

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д. ф.-м. н., проф.

Радченко Владимир Павлович

Содержание

Введение	5
Глава 1. Аналитический обзор и постановка задачи.....	14
1.1. Формирование остаточных напряжений в деталях после технологических операций	18
1.2. Экспериментальные методы определения остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых гладких деталях и с концентраторами напряжений.....	26
1.3. Аналитические и феноменологические методы восстановления остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочнённых элементах конструкций	32
1.4. Методы расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых элементах конструкций в условиях ползучести	35
1.5. Методы оценки влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости.....	40
1.6. Выводы по главе 1	45
Глава 2. Метод восстановления остаточных напряжений в призматических деталях с концентраторами напряжений после опережающего поверхностного пластического деформирования в упругой постановке.....	46
2.1. Постановка задачи	46
2.2. Численный метод восстановления остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых гладких призматических деталях на основе метода начальных деформаций	47
2.3. Метод восстановления остаточных напряжений в призматическом образце со сквозными надрезами различного профиля и с трещиноподобными дефектами после опережающего поверхностного	

пластического деформирования на основе начальных термоупругих деформаций.....	60
2.4. Исследование влияния величины зоны упрочнения в области надреза полукруглого профиля призматического образца на характер и величину остаточных напряжений в упругой постановке.....	73
2.5. Исследование остаточных напряжений в призматическом поверхностно упрочнённом образце с периодически повторяющимися концентраторами напряжений типа сквозных полукруглых надрезов	76
2.6. Выводы по главе 2	83
Глава 3. Методы восстановления остаточных напряжений в призматических упрочнённых деталях с концентраторами напряжений в упругопластической постановке.....	84
3.1. Постановка задачи	84
3.2. Разработка и реализация метода расчёта полей остаточных напряжений в области сквозных надрезов различного профиля поверхностно упрочнённого призматического образца в упругопластической постановке	85
3.3. Исследование влияния угла раскрытия сквозного трещиноподобного дефекта в упрочнённом призматическом образце на формирование остаточных напряжений в упругопластической постановке	96
3.4. Численный метод восстановления остаточных напряжений для призматического образца с несквозной поперечной трещиной в упругопластической постановке	103
3.5. Выводы по главе 3	117
Глава 4. Исследование релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом призматическом образце с концентраторами напряжений типа сквозных надрезов в условиях ползучести.....	118
4.1. Постановка задачи	118

4.2. Решение задачи расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом гладком образце при ползучести методом конечных элементов и её экспериментальная проверка в условиях термоэкспозиции.....	120
4.3. Исследование релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом образце с полукруглыми и V-образными надрезами при ползучести в условиях термоэкспозиции и силового воздействия в упругопластической постановке	128
4.4. Выводы по главе 4	145
Заключение	146
Список литературы	149
Приложение А	168
Приложение Б	169

Введение

Актуальность работы. 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. При этом учесть всевозможные факторы предварительного выхода детали из строя затруднительно ввиду их разнообразия и отсутствия явной взаимосвязи между собой, различной природы возникновения поверхностных дефектов и иных причин. Нанесение же на поверхность концентраторов напряжений технологического характера или возникающих в процессе эксплуатации приводит к существенной концентрации напряжений.

Приведённые практически во всех имеющихся публикациях результаты научных исследований, связанные с описанием особенностей наличия поверхностных концентраторов напряжений малой конфигурации в конструктивных изделиях на их обобщённое напряжённо-деформированное состояние (НДС), демонстрирует резкое занижение механических характеристик материалов по отношению к гладким «бездефектным» конструкциям. Главной причиной локального ослабления изделий и частичной утраты способности противостоять действующим нагрузкам является склонность к образованию и развитию трещин в таких концентраторах, как царапины, вмятины, риски, канавки и т.д.

Среди известных и существующих на сегодняшний день методов повышения ресурса изделий наиболее универсальными являются методы поверхностного пластического деформирования (ППД). 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 (ОН) сжатия, тормо-

зующих раскрытие приповерхностных микротрещин и препятствующих выходу вакансий на поверхность детали. Такая методика упрочнения деталей неоднократно доказала свою практическую ценность при решении значительного количества инженерных задач за счёт наведения ОН сжатия и пластических деформаций (ПД) в виде локального (по глубине) наклёпа в поверхностном слое изделий [4, 42, 70, 89].

Наиболее исследованной является проблема повышения характеристик усталостной прочности деталей с концентраторами напряжений после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД), когда различного рода концентраторы технологического характера или возникающие дефекты в процессе эксплуатации (царапины, вмятины, трещины) после соударения конструктивных элементов с инородными телами наносятся на предварительно упрочнённую гладкую поверхность. В преобладающем количестве работ, посвящённых раскрытию этой тематики, задачи решаются в упругой постановке, т.е. предполагается, что после нанесения концентратора напряжений на предварительно упрочнённую поверхность не возникают вторичные пластические деформации вследствие перераспределения напряжений. Однако при использовании решения задачи в концентраторах напряжений упрочнённых деталей в упругой постановке игнорируется область интенсивной концентрации напряжений, а, как известно, для плоских задач полубесконечных трещин нормального отрыва, поперечного сдвига и продольного (антиплоского) сдвига напряжения вообще имеют сингулярность в её вершине. Это, в свою очередь, приводит к существенно завышенным расчётным значениям напряжений в области концентратора напряжений. Поэтому естественным образом возникает проблема оценки НДС в области концентратора напряжений в упругопластической постановке, т.е. с учётом вторичных пластических деформаций, после ОППД, решение которой в научной практике находится в стадии первичной разработки.

В процессе эксплуатации упрочнённых деталей при температурно-силовом нагружении при появлении деформаций ползучести происходит релаксация ОН

(уменьшение их значений по модулю). На данный момент методы расчёта релаксации ОН 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 ОН в условиях ползучести в научной литературе отсутствуют.

Вышеизложенное и 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 ниже следующие задачи.

1. Разработка метода расчёта остаточных напряжений в призматических деталях с концентраторами напряжений типа сквозных надрезов полукруглого, квадратного, V-образного, полуэллиптического профилей после опережаю-

щего поверхностного пластического деформирования в упругой и упруго-пластической 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 поверхностно 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 концентраторов 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 задачи.

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, нефтехимиче-

ская 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 конструктивных 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 призма-

тических 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 учитывать начальное напряжённо-деформированное состояние после упрочнения, полученное в упругой и упругопластической постановках задачи.
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 и с данными расчётов из независимых источников (в частном случае для гладкого образца).

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 «Сопротивление материалов» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва (руководитель профессор Павлов В. Ф., 2021 г.).

Работа выполнялась при частично финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-01-00550_a).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них 4 статьи рецензируемых журналах библиометрических баз данных Web of Science и Scopus, которые также входят в перечень ВАК, 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 расчётную практику профильных отделов ПАО «Кузнецов» (г. Самара).

Личный вклад автора.

Работы [99, 100] 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 [57, 77–85] 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 объём диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 глав, заключения, библиографии и двух приложений. Общий объём диссертации 169 страниц, из них 148 страниц текста, включая 66 рисунков, 2 приложения. Список литературы включает 158 наименований на 19 страницах.

Глава 1. Аналитический обзор и постановка задачи

В процессе эксплуатации любое изделие в той или иной мере подвергается влиянию термических, химико-термических, механических воздействий, что приводит к его износу, накоплению повреждённости в материале и провоцирует другие деградационные процессы в деталях и узлах элементов конструкций. Одним из эффективных методов повышения ресурса металлоконструкций является поверхностное пластическое деформирование (ППД) – широко используемый в двигателестроении, энергетическом машиностроении и других отраслях промышленности способ повышения ресурса упрочнённых деталей и элементов конструкций по отношению к неупрочненным. Положительными моментами при этом являются сохранение материалоемкости изделий и незначительные отклонения геометрии после упрочнения от заложенных параметров в соответствующих нормативных документах. Благоприятное влияние ППД на многие показатели надёжности (повышение предела выносливости, микротвёрдость, трибологические характеристики и т.д.) практически все исследователи связывают с созданием поля остаточных (сжимающих) напряжений в тонком приповерхностном слое, которые блокируют выход на поверхность различных микродефектов, микротрещин, дислокаций.

Основы механики упрочнённых элементов конструкций заложены более семи десятков лет назад, и за это время опубликовано множество работ в этом направлении [3, 15, 22, 31, 42, 96]. В настоящее время наблюдается всплеск публикаций, посвящённых методам реконструкции остаточных напряжений в упрочнённых деталях [9, 23, 25, 108, 118, 124, 133, 137, 140, 154–156,] и их влиянию на различные ресурсные показатели изделий [40, 45, 106, 109, 125, 134, 144, 149]. Наиболее востребованной является проблема повышения ресурса упрочнённых элементов конструкций по показателям многоциклового усталости [103, 130, 146, 148, 154, 156, 157], при этом отмечается снижение скорости распространения поверхностных усталостных трещин из-за наличия остаточных сжимающих напряжений [103, 146, 156].

Стремительное развитие вычислительной техники и программных средств стимулировало развитие численных методов непосредственного моделирования технологических процессов упрочнения для определения НДС на основе решения прямых контактных динамических и квазистатических упругопластических задач [4, 116, 126], либо моделируя непосредственно процесс поверхностного пластического упрочнения [9, 23, 25, 108, 118, 124, 133, 137, 140, 155, 156] и влияния ОН на геометрические характеристики упрочнённых деталей, например выпучивания пластин [24] и балок (призматических образцов) [56, 73, 80].

Наибольшая эффективность ППД наблюдается для деталей с концентраторами напряжений (вырезами, вмятинами, царапинами и иными трещиноподобными несплошностями) [43, 45, 64, 87, 92, 109, 111, 113, 134], поскольку в условиях многоциклового нагружения у таких деталей после упрочнения наблюдается повышение предела выносливости до 30–70% [43, 45], а в работе [130] вообще указано, что дробеструйная обработка может увеличить усталостную долговечность от 2 до 20 раз в зависимости от условий дробеструйной обработки. Такое явление однозначно обуславливается наличием сжимающих ОН вблизи концентраторов, которые локально снижают интенсивность эксплуатационных растягивающих напряжений, предотвращают растрескивание металла и раскрытие берегов трещин нормального отрыва. Уменьшение дислокаций в слоях материала посредством наружного уплотнения способствует также изменению траектории процесса разрушения, о чём свидетельствуют результаты работ [87, 111, 113].

В прикладных технологических задачах выбор методов и режимов поверхностного упрочнения проводится, как правило, без учёта формы, размеров концентратора и вариантов упрочнения поверхностного слоя детали. Традиционные технологии упрочнения применимы в основном для «гладких» деталей либо деталей с концентраторами напряжений, к которым есть доступ упрочняющего инструмента. При наличии в детали «мелких» надрезов, обусловленных конструктивными особенностями (например, для подачи смазывающих жидкостей, сопряжения деталей и т. д.) применение подавляющего числа таких технологий ограни-

чено вследствие недоступности упрочняющего инструмента к поверхности концентратора из-за более крупных габаритов по сравнению с геометрией соответствующих впадин. Поэтому на практике изготовлению «мелких» концентраторов напряжений чаще всего предшествует упрочнение гладкой детали в соответствии с технологией опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД), в результате применения которой возникают неоднородные поля ОН и остаточных ПД, распределённых по глубине упрочнённого слоя. После изготовления концентратора (удаления части объёма) под действием остаточных ПД, играющих роль начальных деформаций, в упрочнённом поверхностном слое происходит перераспределение ОН, причём наиболее интенсивно – в окрестности концентратора.

С математической точки зрения получаем задачу разработки метода расчёта ОН в области, прилегающей к концентратору напряжений. Наибольший интерес вызывает НДС в наименьшем сечении детали, образованном после создания концентратора напряжений – надреза. Важность решения этой задачи диктуется и потребностями расчётной практики, поскольку при оценке предела выносливости упрочнённой детали с концентраторами напряжений распределение ОН в сечении от дна концентратора непосредственно используется в соответствующих критериальных зависимостях [43, 45].

Аналитическое решение в области концентратора напряжений после опережающего упрочнения поверхности детали получить сложно. В этом плане можно отметить единственную работу [22], в которой методами теории функций комплексного переменного такого рода задача решена для тонкой пластины с полуэллиптическим надрезом в условиях плоского НДС. Однако применять это решение в прикладных задачах сложно, поскольку, например, в цилиндрических и плоских деталях с надрезами наблюдается объёмное НДС.

