным надрезами установлено, что учёт пластических деформаций для начального НДС сказывается на скорости релаксации ОН в зоне от 20 до 50 мкм от дна концентратора напряжений и при малых временах ползучести, а затем решения с упругим и упругопластическим начальным НДС становятся близкими.

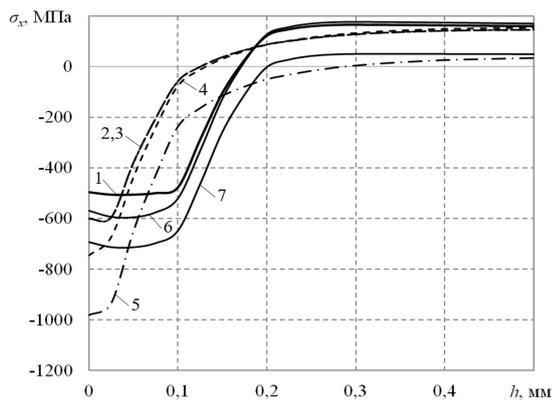


Рис. 7. Кинетика компоненты  $\sigma_x(y)$  в условиях температурно-силового воздействия при  $T = 650^\circ\text{C}$  и  $q = 90$  Н/мм в момент времени  $t = 100$  ч для образца с полукруглым надрезом  $\rho = 0,1$  мм. Маркеры: 1 – гладкий образец, 2 – упругое решение для образца с надрезом, 3 – упругопластическое решение для образца с надрезом, 4 – температурная разгрузка упругого образца с надрезом, 5 – силовая разгрузка упругого образца с надрезом, 6 – температурная разгрузка гладкого образца, 7 – силовая разгрузка гладкого образца

**В пункте 4.4** сформулированы выводы по главе 4.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Разработан не имеющий аналогов численный метод реконструкции полей остаточных напряжений в призматических телах со сквозными поперечными надрезами различного типа и несквозными поперечными трещиноподобными дефектами после процедуры опережающего поверхностного пластического деформирования в упругой и упругопластической постановках.
2. Обоснована целесообразность учёта деформаций пластичности материала при оценке остаточных напряжений в призматическом упрочнённом образце при наличии поверхностных концентраторов напряжений независимо от их геометрии и природы возникновения.
3. Для гладких образцов и образцов с надрезами установлены оптимальные области локального упрочнения поверхности, за границами которых напряжённо-деформированное состояние практически стабилизируется.

4. Разработан и реализован метод исследования формирования остаточных напряжений в призматической детали с периодической системой концентраторов напряжений.
5. Впервые выполнено исследование влияния угла раскрытия сквозного трещиноподобного дефекта в упрочнённом призматическом образце на формирование остаточных напряжений в упругопластической постановке.
6. Разработан не имеющий аналогов численный метод реконструкции остаточных напряжений в призматическом упрочнённом образце с несквозной трещиной после опережающего поверхностного пластического деформирования.
7. Разработана численная методика и впервые решены задачи расчёта релаксации остаточных напряжений при температурно-силовом нагружении при ползучести в призматическом образце с поперечными одиночными сквозными надрезами полукруглого и V-образного профилей на основе метода конечных элементов.
8. Исследовано влияние начального напряжённо-деформированного состояния после упрочнения, рассчитанного в упругой и упругопластической постановках, на последующую релаксацию остаточных напряжений вследствие ползучести для призматического образца из сплава ЭП742 при  $T = 650$  °С с надрезами полукруглого и V-образного профилей.

**Публикации в изданиях из перечня ВАК, проиндексированных  
в базах Scopus и Web of Science**

1. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Метод реконструкции остаточных напряжений в призматическом образце с надрезом полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20, № 4. С. 478–492.
2. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Влияние размеров области поверхностного упрочнения на напряжённо-деформированное состояние балки с надрезом полукруглого профиля // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 24, № 4. С. 663–676.
3. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Численный метод расчёта напряжённо-деформированного состояния в призматическом поверхностно упрочнённом образце с надрезом в упругой и упругопластической постановках // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2021. Т. 21, № 4.
4. Радченко В. П., Бербасова Т. И., Шишкин Д. М. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом призматическом образце в условиях нагрузки при двухосном нагружении // Прикладная механика и техническая физика. 2021. Т. 62, № 5.

**Публикации в других изданиях (остальные)**

5. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Влияние надреза полукруглого профиля на напряжённо-деформированное состояние поверхностно-упрочнённой балки // Тезисы XXIX Всероссийской школы-конференции «Математическое моделирование в естественных науках». Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. С. 100.
6. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Методика реконструкции остаточных напряжений в надрезах балочных элементов после опережающего поверхностного пластического упрочнения // Тезисы докладов IX Международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». Новосибирск: Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, 2020. С. 219.
7. Шишкин Д. М. Исследование напряжённо-деформированного состояния упрочнённой балки с периодически повторяющимися концентраторами // Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Прикладная математика и информатика. М.: Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 2020. С. 180–182.
8. Радченко В. П., Шишкин Д. М., Глушков С. В. Влияние периодически повторяющихся концентраторов напряжений на величину остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое балки // Сборник трудов Международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики». Воронеж: Изд-во «Научно-исследовательские публикации», 2021. С. 1031–1037.
9. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Метод расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённой балке с надрезами в упругой и упругопластической постановках // Тезисы докладов XXII Зимней школы по механике сплошных сред. 2021. Пермь: Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, 2021. С. 268.
10. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Параметрический анализ влияния геометрических характеристик концентратора напряжений на напряжённо-деформированное состояние в поверхностно упрочнённой призматической балке // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сборник докладов Междунар. научн.-техн. конф. Т. 2. Самара: Самарский университет, 2021. С. 348–349.
11. Повышение прочности призматического образца с надрезами профильной формы после процедуры опережающего поверхностного пластического деформирования // Тезисы докладов XII областной научно-практической конференции молодых специалистов «Будущее города – в профессионализме молодых». Самара: Изд-во «Вектор», 2021. С. 83–84.
12. Шишкин Д. М. Влияние пластического течения вблизи концентратора напряжений в поверхностно упрочнённой призматической балке на величину остаточных напряжений при высокотемпературной ползучести // Молодежная наука: вызовы и перспективы. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Самара: Самарский государственный технический университет, 2021. С. 297–303.

*Научное издание*

Шишкин Дмитрий Михайлович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук на тему:

Методы расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических  
деталях с концентраторами напряжений в условиях реологического деформирования

Подписано в печать \_\_. \_\_\_\_\_.2021. Формат 60×84 1/16. Набор компьютерный.  
Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № 250. Отпечатано на ризографе. ФГБОУ ВО «Самар-  
ский государственный технический университет», Отдел типографии и оперативной печати  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.