Другой подход расчёта ОН основан на волевом задании закона распределения ПД по пространственным координатам в тонком приповерхностном слое после упрочнения (однородное распределение, линейный закон по глубине слоя и

другие зависимости). Истоки этого подхода восходят к работе [3], в которой для некоторых простейших законов распределения ПД в гладких цилиндрических и призматических образцах получены аналитические решения. Этот метод расчёта ОН по заданным первоначальным деформациям получил свое развитие в работах [6, 48, 88], где методом конечных элементов исследовалось влияние области задания ПД и толщины упрочненного слоя на формирование поля ОН для гладких образцов и деталей с концентраторами напряжений.

Модификация этого метода выполнена в работах [64, 92] применительно к цилиндрическим образцам с надрезами полукруглого профиля различного радиуса после ОППД, в которых на основе метода конечных элементов расчётным путём построены зависимости для всех компонент тензора ОН в концентраторе в наименьшем сечении детали.

Несмотря на то, что наиболее исследованной является проблема повышения характеристик усталостной прочности деталей с концентраторами напряжений после ОППД, некоторые вопросы остаются до сих пор неизученными. Например, в случае применения технологии ОППД при нанесении единичного концентратора возникает вопрос в определении оптимальной величины области упрочнения гладкой детали для создания максимальных значений сжимающих ОН, поскольку упрочнение всей поверхности гладкой детали нецелесообразно в силу трудоёмкости некоторых технологий упрочнения (обработка роликом, алмазное выглаживание и другие).

Недостаточно изученным вопросом является и вопрос о характере перераспределения и уровне ОН в случае упрочнения методами ППД деталей с периодически повторяющимися концентраторами напряжений технологического происхождения (детали с резьбовым профилем, зубчатые механизмы, лопатки турбин и т.д.). Основные исследования в этом направлении посвящены изучению сопротивления усталости типовых деталей и элементов конструкций при циклическом нагружении [44].

Ещё один вопрос заключается в том, что в преобладающем количестве работ, посвящённых раскрытию тематики поверхностного упрочнения тел с концентраторами напряжений, задачи решаются в упругой постановке [6, 43, 44, 48, 60, 61, 64, 87, 92, 97, 111, 113]. При этом игнорируется область интенсивной концентрации напряжений, а для плоских задач полубесконечных трещин нормального отрыва, поперечного сдвига и продольного (антиплоского) сдвига напряжения вообще имеют сингулярность в её вершине. Это, в свою очередь, приводит к существенно завышенным расчётным значениям напряжений в области концентратора напряжений и не может иметь какой-либо практический смысл.

В связи с вышеизложенным и целью диссертационной работы в нижеследующем обзоре рассматриваются и анализируются публикации, посвящённые вопросам формирования ОН в деталях после технологических операций поверхностного упрочнения, экспериментальным исследованиям по определению ОН, методам реконструкции ОН и ПД после упрочнения и их релаксации в условиях высокотемпературной ползучести, влиянию ОППД на характеристики усталостной прочности деталей с концентраторами напряжений, в частности – на предел выносливости в условиях многоциклового нагружения.

1.1. Формирование остаточных напряжений в деталях после технологических операций

Первые упоминания об остаточных напряжениях (ОН) связаны с испытаниями железных и стальных образцов на растяжение Б. Биобером и В. Людерсом в 1836 г., что указано в монографии [5]. Во второй половине XIX века В. Людерс, а после него и Д. К. Чернов, что отмечено в монографии [33], при исследовании металлических образцов на начальной стадии текучести независимо друг от друга получили специфические рисунки на полированных поверхностях, свидетельствующих о наличии ОН. Впоследствии вопрос о существовании напряжений в ненагруженных элементах металлических конструкций изучался В. И. Родманом,

И. А. Умовым, Н. В. Калакуцким и И. Гейном согласно научным источникам [5, 13, 94], а на основе их фундаментальных работ было предложено систематизировать подход по изучению ОН. Отдельно следует отметить значительный вклад русского учёного Н. В. Калакуцкого за прикладное развитие в механику материалов, который первым предложил механический метод расчёта ОН в частях стальных и чугуновых изделий [5, 13].

Согласно публикациям [3, 5, 13, 70, 94] в 30-х годах XX века на основе анализа рентгеновских данных об искажении кристаллической решётки Н. Н. Давиденков предложил классифицировать все ОН на напряжения первого, второго и третьего рода в зависимости от объёма, в которых они уравниваются. По его классификации к напряжениям первого рода относятся макронапряжения, область уравнивания которых соизмерима с объёмами деталей. Напряжения второго рода определяются меньшим уровнем, т.е. уравновешенными микронапряжениями в пределах размера зёрен металла или их группы. И, наконец, напряжения третьего рода – это субмикроскопические напряжения, равновесное состояние которых возникает в пределах межатомного расстояния при искажении атомной решётки кристалла [3, 13, 70].

Вслед за Н. Н. Давиденковым было предложено несколько иных видов классификаций ОН, среди которых можно выделить концепцию Е. Орована и К. В. Мак-Грегора. В описанной ими классификации выделялось лишь два уровня напряжений – макро- и микронапряжения. Несмотря на своё существование, такой подход не нашёл общего признания среди инженеров и исследователей по причине неполного и неточного описания. Поэтому введённая классификация Н. Н. Давиденковым является настолько плодотворной, что до сих пор остаётся применяемой и актуальной и в настоящее время [5, 13].

Следует отметить, что дальнейший обзор научной литературы акцентирован на остаточных напряжениях первого рода (макронапряжениях), поскольку все задачи в настоящей диссертационной работе рассматриваются и решаются в рамках механики сплошной среды.

Остаточные напряжения первого рода всегда являются результатом неуравновешенных пластических деформаций, распределённых по объёму тела. Данное утверждение справедливо из условия равновесного состояния, т.е. когда сумма проекций всех внешних и внутренних сил равна нулю. Поэтому в деталях всегда имеются области напряжений растяжения и сжатия, которые компенсируют и уравнивают друг друга [70].

Основное развитие теории ОН заключалось в оценке их влияния на прочность сплошных деталей и элементов конструкций различной формы при статическом и усталостном нагружении. Среди необозримого количества работ, позволяющих определить роль ОН в увеличении ресурса изделий, следует выделить труды отечественных учёных 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, Л. М. Школьника, а также зарубежных J. Almen, H. Bühler, E. Heyn, G. Sachs и др.

Наибольший вклад в практику инженерных прочностных расчётов упрочнённых изделий в различных отраслях машиностроения прошлого столетия внёс советский учёный-механик И. А. Биргер. В его книге [3] отражены обширные сведения о влиянии ОН на металлическую структуру деталей различного профиля и их прочностные свойства, предложены методы расчёта ОН для различных расчётных схем, а также приведены экспериментальные данные для большинства металлов и сплавов.

В современной инженерной практике остаточные сжимающие напряжения считаются благоприятными, поскольку приводят к повышению прочностных характеристик за счёт увеличения внутреннего сопротивления внешним нагрузкам. Наоборот, действие растягивающих ОН противоположно сжимающим – они способствуют возникновению поверхностных концентраторов напряжений, вследствие чего возникает риск нарушения целостности изделий.

На этапе формирования теории представление о положительном и отрицательном влиянии ОН на изделия основывалось на исчерпывающей экспериментальной информации, в результате чего было задано направление углублённого изучения напряжений в зависимости от природы их возникновения. Это обстоятельство представляло особый интерес у большинства исследователей, о чём свидетельствует общее количество опубликованных работ [3, 28, 102, 122, 127, 131, 132, 136, 139 и многие другие], посвящённых изучению возникновения ОН в заготовках и деталях на различных этапах реализации технологических процессов.

Так, в процессе получения заготовок методом литья (реже в поковках и прокатах) возникающее в готовых отливках объёмное напряжённо деформированное состояние при остывании и усадке металла чаще всего приводит к поверхностному растрескиванию. Описанное явление однозначно определяется негативным влиянием внутренних усадочных и температурных деформаций на формирование ОН, величина которых может превышать предел прочности материала отливки, а низкий уровень пластичности (вследствие действия высокой температуры в заготовке) способствует хрупкому растрескиванию наружной поверхности как в горячем, так и в холодном состояниях [28].

Фундаментальные исследования работы [3], связанные с особенностями распределения напряжений при механической токарной обработке, показали, что при резании в вершине резца возникает пластическая деформация растяжения, а после отвода резца в обработанной поверхности образуются сжимающие ОН. Уточнённые результаты были получены Е. К. Хенриксеном [122], который установил, что после процедуры резания поверхностный слой пластичных материалов подвержен появлению остаточных растягивающих напряжений, а в поверхностном слое хрупких материалов образуются преимущественно ОН сжатия.

И. А. Биргер обобщил все имеющиеся на момент публикации монографии [3] сведения о влиянии механической обработки на образование сравнительно тонкого слоя ОН, глубина которого составляла 50–100 мкм. Представленные им данные показывают, что возникновение растягивающих или сжимающих напря-

жений в поверхностном слое значительным образом зависит от способа обработки (точение, фрезерование, шлифование и т.д.), режимов резания, углов наклона кромки режущего инструмента, условий охлаждения и самих механических характеристик обрабатываемого материала. Однако наибольшая интенсивность ОН обусловлена двумя основными факторами – силовым воздействием режущего инструмента и образованием больших градиентов температур вследствие выделения тепла при контакте инструмента с обрабатываемой заготовкой.

Проблема искажения геометрической формы деталей под действием ОН при различных методах механической обработки остаётся до сих пор актуальной при изготовлении монолитных и тонкостенных конструкций. Об этом свидетельствуют многочисленные детальные исследования, приведённые, например, в работах [131, 136, 102].

Отдельное внимание уделяется влиянию температурного воздействия на формирование ОН по глубине поверхностного слоя деталей. Интерес в этой области представляет характер неравномерного распределения температуры по сечению тела, быстро меняющегося во времени, в результате чего процессы фазовых превращений в металлах протекают неодинаково. Это, в свою очередь, приводит к возникновению ОН при различных удельных объёмах, что в ряде случаев сопровождается серьёзным короблением конструкций [5, 13].

Наиболее ярко влияние температурных деформаций на появление растягивающих ОН наблюдается после сварки конструкций, что связано с локальным изменением температуры вплоть до плавления материала. Их отрицательному влиянию на прочность металлоконструкций при наличии растягивающих напряжений современные исследователи уделяют особое внимание [30, 50, 90, 153].

В частности, авторы работы [90] приводят детальный анализ влияния режимов сварки на распределение продольных и поперечных остаточных сварных напряжений в околошовной зоне и зоне сварного шва в зависимости от типа применяемых электродов. Приведённые в публикации результаты полученных растягивающих напряжений наглядно демонстрируют их соизмеримость с пределом

текучести материала исследуемых образцов, что подчёркивает необходимость в оценке влияния ОН при проектировании сварных конструкций.

В работе [50] приведена оценка окружных и осевых ОН в сварных соединениях магистральных труб большого диаметра при технологическом процессе «лист–труба» и их влияние на коррозионную стойкость. Отмечено, что при контроле ОН в пределах локальной зоны одной трубы наблюдается разброс знакопеременных напряжений растяжения и сжатия. Указанные пределы значений варьируются от 50 МПа для сжимающих и до 320 МПа для растягивающих напряжений, а в некоторых точках значение последних достигало 500 МПа.

Другой причиной негативного влияния ОН при нагреве тел является серьёзное коробление изделий на этапе финишной обработки после некоторых видов термоупрочнения (заковки, цементации, азотирования и др.) [1, 41, 86]. В этом случае, помимо температурных напряжений, в обрабатываемых деталях ярко проявляют себя так называемые фазовые напряжения, связанные с термодинамическими изменениями структуры материала. Особенно этот процесс заметен после заковки, из-за чего на последующем этапе обработки вынужденно применяют методы снятия ОН (отжиг, нормализация), либо наводят остаточные сжимающие напряжения интенсивным охлаждением (криогенная обработка). Комбинирование описанных методов является довольно трудоёмким процессом как с позиции математического описания, так и со стороны практической реализации, однако эффективным способом устранения негативного воздействия остаточных растягивающих напряжений после заковки и наведения ОН сжатия, о чём свидетельствуют результаты работы [1].

Наилучший способ получения сжимающих ОН на поверхностном слое деталей и изделий основан на обобщённом подходе пластического деформирования. К нему относятся методы термопластического упрочнения (ТПУ) и поверхностного пластического деформирования (ППД). Согласно физическому описанию процесса [70], пластическая деформация вызывает уменьшение плотности металла, что обуславливает рост удельного объёма на глубину проникновения этой де-

формации. Увеличению этого объёма препятствуют нижележащие слои, что приводит к появлению в наружном слое ОН сжатия, а в сравнительно глубоких слоях – остаточных растягивающих напряжений.

Основы механики упрочнённых элементов конструкций заложены более семидесяти лет назад. За это время методам поверхностного упрочнения гладких деталей и наведения в наружном слое ОН сжатия посвящено множество публикаций. Среди основополагающих исследований можно выделить «ранние» работы [3, 15, 31, 96]. В настоящее время наблюдается всплеск публикаций, посвящённых методам реконструкции ОН в упрочнённых деталях и их влиянию на ресурсные показатели изделий [4, 7, 40, 45, 55, 89, 106, 109, 125, 134, 144, 149] и многие другие.

Отражение механики упрочнения имеет особое место в разделе теории разрушения материалов. Наибольший интерес представляют исследования распределения ОН в деталях с концентраторами напряжений, которые зачастую приводят к окончательной потере прочности. Анализ публикаций по этой теме [45, 80, 89, 92, 109, 134] показывает, что ОН имеют бóльшую чувствительность к концентрации напряжений в элементах конструкций с локальными концентраторами, чем в гладких образцах. Применение методов поверхностного упрочнения на деталях, ослабленных различными технологическими элементами (канавками, выточками, пазами, резьбой), демонстрирует значительное увеличение предела выносливости в условиях многоциклового нагружения до 30–70% по сравнению с аналогичными конструкциями без упрочнения [43, 45].

Аналогичная эффективность применения методов упрочнения наблюдается и для деталей с концентраторами напряжений в виде вырезов, вмятин, царапин и других трещиноподобных несплошностей [45, 89, 109, 134, 145, 150], приобретаемых в процессе эксплуатации и существенно уменьшающих величину остаточного ресурса. Такое явление однозначно обуславливается наличием сжимающих напряжений вблизи концентратора, которые локально снижают интенсивность эксплуатационных растягивающих напряжений, предотвращают растрескивание

металла и раскрытие берегов трещин нормального отрыва, которые, как правило, формируются на поверхности. Уменьшение дислокаций в слоях материала посредством наружного уплотнения способствует также изменению траектории процесса разрушения. В подтверждение этого, в работах [111, 113] на примере развития поверхностных трещин в образцах, изготовленных из никелевого суперсплава и ослабленных царапинами и вмятинами, представлены результаты положительного влияния ОН на усталостную долговечность. Результаты работы [87], полученные на основе линейной механики разрушения при исследовании цилиндрического стального образца с надрезом, также показали, что остановка роста трещины усталости наблюдается в поверхностном упрочненном слое по причине резкого падения значений расчётного коэффициента интенсивности напряжений.

Среди существующих подходов ППД отдельно следует отметить значимость таких, как дробеструйная обработка и обкатка роликом [4, 7, 55, 62, 70, 80, 89, 92, 138], при оптимально выбранных параметрах которых можно получить прирост предела выносливости в 1,5 раза и более. Это объясняется статическим (деформирование упрочняемой поверхности по схеме качения, скольжения или внедрения, как при обкатке роликом) или динамическим (деформирование упрочняемой поверхности за счёт ударного воздействия тел, как при гидро- и пневмодробеструйной обработке) «расплющиванием» поверхностного тонкого слоя. При этом деформированный слой формируется в виде наклёпанного металла, в котором измельчается исходная структура металла, уменьшаются дислокации и, как следствие, образуется неоднородное самоуравновешенное поле остаточных сжимающих напряжений.

Наведение сжимающих ОН методами ППД благотворно сказывается и на изделиях, работающих в условиях реологического поведения материала (ползучести) [70]. При исследовании НДС типовых элементов конструкций возникает вопрос об эффективности сжимающих ОН, поскольку интенсивные силовые, тепловые, вибрационные, радиационные и иные виды длительных по времени нагрузок приводят к релаксации напряжений в упрочнённом слое металла. Это серьёзно

сказывается на качестве поверхностного слоя, поскольку отсутствие предварительных сжимающих напряжений приводит к образованию дефектов в виде микротрещин, их раскрытию и постепенному росту вплоть до разрушения в процессе реологического деформирования.

На основе рассмотренных в разделе факторов возникновения растягивающих и сжимающих ОН, их положительного или отрицательного влияния на обобщённое НДС, можно сделать вывод о целесообразности подходов по изучению характера и особенности распределения описанных напряжений в зависимости от конкретного технологического процесса. Как было отмечено ранее, любая стадия изготовления детали оставляет свой след в виде наведённых ОН (в большей или меньшей мере), которые при переходе от этапа к этапу могут накапливаться и частично подвергаться действию релаксации. Тем не менее, итоговое напряжённое состояние изделия определяется на этапе финишной обработки. Безусловно, наилучшими в этом отношении являются методы ППД, поскольку полученные многими учёными результаты свидетельствуют об эффективности поверхностного упрочнения на увеличение долговечности конструкции, что подтверждается при проведении прочностных расчётов. Это обуславливает исключительную важность задачи по оценке НДС изделий после применения упрочнения.

1.2. Экспериментальные методы определения остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых гладких деталях и с концентраторами напряжений

Первые научные труды по определению ОН в металлических телах, разработанные свыше ста лет назад русскими учёными Н. В. Калакуцким и И. А. Наумовым, носили преимущественно экспериментальный характер. Это послужило дальнейшему развитию экспериментальных методов И. А. Биргером, Л. А. Гликманом, Н. Н. Давиденковым, Г. Заксом и др. На сегодняшний день установлено, что все существующие экспериментальные методы выявления ОН

относятся к определению «экспериментальный» лишь условно, поскольку напрямую измерить величину этих напряжений при испытаниях не представляется возможным. Получаемые результаты ОН в таких случаях являются расчётными величинами напряжений по теории упругости из экспериментально определённых значений остаточных деформаций и перемещений. Поэтому, несмотря на используемый термин, указанные методы следует отнести к феноменологическим расчётно-экспериментальным.

Все экспериментальные методы определения ОН и ПД в деталях после определённого способа упрочнения можно условно разделить на неразрушающие (не нарушающие целостность испытываемого тела), частично разрушающие (или полуразрушающие, сопровождающиеся удалением относительно малой части материала в ходе исследования) и разрушающие (не подразумевающие дальнейшего использования образца после испытания). Большое многообразие разработанных экспериментальных подходов и их всевозможных комбинированных модификаций представляет сложность для точной классификации. Поэтому, обобщая все методы по отдельным характерным признакам, можно представить классификацию по следующим группам:

1. Механические, основанные на определении перемещений или деформаций исследуемого упрочнённого образца или детали посредством постепенного удаления как малых сосредоточенных объёмов материала, так и целых слоёв.
2. Рентгенографические, основанные на измерении расстояния между двумя соседними кристаллографическими плоскостями материала.
3. Химические, заключающиеся в послойном стравливании материала и последующем измерении изменяющихся размеров рассматриваемого тела.
4. Электромагнитные, базирующиеся на зависимости омического сопротивления и магнитной проницаемости от величины ОН.
5. Ультразвуковые, основанные на определении скорости распространения звуковой волны, зависящей от величины ОН.

6. Методы, заключающиеся в измерении перемещений или деформаций упрочнённого образца (детали) в условиях релаксации напряжений сжатия.

Следует отметить, что из всех вышеперечисленных экспериментальных методов оценки ОН наибольшую практическую значимость получили механические методы, поскольку в сравнении с другими методами они позволяют с высокой точностью определить значения напряжений, распределённых по толщине поверхностного слоя. Этот критерий является определяющим, поскольку знание точного распределения величин ОН позволяет на высоком уровне дать количественную оценку их влияния на прочностные параметры, например, в случае усталостной прочности. Несмотря на очевидное преимущество таких подходов, их главный недостаток для преобладающего числа методик заключается в нарушении сплошности исследуемого изделия из-за удаления части материала с целью идентификации ОН, что является недопустимым в большинстве случаев.

Рассмотреть все существующие экспериментальные методы по определению внутренних (остаточных) напряжений в деталях и элементах конструкций невозможно, поэтому проведём краткий обзор некоторых из них. Для типовых стержневых, пластинчатых, трубчатых и дисковых образцов механические методы впервые были систематизированы И. А. Биргером и приведены в работе [3]. В частности, для определения остаточных деформаций в призматических стержнях применяется метод замера прогибов, при котором исследуемый образец подвергается постепенному удалению поверхностного слоя резанием, после чего на каждом этапе снятого слоя материала измеряется величина прогиба и соотносится с ОН обобщённой зависимостью [3]

$$\sigma(a) = \frac{4E}{3l^2} \left[(h-a)^2 \frac{df}{da}(a) - 4(h-a)f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right], \quad (1.1)$$

где E – модуль упругости, l – длина стержня со срезанным слоем, h – высота сечения стержня, a – толщина срезанного слоя.

Также, применительно к стержням, И. А. Биргером был предложен метод замера деформаций, который аналогичен предыдущему. В этом случае на ниж-

ную грань изучаемого стержня наклеивается проволочный тензометр, после чего противоположная грань образца подвергается послойному снятию материала. При этом ОН для рассматриваемого случая определяются по уравнению

$$\sigma(a) = -\frac{1}{2} E(h-a) \frac{d\varepsilon}{da}(a) + 2E\varepsilon(a) - 3E(h-a) \int_0^a \frac{\varepsilon(\xi)}{(h-\xi)^2} d\xi, \quad (1.2)$$

где $\varepsilon(a)$ – деформация стержня после удаления слоя глубиной a .

Упрощённый метод продольного распила, основанный на допущении о линейном характере эпюры напряжений по поперечному сечению, был приведён К. К. Гордезианом на примере прутков круглого сечения [14]. Исследование заключалось в замере величины раскрытия в месте разреза прутка, после чего продольные ОН рассчитывались из уравнения изгиба балки

$$\sigma_l = \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \frac{l}{\rho}, \quad (1.3)$$

где ν – коэффициент Пуассона, l – расстояние от поверхности до нейтральной оси балки, ρ – радиус кривизны нейтрального слоя.

Для определения ОН широко используется расчётно-экспериментальный метод колец и полосок, разработанный Н. Н. Давиденковым, получившим развитие и дальнейшее применение в прикладных и теоретических исследованиях С. И. Иванова [19, 20]. Несмотря на то, что такой подход позволяет экспериментально определить только одну или две компоненты напряжений на поверхности вырезанного из элемента упрочнённой конструкции образца (кольца или полоски), с помощью существующих расчётных методов можно получить полную картину НДС, например, в пределах упрочнённого слоя [44, 55, 56, 73, 91 и др.].

В дополнение к вышеописанному, рассмотрим подробно применение экспериментального метода полосок для определения НДС в упрочнённом слое после процедуры поверхностного упрочнения плоских образцов, разработанные на кафедре «Сопротивление материалов» Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королёва. Процесс поверхностного упрочнения призматического образца заключается в следующем. Исходный не-

упрочнённый образец помещается в специальный контейнер, наполненный микрошариками из подшипниковой стали ШХ15 диаметром 1 мм, которому посредством акустического трансформатора скорости сообщаются малоамплитудные высокочастотные колебания. Упрочнение реализуется за счёт многократного хаотичного контактного взаимодействия микрошариков с обрабатываемой поверхностью образца за определённый промежуток времени, в результате чего на поверхности образца формируется тонкий упрочнённый слой. Экспериментальная оценка уровня ОН, формируемых в процессе упрочнения, осуществляется посредством измерения прогиба $f(0)$ исследуемого упрочнённого образца по базовой длине l (см. рис. 1.1,а), после чего электрохимическим травлением производится процесс удаления слоёв материала образца толщиной a со стороны исследуемой упрочнённой поверхности и повторно замеряется величина прогиба $f(a)$ (см. рис. 1.1,б). По полученным значениям прогибов $f(0)$ и $f(a)$ вычисляются ОН

$$\sigma_y(a) - \nu\sigma_x(a) = \frac{8E}{l^2} f(0) \left(\frac{h}{2} - a \right) + \frac{4E}{3l^2} \left[(h-a)^2 \frac{df(a)}{da} - 4(h-a)f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right], \quad (1.4)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, h – толщина образца до травления, $0 \leq \xi \leq a$.

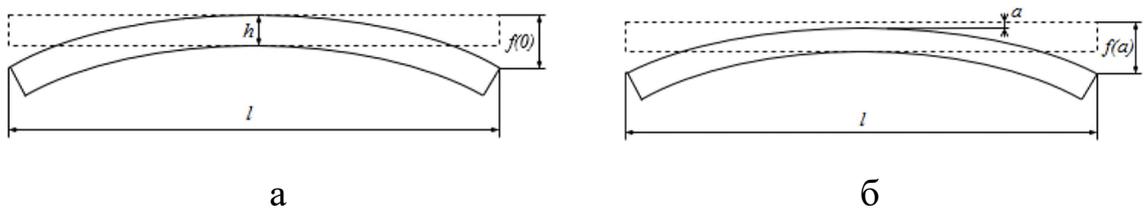


Рис. 1.1. Схематическое изображение замера прогибов $f(0)$ (а) и $f(a)$ (б)

Для случая ультразвукового упрочнения ОН $\sigma_y(a) = \sigma_x(a)$ формула (1.4) принимает следующий вид

$$\sigma_y(a) = \sigma_x(a) = \frac{1}{1-\nu} \left\{ -\frac{8E}{l^2} f(0) \left(\frac{h}{2} - a \right) + \right. \\ \left. + \frac{4E}{3l^2} \left[(h-a)^2 \frac{df(a)}{da} - 4(h-a)f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right] \right\}. \quad (1.5)$$

При этом повышенная точность замера экспериментальных величин прогибов при удалении слоёв материала образца травлением определена для схемы измерения перемещений в случае консольного закрепления образца (рис. 1.2). Связь между измеренными прогибами $f(0)$ и $f(a)$, вычисленными в соответствии с (1.4) и (1.5) и перемещениями $f(a)_{\text{изм}}$, записывается в виде

$$f(a) = \frac{f(a)_{\text{изм}}}{4(1+2c/l)}, \quad (1.6)$$

где c – длина удлинителя, l – базовая длина полоски.

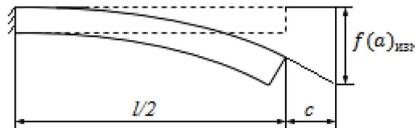


Рис. 1.2. Схематическое изображение замера перемещений $f(a)_{\text{изм}}$

Прикладные исследования в механике контактного взаимодействия, выполненные Г. Герцем, Дж. Бринеллем, Ф. Ф. Витманом, С. Роквеллом, В. А. Степановым и др., положили основы для становления склерометрических подходов по измерению ОН. Метод упругопластического контактного взаимодействия считается относительно новым и перспективным направлением, оценка НДС которого реализуется за счёт вдавливания твёрдого индентора в поверхность образца или детали до образования характерного отпечатка или продольного следа (небольшой царапины). В работах [27, 105] практическое применение данного метода установлено на сопоставлении замеряемой микротвёрдости с величиной ОН. Другой способ определения [49] основан на расчёте величин ОН по геометрическим характеристикам хрупких трещин отпечатка индентора.

Среди физических методов отметим наиболее чувствительные рентгенографические методы, которые позволяют оценить остаточные напряжения по всем

трём компонентам за счёт явления рассеивания монохроматических рентгеновских лучей при их прохождении сквозь кристаллическую решётку материала. Этот метод примечателен тем, что позволяет с достаточной точностью определить уровень внутренних напряжений, распределённых на небольшую глубину от поверхности, не разрушая исследуемый упрочнённый образец. Но его недостатком является то, что он даёт осреднённую величину ОН по этой глубине и практически не описывает градиент ОН по глубине слой. Применение таких методов при исследовании ОН отмечено во многих работах, таких, как [1, 41, 109, 138, 151] и многих других.

Подводя итоги текущего раздела следует отметить, что несмотря на активное развитие экспериментальных методов, получить полную оценку НДС тела только экспериментальным путём невозможно. При этом важно отметить, что все описанные экспериментальные методы в первую очередь определяют значения перемещений (прогибов), что позволяет оценить величину деформации, а только впоследствии и напряжения. В связи с этим, возникает потребность в разработке расчётно-экспериментальных методов оценки НДС.

1.3. Аналитические и феноменологические методы восстановления остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочнённых элементах конструкций

Несмотря на кажущуюся на первый взгляд совершенство экспериментальных подходов по определению остаточных сжимающих напряжений, все эти методы позволяют определить лишь одну-две компоненты тензора ОН и не предполагают определение компонент тензора остаточных ПД. Теоретические методы определения компонент тензоров ОН основываются на известных аналитических и феноменологических подходах реконструкции полей остаточного НДС, для реализации чего используются известные экспериментальные данные о механических параметрах материала, форме и размерах изучаемого тела, накладываемых

граничных условиях, условиях нагружения и т.д. Поэтому преобладающее количество теоретических методов расчёта ОН и ПД в упрочнённых элементах конструкций следует отнести к расчётно-экспериментальным.

Как было уже отмечено выше, экспериментальные методы оценки полей ОН требовали существенной доработки для практического применения полученных результатов, что положительно сказалось на разработке и последующем развитии аналитических методов расчёта. Задача реконструкции НДС, полученного после упрочнения детали, является трудоёмкой, ввиду чего спектр существующих аналитических методов расчёта не так уж велик. К примеру, можно выделить работу И. А. Биргера [3], в которой отражены аналитические подходы по определению компонент тензора ОН для упрочнённых деталей простой формы. В дальнейшем теоретически этот вопрос был сведён к решению, как правило, краевых задач термоупругости или термоупругопластичности [29, 35]. Детализированная оценка НДС в упрочнённых цилиндрических деталях отмечена в работах [69, 70, 91]. Первая работа, в которой рассматривалась упрочнённая модель тонкой пластины с концентратором напряжений в виде полуэллиптического надреза, имела строгий аналитический подход, основанный на решении плоской задачи с помощью теории функций комплексного переменного [22].

Отходя от частной задачи реконструкции ОН в механике упрочнённых конструкций, отметим, что она является частной задачей в общей проблеме оценки начального (предварительного) НДС для ряда процессов: литье, сварке, жёстком соединении материалов с различными физико-механическими свойствами и других. Предварительное НДС имеется и в различных конструкционных и природных материалах, композитных материалах после их изготовления и т.д. С математической точки зрения задача определения исходного НДС относится к обратным краевым задачам, а их решения сталкиваются с серьёзными трудностями, поскольку предварительное НДС является локально неоднородным при наличии поверхностных или объёмных дефектов типа трещин, полостей, вмятин. Уровень сложности решения таких задач даже для упругих сред демонстрируют, напри-

мер, работы А. О. Ватульяна [10–12], в которых проблема сводится к обратной (некорректной) задаче идентификации коэффициентов дифференциальных операторов математической модели, зависящих от компонентов тензора предварительно напряжённого состояния. В работах Ю. Н. Радаева рассматривается проблема исследования ОН (по терминологии автора – собственных напряжений) вследствие локальных (удалённых) зон пластичности или дефектов и ассоциируемыми с ними энергиями [53, 54, 141, 142].

С развитием численных методов расчёта существенно выросли вычислительные возможности математического моделирования физических и технологических процессов, в том числе и моделирования процесса упрочнения. Значительное продвижение в этом отношении связано с созданием современного программного обеспечения в многочисленных коммерческих пакетах, в основном базирующихся на методе конечных элементов (МКЭ). Широкое применение получили программные продукты MSC Nastran, Abaqus, ANSYS, Adams, MSC Marc и многие другие, применение которых позволило решить ряд важных теоретических и прикладных задач механики поверхностно упрочнённых элементов конструкций [55, 56, 64, 80, 92]. Подавляющее большинство работ в этом направлении выполнено на основе МКЭ, при этом основной задачей является введение в конечно-элементную модель предварительного НДС, вызванного упрочнением [9, 23, 25, 108, 118, 124, 133, 137, 140, 154–156]. Выполняется это двумя способами: либо моделированием непосредственно технологического упрочнения поверхности (как правило, дробеструйной обработки поверхности), либо введением в конечно-элементную модель эмпирических зависимостей для ОН и деформационных кривых упрочнения. Однако, применительно к задачам с концентраторами напряжений в известных работах [45, 64, 80, 92] и многих других, используется предположение, что ОН, возникающие после нанесения надрезов, не приводят к появлению новых (вторичных) пластических деформаций, т.е. задача решается в упругой постановке.

В заключение данного раздела отметим, что настоящее диссертационное исследование базируется на результатах расчётно-экспериментального метода колец и полосок, имеющего отражение в работах [44, 55, 56, 73, 91] и многих других, с целью исследования характера распределения и уровня ОН в призматических упрочнённых образцах с концентраторами напряжений в условиях высокотемпературной ползучести. Расчётная часть при этом заключается в решении фиктивной температурной задачи в упругой либо упругопластической постановках по исходным данным эпюры распределения ОН в гладком упрочнённом призматическом образце.

1.4. Методы расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых элементах конструкций в условиях ползучести

Как уже отмечалось ранее, технологические методы поверхностно пластического упрочнения гладких деталей и с концентраторами напряжений являются резервом повышения показателей надёжности по параметрам усталостной прочности (в частности, предела выносливости при многоциклового усталости), микротвёрдости, шероховатости, трибологических характеристик, и это справедливо при эксплуатации деталей при нормальных (не повышенных) температурах. Однако практически все детали энергетических установок, газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации подвергаются мощным температурно-силовым воздействиям. Материал этих деталей приобретает свойство деформации ползучести, происходит нарастание необратимых деформаций во времени, что является следствием перераспределения напряжений в объёме детали, в том числе и ОН в поверхностно упрочнённом слое, сопровождающиеся процессом их релаксации — уменьшением (по модулю) значений ОН во времени. Важность оценки скорости релаксации ОН связана с тем, что их значения входят непосредственно в критериальные зависимости для оценки влияния ОН на ресурс изделия, например, для

прогнозирования предела выносливости [21, 44, 48, 118 и др.]. Здесь же отметим, что процессы релаксации ОН возникают не только в связи с появлением деформации ползучести, но и в условиях малоциклового усталости. Это экспериментально и теоретически отмечалось во многих работах [39, 66, 133, 155]. Отдельно отметим работу [135], в которой выполнены комплексные исследования влияния дробеструйной обработки на микроструктуру, механические свойства, усталостное повреждение, релаксацию ОН и шероховатость стали AISI60, при этом степень релаксации ОН при циклическом нагружении исследовалась с помощью рентгеновских измерений. Установлено, что релаксация напряжений начиналась с высокой скоростью на начальных этапах нагружения и постепенно увеличивалась с меньшей скоростью при большем количестве циклов, т.е. в этих условиях наблюдается полная качественная аналогия с релаксацией ОН в условиях ползучести [16, 58, 61, 73, 76 и др.]. Явление релаксации ОН в условиях многоциклового усталости можно использовать и для решения обратных задач: кинетику релаксации ОН использовать в качестве эффективного параметра для определения роста усталостных повреждений при условии, что известна скорость релаксации ОН каждой механической нагрузки. Такого рода задача, по крайней мере, установочно обсуждалась в [129], но реализация этой идеи на данном этапе маловероятна, поскольку требует очень большого объема экспериментальных исследований.

Построение математических моделей релаксации ОН в процессе ползучести является довольно сложной задачей, поскольку, во-первых, необходимо учитывать нелинейный характер теории ползучести, во-вторых, необходимо решать новый класс краевых задач с начальным (после упрочнения) НДС. Основную сложность при этом представляет проблема введения в математическую модель (как правило, основанную на МКЭ) начальных ОН и ПД таким образом, чтобы не нарушались уравнения равновесия и совместности деформаций, решить которую с использованием современных вычислительных пакетов корректно крайне сложно, поэтому полученные результаты носят больше качественный характер [118, 137]. Именно указанные проблемы не позволили получить приемлемых результа-

тов теоретического характера вплоть до начала XXI века в исследовании релаксации ОН при ползучести даже для гладких (бездефектных) деталей.

В связи с вышеизложенным, в настоящее время имеются в подавляющем своём большинстве экспериментальные работы по релаксации ОН в поверхностно упрочнённых деталях, однако они в основном отвечают узкому спектру внешних температурно-силовых нагрузок: термоэкспозиция (чисто температурная выдержка без приложения механических нагрузок) либо одноосное нагружение цилиндрических или плоских образцов. Потребности энергетической промышленности, авиадвигателестроения естественным образом стимулировали экспериментальные исследования в области релаксации ОН ряда учёных: И. Г. Гринченко [15], И. В. Кудрявцева [31], А. М. Сулимы с соавторами [96], В. Ф. Павлова с соавторами [46], О. В. Колотниковой и В. И. Цейтлина [26, 98], В. П. Радченко с соавторами [60, 61, 73], А. А. Маталина [36], D. J. Buchanan и R. John [107], B. J. Foss с соавторами [114], J. Hoffman с соавторами [123], M. Khadraoui с соавторами [128] и многие другие.

Приведём лишь часть полученных экспериментально результатов перечисленными авторами. В работе [36] отмечается, что в образцах из стали 2Х13 при нагревании до температуры $T = 430$ °С сжимающие ОН снижаются по модулю на 78% уже через 20 часов. А релаксация ОН сплава ХН77ТЮР при $T = 700$ °С через 8 часов составила 54%, причём особо интенсивное снижение ОН происходило в первые 2 часа. Та же ситуация описывается в [15] для сплава ХН70ВМТЮ (ЭИ617) при $T = 700$ °С, где ОН релаксировали на 90%.

О. В. Колотникова в работе [26] описывает, что при упрочнении цилиндрических деталей из сплава ЖС6КП микрошариками на поверхности упрочнённого слоя сформировались остаточные сжимающие напряжения величиной -1000 МПа, которые при выдержке при температуре $T = 650$ °С снизилась на 59%, а при $T = 800$ °С релаксация составила 85%. Б. А. Кравченко, В. Г. Круцило [29] при исследовании упрочнённого микрошариками сплава ЖС6Ф обнаружили, что сформированные ОН сжатия величиной -1100 МПа через 2 часа в атмосфере аргона

при $T = 950$ °С релаксировали до -750 МПа, а через 50 часов практически полностью исчезли. Отметим результаты, полученные В. П. Радченко с соавторами в работах [60, 61, 73], в которых выполнен комплекс исследований влияния термоэкспозиции на релаксацию ОН, микротвёрдость, шероховатость и размер зерна в нормальном сечении для цилиндрических образцов из сплавов Д16Т и В95. Основные выводы в этих работах следующие: при испытаниях упрочнённых образцов на усталость и ползучесть ($T = 125$ °С) при термоэкспозиции наблюдается снижение микротвёрдости вплоть до состояния неупрочнённых образцов и падение величин приращения предела выносливости, что связывается авторами с релаксацией ОН в поверхностном слое при термоэкспозиции. Это ещё раз подтверждает выдвинутую в [60, 61] гипотезу о том, что ключевую роль в повышении характеристик поверхностного слоя микротвёрдости играют ОН, поскольку их релаксация в процессе ползучести приводит к значениям микротвёрдости неупрочнённых образцов. Хотя, возможно, что какую-то роль здесь играет и изменение микроструктуры в поверхности упрочнённого слоя.

Рассмотрим теперь теоретические подходы для описания релаксации ОН в поверхностно упрочнённых элементах конструкций при ползучести. Здесь существуют единичные работы. Как отмечалось выше, основной проблемой при постановке такого рода задач является наличие начального НДС, решение которой является нетривиальной задачей. Одна из первых работ теоретического характера принадлежит В. И. Цейтлину и О. В. Колотниковой [98], в которой исходная задача для поверхностно упрочнённого цилиндра сведена к одномерной задаче для осевого ОН. Здесь сплошной цилиндрический образец разбивался на вложенные друг в друга (кроме центрального) полые цилиндрические тела, соединённые с идеальной адгезией, и далее, используя начальное распределение осевой компоненты напряжений по радиусу, решалась задача ползучести для составного статически неопределённого стержня. Недостатком является неучёт остальных компонент: окружной и радиальной, а также остаточных ПД, неучёт которых приводит к рассогласованию уравнений совместности деформаций.

Систематические научные исследования в области ползучести поверхностно упрочнённых элементов конструкций ведётся в научной школе Самарского государственного технического университета в течение 20 лет и здесь разработан оригинальный подход к решению такого рода задач. Основы этого подхода заложены в работах В. П. Радченко и М. Н. Саушкина [69, 70]. Дальнейшее развитие этот метод получил в более поздних работах на основе принятого метода решения краевых задач о релаксации ОН в условиях ползучести для упрочнённых цилиндрических изделий в условиях одноосного растяжения [71]. В развитие идеи и подхода [71] в работе [63] удалось теоретически описать процесс релаксации в цилиндрических образцах из сплава ЖС6КП при $T = 800$ °С после пневмодробеструйной обработки при двух значениях растягивающей нагрузки (150 МПа и 250 МПа), а также в условиях термоэкспозиции. Получены зависимости для окружной, осевой и радиальной компонент тензора ОН на интервале времени [0; 200] ч. Выполнена проверка адекватности метода экспериментальным данным для осевой компоненты. Аналогичные исследования для четырёх уровней растягивающей нагрузки выполнены для сплава Д16Т при $T = 250$ °С выполнены в работе [67], при этом использована не детерминированная, а стохастическая модель реологического деформирования этого сплава. В работах В. П. Радченко с соавторами далее решены задачи при сложных программах нагружения и видах НДС. Так, в [74] изложена единая методика решения краевых задач для упрочнённых деталей при сложном напряжённом состоянии, в [75] реализована методика применительно к совместному действию осевого растяжения и кручения для сплошного цилиндрического образца; в [76] исследовано совместное действие осевой силы, крутящего момента и внутреннего давления на релаксацию ОН в полем упрочнённом с наружной стороны цилиндре. В работе [16] впервые решена задача о релаксации ОН в поверхностно упрочнённом цилиндре при жёстких ограничениях на угловые перемещения (угол закручивания постоянный). Эта задача моделирует в упрощённом виде эксплуатационную ситуацию бандажированных направляющих лопаток компрессора ГТД. За последние 6 лет этот метод для цилиндриче-

ских образцов обобщён на плоские гладкие призматические образцы и выполнены расчёты по оценке скорости релаксации ОН при ползучести в условиях термоэкспозиции с экспериментальной проверкой адекватности расчётных данных [58, 72, 73]. Это далеко не полный перечень работ даёт достаточные представления о круге задач по оценке релаксации ОН в условиях ползучести. Выполненный краткий обзор относится к гладким (бездефектным) поверхностно упрочнённым цилиндрическим и призматическим образцам. Что же касается исследования призматических поверхностно упрочнённых деталей (как и цилиндрической формы) с концентраторами напряжений в виде сквозных надрезов различной геометрической формы (полукруглый надрез, прямоугольный и V-образный надрезы, полуэллиптический надрез), а тем более трещиноподобных дефектов сквозной и конечной длины, то исследования по релаксации ОН в области концентратора напряжений отсутствуют. Поэтому эта задача и является одной из целей настоящей диссертационной работы.

1.5. Методы оценки влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости

Технологии поверхностно пластического упрочнения влияют на повышение различных характеристик показателей надёжности (микротвёрдость, шероховатость, трибологические параметры и т.д.). Однако наиболее существенное их влияние оказывает на характеристики много- и малоциклового усталости. Отметим, что многие детали энергетического машиностроения, авиадвигателестроения в рабочем состоянии подвергаются именно рабочем состоянии подвергаются именно усталостным нагрузкам (лопатки, диски, валы и т.д.), при этом поверхностное упрочнение является штатной технологической операцией в этих областях промышленности.

В научной литературе за последние 70 лет имеется просто необозримое количество работ по оценке влияния ОН на характеристики сопротивления усталости.

сти, в частности – на предел выносливости. Проанализировать их все невозможно, однако можно указать работу [45], в которой сделан действительно объёмный анализ имеющихся литературных источников по этой проблеме. Согласно [45], для гладких упрочнённых деталей увеличение предела выносливости составляет 20–40% по сравнению с неупрочнёнными конструктивными элементами, для упрочнённых деталей с концентраторами напряжений эта величина составляет 200%, а в некоторых случаях достигает и 300%. Приведённые значения увеличения предела выносливости получены в различных работах для разных видов сложного напряжённого состояния (изгиб, растяжение-сжатие, кручение). Однако в [45] отмечено, что упрочнение при кручении как гладких (бездефектных) образцов, так и с концентраторами напряжений (как правило – надрезы) менее эффективно, чем в условиях действия изгибающих нагрузок.

ППД используются в технологической практике и для деталей, режимы эксплуатации которых характеризуются условиями малоциклового усталости. Здесь также отмечается положительное влияние поверхностного упрочнения, что отмечено в ряде работ [17, 21, 26, 29, 32].

Рассмотрим теперь более подробно методы оценки влияния ОН на предел выносливости. В настоящей диссертационной работе подробно проанализированы соответствующие расчётно-экспериментальные методы, разработанные в научной школе Самарского национального исследовательского университета на кафедре «Сопротивление материалов» под руководством С. И. Иванова и В. Ф. Павлова, поскольку они прошли обстоятельную экспериментальную проверку [21, 45, 46]. Существуют два подхода использования ОН в критериальных зависимостях оценки их влияния на предел выносливости. В первом варианте используется величина ОН на поверхности опасного сечения в детали $\sigma_{ост}^n$, а во втором варианте – среднеинтегральная величина зависимости $\sigma_{ост} = \sigma_{ост}(h)$ (h – глубина слоя от поверхности упрочнённой детали) по величине $0 \leq h \leq t_{кр}$, где $t_{кр}$ – длина нераспространяющейся трещины усталости упрочнённой детали [21, 45, 46], т.е. используется не конкретное значение ОН в фиксированной точке, а предлагается исполь-

звать среднеинтегральную величину $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, которая определяется соотношением [45, 46]:

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (1.7)$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем (опасном) сечении детали, $\xi = y/t_{\text{кр}}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, $t_{\text{кр}}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

Формула (1.7) получена для сплошных и полых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений, а координаты z и y определяются так, как это показано на рис. 1.3.

Для оценки величины предела выносливости на основании первого подхода (используется величина ОН на поверхности детали) в работах [17, 21, 45] отработана формула при многоцикловой усталости в условиях изгиба вида

$$\sigma_1 = \sigma_{-1}^0 - \psi_{\sigma} \sigma_{\text{ост}}^n, \quad (1.8)$$

где σ_{-1} – предел выносливости упрочнённой детали, σ_{-1}^0 – предел выносливости неупрочнённой детали, ψ_{σ} – феноменологический параметр влияния ОН $\sigma_{\text{ост}}^n$ на предел выносливости.

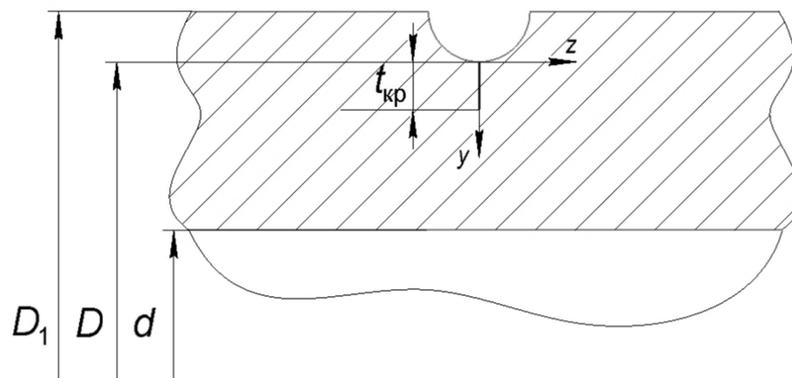


Рис. 1.3. Схематическое изображение осевого сечения цилиндрической детали и нераспространяющейся трещины $t_{\text{кр}}$

В работе [46] выполнена обстоятельная проверка критерия первого типа (1.8) для различных технологий поверхностного упрочнения и установлено, что величина ψ_σ изменяется в достаточно широких пределах границы её изменения от 0,1 до 0,3. В [45, 46] формула (1.8) рекомендована и для случая кручения в условиях многоциклового нагружения, но здесь коэффициент ψ_σ лежит в более широких пределах, в частности для ряда упрочнённых образцов его значение меньше 0,1.

Для второго варианта критерий влияния ОН на предел выносливости (с использованием формулы (1.7)) имеет вид, аналогичный (1.8):

$$\bar{\sigma}_{-1} = \sigma_{-1}^0 - \bar{\psi}_\sigma \bar{\sigma}_{\text{ост}}, \quad (1.9)$$

где $\bar{\sigma}_{-1}$ – предел выносливости для упрочнённой детали, σ_{-1}^0 – предел выносливости для неупрочнённой детали, $\bar{\psi}_\sigma$ – феноменологический параметр, $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ определяется интегральной зависимостью (1.7).

Результаты многочисленных экспериментов, представленные в [21, 45, 46], показывают, что величина $\bar{\psi}_\sigma$ в (1.9) имеет существенно меньший разброс, чем коэффициент ψ_σ в формуле (1.8), и имеет среднее значение 0,36. По всей видимости это объясняется тем, что критерий (1.9), (1.7) учитывает влияние на предел выносливости не только величину ОН (в конкретной точке), но и характер распределения ОН по глубине упрочнённого слоя до впадины, равной $t_{\text{кр}}$ – критической глубины нераспространяющейся трещины усталости.

Выполненные экспериментальные металлографические исследования, описанные в [21, 45, 46], показали, что для величины $t_{\text{кр}}$ можно использовать следующие выражения:

– для сплошных цилиндрических образцов:

$$t_{\text{кр}} = 0,0216D, \quad (1.10)$$

где D – диаметр наименьшего (опасного) поперечного сечения детали;

– для полых цилиндрических образцов:

$$t_{\text{кр}} = 0,0216D \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (1.11)$$

где D – внешний диаметр наименьшего поперечного сечения детали, d – внутренний диаметр полого цилиндрического образца (см. рис. 1.3).

Сформулируем некоторые выводы по данной части обзорного материала. Предпочтение нужно отдать критерию влияния ОН на предел выносливости второго типа, т.е. модели (1.9), (1.7) с использованием (1.10) или (1.11), поскольку этот критерий использует информацию о всей эпюре ОН в области сжатия материала, а не в конкретной точке (на поверхности), тем более, что для многих технологий упрочнения экстремум эпюры ОН располагается не на поверхности детали, а в подповерхностном слое [45, 46].

К недостаткам обоих критериев относится то, что, во-первых, используется только осевая компонента тензора ОН σ_z , во-вторых, все методы определения распределения компонент тензора ОН основаны на гипотезе, что в области концентратора напряжений, нанесённого после ОППД, не возникает пластических деформаций, т.е. задачи решаются в упругой постановке. Но для трещиноподобных дефектов с малым углом раскрытия концентрация напряжений очень высокая и в этом случае необходимо решать задачу в упругопластической постановке. Отметим, что в научной литературе по этой проблематике таких не только решений, но и постановок задач не имеется. Поэтому одной из задач настоящего диссертационного исследования и является построение решений для НДС в упругопластической постановке в области концентраторов напряжений типа поперечных сквозных надрезов различного профиля, сквозных трещиноподобных дефектов различного угла раскрытия, а также несквозных трещиноподобных дефектов в поверхностно упрочнённых образцах.

1.6. Выводы по главе 1

Из изложенного краткого обзора экспериментальных и теоретических работ (и их анализа) в области развития методов реконструкции остаточного напряжённо-деформированного состояния поверхностно упрочнённых деталей и методов оценки релаксации остаточных напряжений в условиях высокотемпературной ползучести можно сформулировать основные задачи и направления научных исследований настоящей диссертационной работы, которые не представлены в научном сообществе и требуют своего решения.

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 упруго-пластической 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 поверхностно 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.

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

Материалы данной главы диссертации излагаются в соответствии с публикациями автора данной работы [77, 78, 80, 81, 85, 100].

2.1. Постановка задачи

В главе 1 отмечалось, что определение НДС упрочнённых конструкций, имеющих поверхностные концентраторы напряжений различного рода происхождения, имеет высокую значимость на этапе проектирования деталей в любой отрасли современного машиностроения.

Целью данной главы является разработка метода реконструкции полей ОН и ПД в призматических образцах с поперечными сквозными концентраторами типа полукруглого, квадратного, V-образного надрезов различной формы и трещиноподобных сквозных и несквозных дефектов с различными углами раскрытия после ОППД. При этом концентраторы могут иметь как технологическое назначение (надрезы различной формы), так носить и эксплуатационный характер их образования (царапины, смятие и прочие дефекты от воздействия упрочнённой детали с посторонними предметами). В соответствии с технологией ОППД сначала упрочняется гладкий образец, затем наносятся концентраторы (удаляется часть упрочнённого материала), вследствие чего происходит перераспределение ОН в области концентратора напряжений. Конечной целью является определение НДС после перераспределения напряжений. В данной главе ставится разработка численного метода расчёта этой задачи на основе конечно-элементного моделирования в упругой постановке, т.е. в предположении, что после нанесения концентраторов не возникают вторичные пластические деформации вследствие перераспределения ОН. В данной главе (и последующих) рассматривается случай так называемо-

го изотропного упрочнения поверхности призматической грани в её плоскости, что характерно для пневмо- и гидродробеструйной обработки, ультразвукового механического упрочнения, азотирования и некоторых других технологий. Это ограничение связано с тем, что имеются экспериментальные данные для призматических образцов, упрочнённых в режиме ультразвукового упрочнения, которые являлись базовыми для построения соответствующих моделей, разрабатываемых в настоящей работе, и проверки их адекватности экспериментальным данным.

2.2. Численный метод восстановления остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых гладких призматических деталях на основе метода начальных деформаций

В соответствии с технологией ОППД на первом этапе осуществляется реконструкция полей ОН и ПД для гладкого (бездефектного) призматического образца. В качестве замечания отметим, что поскольку в дальнейшем рассматривается динамическая виброударная технология упрочнения, то можно отметить ряд работ [51, 93, 110, 115, 143], в которых численно решены задачи, позволяющие оценить распределение ОН и ПД по толщине упрочнённого слоя при единичном ударе шара (дробинки) о плоскость, а в работах [34, 37, 116, 126, 152, 158] с использованием современных вычислительных технологий решены задачи прямого численного моделирования технологических процессов обработки всей поверхности дробью на основе контактной упругопластической задачи. Однако все построенные в этих работах решения могут дать лишь качественную характеристику полей ОН и ПД, поскольку учесть все параметры реального технологического процесса практически невозможно.

В настоящей работе за базовое решение для гладкого упрочнённого образца принимается решение, построенное в работах Радченко В. П. и Саушкиным М. Н. с соавторами [58, 73] на основе расчётно-экспериментального метода с привязкой к одной экспериментально определённой компоненте тензора ОН, которая ис-

пользовалась и другими авторами в более поздних работах [55, 56, 80]. Поскольку информация о полях ОН и ПД для гладкого образца является исходной для решения задачи с концентраторами напряжений, изложим её подробно в соответствии с работами [55, 56, 80]. В настоящей диссертационной работе разрабатываются численные методы решения всех поставленных задач на основе конечно-элементного моделирования, что требует задания всех механических и физических характеристик материала призматического образца и его геометрии. Поэтому в дальнейшем все решения иллюстрируются на конкретном призматическом образце из известного материала.

Рассматривается гладкий образец (призматический брус) квадратного сечения $100 \times 10 \times 10$ мм, изготовленный из жаропрочного никелевого сплава ЭП742, который подвергается поверхностному упрочнению по верхней грани одним из методов ППД. Задача состоит в исследовании НДС конструкции по глубине y от верхней поверхности. Для построения расчётной модели вводится декартова система координат xOz , плоскость которой совмещена с упрочнённой верхней гранью (заштрихована), а ось Oy направляется по глубине (см. рис. 2.1).

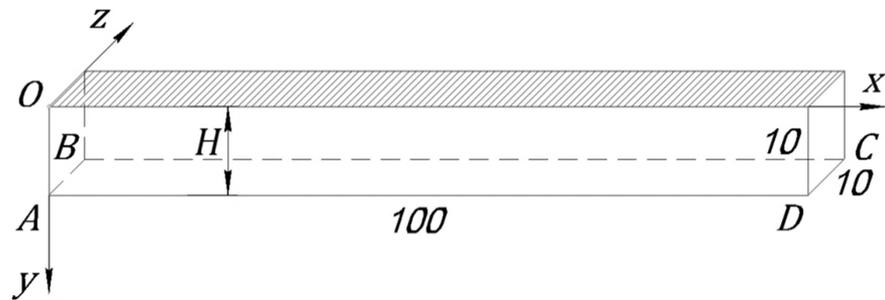


Рис. 2.1. Схематическое изображение упрочнённого образца

Дальнейшее изложение материала выполнено в соответствии с работами [58, 73], где приведено нижеследующее решение.

Решение задачи основано на гипотезе о том, что все компоненты тензоров ОН и ПД зависят только от координаты y , при этом ненулевыми являются лишь величины $\sigma_x = \sigma_x(y)$ и $\sigma_z = \sigma_z(y)$. Обозначим через $q_i = q_i(y)$, $e_i = e_i(y)$ и $\varepsilon_i = \varepsilon_i(y)$ ($i = x, y, z$) ненулевые компоненты тензоров остаточных пластических,

упругих и полных деформаций соответственно. Недиагональные компоненты тензоров ОН и ПД не рассматриваются, поскольку они равны нулю [58, 73]. Вводимые гипотезы плоских сечений

$$\varepsilon_x(y) = \varepsilon_z(y) = 0 \quad (2.1)$$

оправданы тем, что толщина упрочнённого слоя сравнительно мала по сравнению с высотой образца $H = 10$ мм.

Аналогично работам [68, 70, 92], в которых метод реконструкции ОН и ПД рассматривается для цилиндрических образцов, в общем случае введём гипотезу анизотропного упрочнения верхней грани

$$q_x(y) = \alpha q_z(y), \quad (2.2)$$

где α – феноменологический параметр изотропного упрочнения поверхности, величина которого зависит от технологии ППД [70, 92].

Согласно [68, 70, 92], для таких методов, как азотирование, дробеструйное, термопластическое и ультразвуковое упрочнение, параметр $\alpha = 1$, что соответствует изотропному упрочнению. Когда $\alpha \neq 1$, то рассматриваемый случай следует относить к анизотропному упрочнению. Установлено, что при алмазном выглаживании поверхности или обкатке роликом параметр α может принимать значения от 4 до 20.

Из условия пластической несжимаемости $q_x + q_y + q_z = 0$ и указанной гипотезы (2.2) получаем соотношение

$$q_y(y) = -(1 + \alpha)q_z(y). \quad (2.3)$$

Отсюда, учитывая, что полная деформация является аддитивной составляющей упругой и пластической компонент, из (2.1) с учётом закона Гука ($\sigma_y = \sigma_z(y) = 0$) получаем соотношения для компонент ОН и ПД:

$$\begin{aligned} \sigma_z(y) &= \frac{1 + \alpha \nu}{\alpha + \nu} \sigma_x(y), & q_x(y) &= -\frac{\alpha(1 - \nu^2)}{E(\alpha + \nu)} \sigma_x(y), \\ q_z(y) &= -\frac{1 - \nu^2}{E(\alpha + \nu)} \sigma_x(y), & q_y(y) &= \frac{(1 + \alpha)(1 - \nu^2)}{E(\alpha + \nu)} \sigma_x(y), \end{aligned} \quad (2.4)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

В частном случае для изотропного упрочнения поверхности ($\alpha = 1$) соотношения (2.4) принимают вид

$$\sigma_x(y) = \sigma_z(y), \quad q_x(y) = q_z(y) = -\frac{1-\nu}{E} \sigma_x(y), \quad q_y(y) = \frac{2(1-\nu)}{E} \sigma_x(y). \quad (2.5)$$

Из полученных соотношений (2.5) следует, что достаточно лишь знать экспериментальную зависимость для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$, а остальные компоненты тензоров ОН и ПД определяются расчётным методом из (2.5).

С использованием изложенной методики на основании экспериментальных данных [58, 73] выполнена реконструкция НДС в поверхностно упрочнённом гладком образце из сплава ЭП742, верхняя грань которой упрочнена в режиме ультразвукового (механического) упрочнения дробью. Поскольку данная технология приводит к изотропному упрочнению поверхности, то расчётными формулами являются соотношения (2.5). Экспериментальные данные для компоненты ОН $\sigma_x = \sigma_x(y)$, представленные маркерами на рис. 2.2, определены лишь в тонком приповерхностном слое глубиной 100–200 мкм. Поэтому для дальнейшего решения задачи необходимо не только построить аналитическую аппроксимацию для этой компоненты, но и экстраполировать её на все значения $0 \leq y \leq H$ при выполнении условия самоуравновешенности $\int_0^H \sigma_x(y) dy = 0$. Для этого в настоящей работе использовалась аппроксимация экспериментальных данных вида

$$\sigma_x(y) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left[-\left(\frac{y-y^*}{b}\right)^2\right], \quad (2.6)$$

где σ_0 , σ_1 и b – параметры аппроксимации, методика идентификации которых приведена в публикациях [58, 73], y, y^* – величины текущей и экспериментальной координаты локального экстремума соответственно (см. рис. 2.2).

Поскольку одной из целей являлось исследование влияния высоты образца на НДС, то кроме $H = 10$ мм в дальнейшем рассматривались и расчётные случаи со значениями $H = \{2; 4; 6; 8\}$ мм. При этом экспериментальная эпюра остаточных

напряжений в области сжатия материала ($0 \leq y \leq 0,2$ мм) полагалась для всех расчётных случаев одинаковой (см. рис. 2.2), а параметры аппроксимации (2.6) вычислялись в соответствии с методикой [58, 73] для всех значений H и приведены в таблице 2.1.

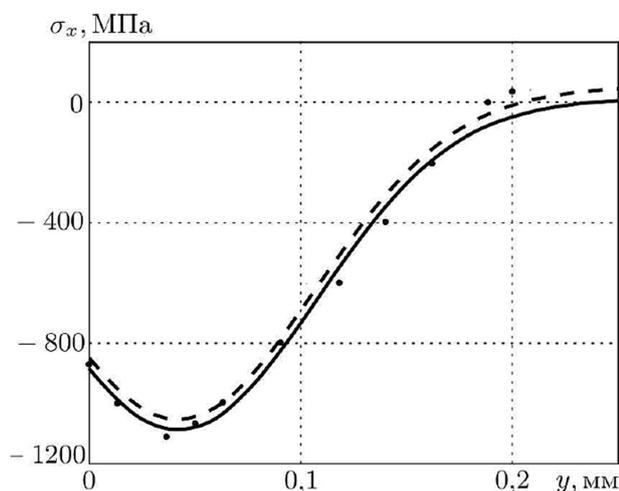


Рис. 2.2. Данные для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ после ультразвукового упрочнения поверхности гладкого образца из сплава ЭП742: экспериментальные (маркеры), расчётные (сплошные линии) по аппроксимации (2.6) и расчётные (штриховые линии) для термоупругой задачи

Таблица 2.1

Значения параметров аппроксимации (2.6) для компоненты ОН $\sigma_x = \sigma_x(y)$

Высота образца H , мм	Параметры аппроксимации (2.6)		
	σ_0 , МПа	σ_1 , МПа	b , мм
10	13,38	1100,98	0,0928
8	16,84	1104,64	0,0933
6	22,65	1110,05	0,0938
4	34,61	1120,81	0,0949
2	73,32	1152,12	0,0986

После построения аппроксимации (2.6) в соответствии с соотношениями (2.5) для изотропного упрочнения все компоненты ОН и ПД будут иметь аналитическое представление.

Развиваемый в настоящем исследовании численный метод решения всех последующих задач с концентраторами напряжений базируется на методе конечных элементов и модификации метода расчёта по начальным деформациям, основы которого заложены в работе [3], а дальнейшее его развитие осуществлялось в ряде публикаций, например [6, 8, 47, 48, 55, 56, 62, 64, 68, 73, 88, 92]. Суть метода заключается в аналогии между остаточными ПД и температурными деформациями в неоднородном температурном поле, что позволяет применять современное программное обеспечение с возможностью решения термоупругих задач методом конечных элементов (МКЭ).

Предварительно адаптация развиваемого метода была применена к гладкому образцу с целью проверки его адекватности экспериментальным данным, представленным на рис. 2.2 маркерами. Алгоритм решения применительно к рассматриваемому гладкому образцу следующий. На первом этапе по соотношениям (2.5) и (2.6) и известной экспериментальной компоненте $\sigma_x = \sigma_x(y)$ определяются поля ОН и ПД после процедуры изотропного упрочнения.

На втором этапе определённые по (2.5) и (2.6) компоненты тензора остаточных ПД $q_i = q_i(y)$ ($i = x, y, z$) моделируются температурными деформациями с использованием соотношений

$$q_i(y) = \beta_i(T(y))[T(y) - T_0] \quad (i = x, y, z; 0 \leq y \leq H), \quad (2.7)$$

где $T_0 = \text{const}$ – некоторое фиксированное значение температуры на грани образца, противоположной упрочнённой грани (см. рис. 2.1), $\beta_i(T(y))$ – коэффициент температурного расширения, $T = T(y)$ – заданное температурное поле по координате y (при этом закон изменения температуры может быть любым, что показано результатами расчётов в работе [55]).

Суть метода заключается в том, что известные остаточные ПД, вычисленные по формуле (2.5), приравниваются к температурным деформациям (правая часть формулы 2.7). Для этого при заданных $q_i(y)$ и $T = T(y)$ по формуле (2.7) вычисляются коэффициенты температурного расширения $\beta_i = \beta_i(T(y))$, которые

являются исходными данными для решения задачи термоупругости (например, в программном пакете инженерного анализа ANSYS).

В работе [55] использовались различные варианты задания температурного поля (решение задачи теплопроводности, произвольное «фиктивное» задание $T = T(y)$) и показано, что способ его задания не влияет на формируемые ОН после решения задачи термоупругости. Поэтому закон распределения температуры $T = T(y)$ задавался в соответствии с решением стационарной задачи теплопроводности с граничными условиями первого рода для призматического образца по следующей схеме. На упрочнённой поверхности (показана штриховкой на рис. 2.1) задавалась температура $T = T_1 = 400$ °С, на противоположной ей грани $T = T_0 = 20$ °С, а остальные грани были теплоизолированы. Для решения стационарной задачи теплопроводности применялись справочные данные значений коэффициента теплопроводности $\lambda = \lambda(T)$ для сплава ЭП742, приведённые в таблице 2.2 [58, 73]

Таблица 2.2

Сводная таблица значений коэффициентов теплопроводности λ
от температуры T для сплава ЭП742

$T, \text{°C}$	25	100	200	300	400
$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{град}$	10,5	11,3	12,6	13,8	15,1

Третий этап заключается в переносе полученных результатов псевдотемпературных деформаций (2.7) из решения температурной задачи (распределение расчётных значений температурного поля $T = T(y)$ и коэффициентов $\beta_i = \beta_i(T(y))$) в блок прочностных расчётов для той же конечно-элементной модели образца.

На последнем четвёртом этапе по заданным из предыдущего этапа значениям параметров $T = T(y)$ и $\beta_i = \beta_i(T(y))$ и вводимым механическим характеристикам для сплава ЭП742, описывающим упругое поведение материала (модуль Юн-

га $E = E(T)$ и коэффициент Пуассона ν), численно с помощью МКЭ решается краевая задача фиктивной термоупругости. Особенностью решения описанного этапа является указанный ранее учёт условия пластической несжимаемости материала $q_x + q_y + q_z = 0$, необходимого для реконструкции полей ОН, ввиду чего задаётся значение коэффициента Пуассона $\nu = 0,4999$.

Реализация описанной методики расчёта ОН и ПД для гладкого образца является сравнительно трудоёмкой даже для тела простой призматической формы, поэтому основные вычисления выполняются в программном пакете конечно-элементного моделирования ANSYS Mechanical APDL.

Аналогично рассмотренной в работе [55] задаче реконструкция полей ОН и ПД в образце выполняется следующий алгоритм решения. Процесс построения геометрической и расчётной трёхмерных моделей образцов по расчётной схеме, приведённой на рис. 2.1, осуществляется методом экструзии (вытягивания) в программном блоке решения задач температурного анализа. Для этого изначально в координатной плоскости xOy строится плоская модель с использованием поверхностных четырёхузловых элементов первого порядка MESH200, представляющая фронтальную грань образца. Затем, в направлении оси Oz выполняется построение линии вытягивания, моделирующей нижнее левое ребро AB с предварительной разметкой для разбивки на конечные элементы. После этого плоская сетка конечных элементов (КЭ) вытягивается вдоль указанного ребра, что приводит к формированию трёхмерной конечно-элементной модели (см. рис. 2.3). В отличие от метода [55], где расчётная модель формируется объёмными тетраэдрическими элементами второго порядка Tet10 с десятью узлами, предлагаемый подход моделирования осуществляется за счёт предварительно указанных температурных элементов первого порядка SOLID70 с восемью узлами. Переход от решения температурной задачи к решению задачи определения НДС в упругой постановке (фиктивной термоупругости) выполняется посредством автоматизированной замены температурных элементов SOLID70 на эквивалентные SOLID185 с помощью встроенной в ANSYS команды. Моделирование тонкого упрочнённого слоя

образца, не превышающего толщину 200 мкм, в задаче имитируется сгущением сетки объёмных элементов, линейный размер которых не превышает 7 мкм. Эту особенность следует учитывать, поскольку ОН обладают существенным градиентом (изменяется в пределах трёх порядков) в приповерхностном слое, где сконцентрирована область сжатия материала.

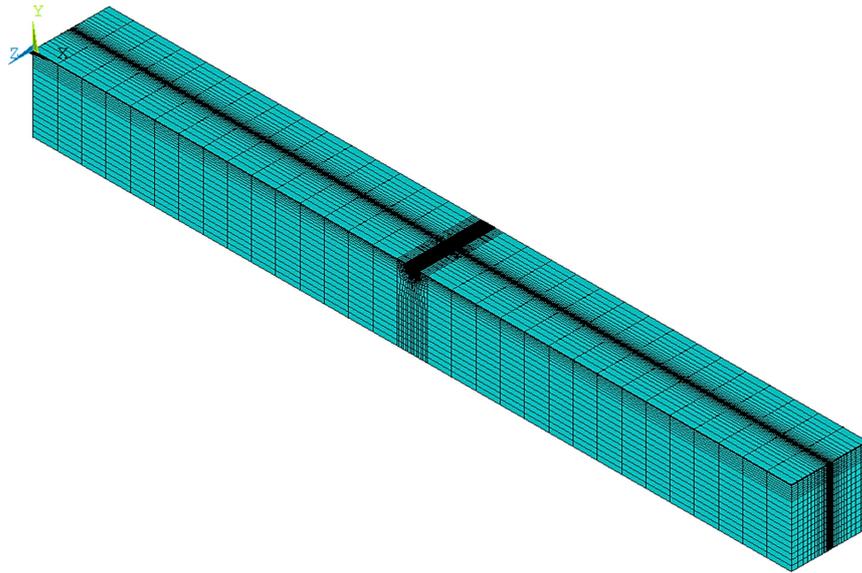


Рис. 2.3. Пример результата моделирования расчётной (конечно-элементной) модели призматического образца высотой $H = 10$ мм

Описанный способ моделирования позволяет существенно уменьшить размер расчётной модели с 730000–22000000 КЭ для модели, предложенной в работе [55], до 30000–77000 КЭ (в зависимости от высоты H) при практически одинаковых значениях полученных результатов решения, что является целесообразным с позиции снижения требований к вычислительным ресурсам и сокращения необходимого времени на расчёт. Компактный размер геометрической модели обусловлен сгущением сетки КЭ в сторону поперечного сечения, расположенного в плоскости yOz на расстоянии $x = 50$ мм, в котором проводится анализ распределения значений ОН и ПД (см. рис. 2.3).

При численном решении задач, основанном на МКЭ, использовались следующие граничные условия: ребро AB закреплялось жёстко, а противоположное

ему CD представляло шарнирное опирание с возможностью перемещений лишь вдоль оси Ox (см. рис. 2.1).

Пример результата численного (конечно-элементного) расчёта упрочнённого образца представлен в виде объёмного поля распределения ОН для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ (рис. 2.4) по данным, полученным из решения в узлах конечно-элементной модели. Отметим, что в дальнейшем изучение уровня и характера распределения компонент тензоров ОН $\sigma_i = \sigma_i(y)$ и ПД $q_i = q_i(y)$ будет проводиться только в виде двухмерного графического изображения узловых результатов. Для этого с помощью встроенного в программу ANSYS инструмента в блоке постпроцессора на экран выводился список выходных данных относительно выбранной величины ($\sigma_i(y)$ или $q_i = q_i(y)$), определённой вдоль указанной траектории расположенных узлов. По этим данным в программе Excel формировалась таблица результатов и выполнялось их графическое представление.

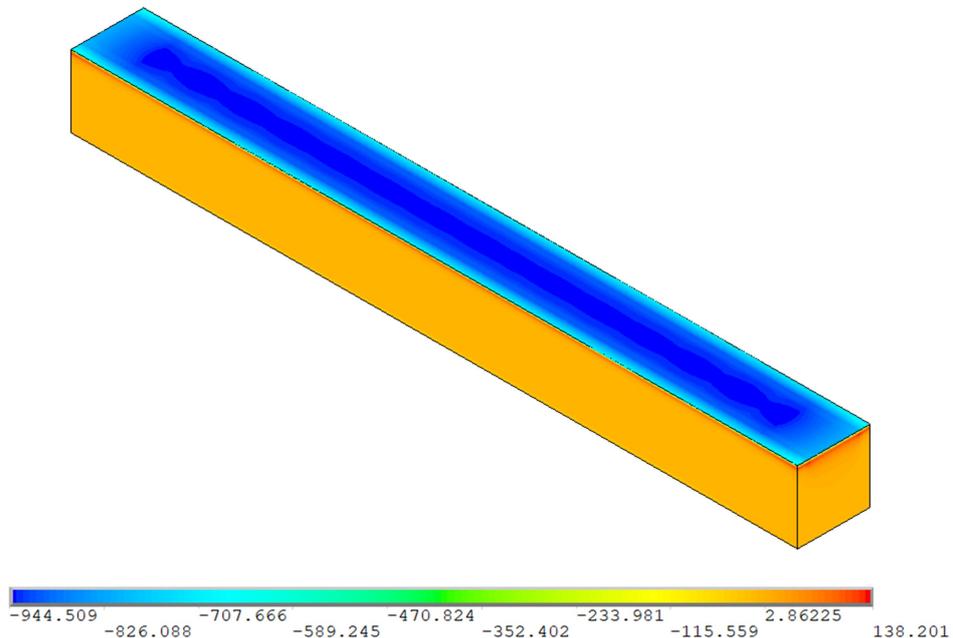


Рис. 2.4. Распределение поля остаточных напряжений для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ для случая упрочнённого образца высотой $H = 10$ мм

По результатам расчёта выполнен анализ НДС поверхностно упрочнённого образца при различных расчётных случаях $H = \{2; 4; 6; 8; 10\}$ мм, для чего осу-

существовало построение графиков зависимости компонент тензоров ОН $\sigma_i = \sigma_i(y)$ и ПД $q_i = q_i(y)$ по глубине h от верхней поверхности. В результате установлено хорошее соответствие значений, полученных в численном виде из решения термоупругой задачи МКЭ, со значениями полей, рассчитанных по феноменологической модели с помощью соотношений (2.5) и (2.6), а также с экспериментальными данными для призматического образца с $H = 10$ мм (см. рис. 2.2), что свидетельствует об адекватности реализуемого численного метода. В подтверждение этого, в качестве примера для расчётных случаев модели высотой $H = 10$ мм в пределах $h = 1$ мм на рис. 2.5, приведены графики распределения компонент ОН, на рис. 2.6 (а, б) – аналогичное распределение компонент ПД.

В отличие от феноменологической модели (2.5), (2.6), согласно которой выполняется равенство компонент ОН $\sigma_x(y) = \sigma_z(y)$ и ПД $q_x(y) = q_z(y)$, расчёт указанных величин численным методом реализуется с незначительным расхождением, обусловленным особенностью МКЭ, т.е. $\sigma_x(y) \approx \sigma_z(y)$, $q_x(y) \approx q_z(y)$. Погрешность расхождения между компонентами тензорных величин при этом можно оценить по зависимостям

$$\Delta_i^\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [\sigma_i^{p1}(y_k) - \sigma_i^{p2}(y_k)]^2}{\sum_{k=1}^n [\sigma_i^{p2}(y_k)]^2}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta_i^q = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n [q_i^{p1}(y_k) - q_i^{p2}(y_k)]^2}{\sum_{k=1}^n [q_i^{p2}(y_k)]^2}} \cdot 100\% \quad (i = x, y, z),$$
(2.8)

где y_k – точки дискретизации отрезка $0 \leq y \leq H$, σ_i^{p1}, q_i^{p1} – компоненты первой расчётной величины, σ_i^{p2}, q_i^{p2} – компоненты второй расчётной величины, n – количество точек дискретизации зависимости компонент тензоров $\sigma_i = \sigma_i(y)$ и $q_i = q_i(y)$.

Согласно соотношениям (2.8) между численными значениями в пределах тонкого упрочнённого слоя $h = 200$ мкм (полученными из решения термоупругой

задачи МКЭ), где преимущественно локализованы остаточные сжимающие напряжения, и данными по феноменологической модели (2.5), (2.6) погрешность расхождения результатов при $H = 2$ мм для компонент ОН $\sigma_x(y)$ и $\sigma_z(y)$ составляет $\Delta_i^\sigma = 2,21\%$, для компонент ПД $q_x(y)$ и $q_z(y)$ – $\Delta_i^q = 6,72\%$, для расчётного случая при $H = 10$ мм погрешности составляют $\Delta_i^\sigma = 1,7\%$, и $\Delta_i^q = 5,15\%$ соответственно.

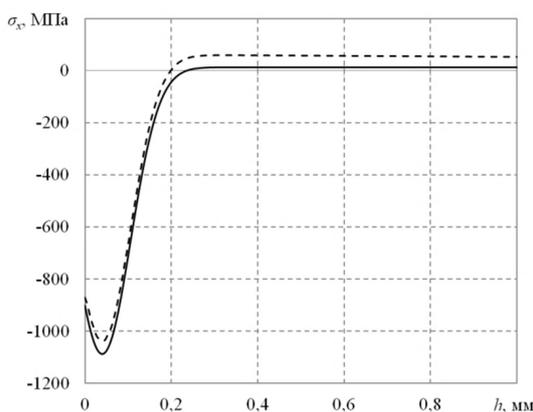


Рис. 2.5. Распределение компоненты остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(y)$ (а) по глубине h в сечении $x = 50$ мм, рассчитанной по феноменологической модели (2.5), (2.6) (сплошная линия) и полученной из численного решения термоупругой задачи (штриховая линия) при $H = 10$ мм

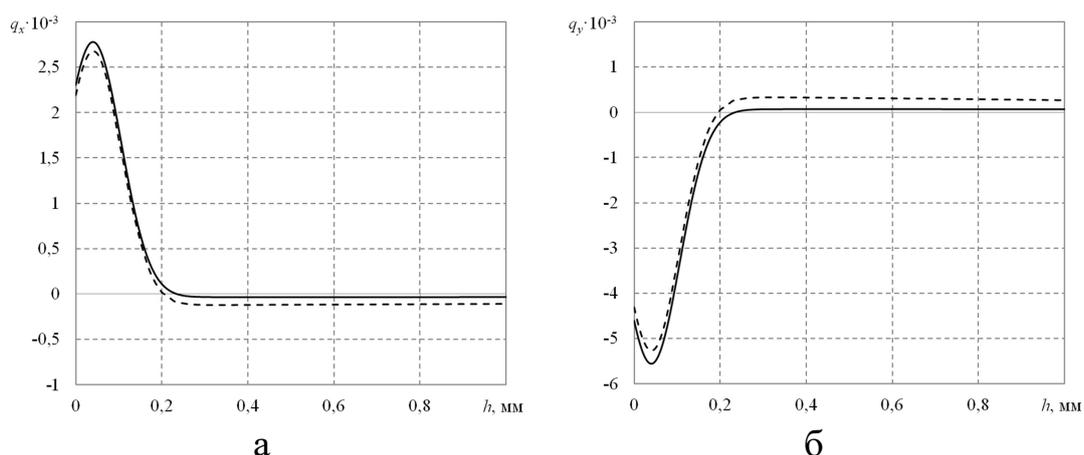


Рис. 2.6. Распределение компонент пластических деформаций по глубине h в сечении $x = 50$ мм, рассчитанных по феноменологической модели (2.5), (2.6) (сплошная линия) и полученных из численного решения термоупругой задачи (штриховая линия): а – $q_x = q_x(y)$ при $H = 10$ мм, б – $q_y = q_y(y)$ при $H = 10$ мм

Отдельно следует отметить, что построенная по соотношениям (2.1)–(2.5) феноменологическая модель обладает особенностью, связанную с тем, что $\sigma_y = 0 \forall y \in [0; H]$. Анализ численного решения задачи фиктивной термоупругости показывает, что в пределах толщины упрочнённого слоя $h = 200$ мкм эта компонента отлична от нуля и зависит от переменных x и y (рис. 2.7,б). Полученные численные значения компоненты $\sigma_y(y)$ в сопоставлении с компонентами $\sigma_x(y)$ и $\sigma_z(y)$ на 2–3 порядка меньше, поэтому механического влияния на призматический образец не оказывают. Появление отличной от нуля компоненты $\sigma_y = \sigma_y(y)$ при численной реализации является «издержками» дискретизации области интегрирования и большим градиентом напряжений $\sigma_x(y)$ и $\sigma_z(y)$ в тонком приповерхностном слое. Однако из рис. 2.7 следует, что по мере удаления от области сжатия материала величина $\sigma_y = \sigma_y(y) = 0$, что в частном случае можно трактовать как один из элементов адекватности разработанной КЭ-модели.

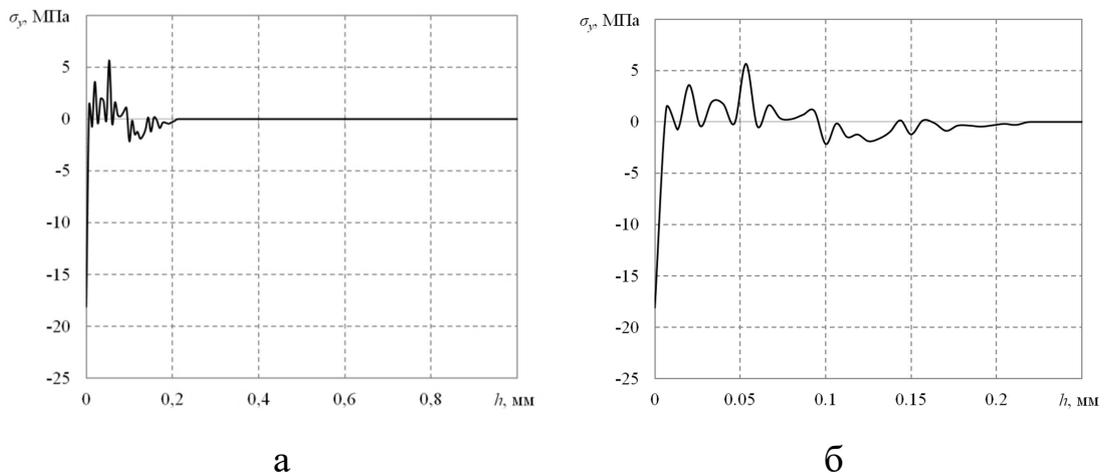


Рис. 2.7. Распределение компоненты остаточных напряжений $\sigma_y = \sigma_y(y)$ по глубине h при $x = 50$ мм, полученной из численного решения термоупругой задачи с помощью метода конечных элементов: а – при $H = 10$ мм, б – при $H = 10$ мм (укрупнённо)

2.3. Метод восстановления остаточных напряжений в призматическом образце со сквозными надрезами различного профиля и с трещиноподобными дефектами после опережающего поверхностного пластического деформирования на основе начальных термоупругих деформаций

Как было отмечено ранее, снижению эффективности сопротивления элементов конструкций действующим нагрузкам могут способствовать уже имеющиеся в деталях локальные концентраторы напряжений технологического происхождения (резьба, галтели малого радиуса, профильные канавки, выточки, пазы и иные углубления технического назначения), отсутствие которых порой невозможно в силу конструктивных особенностей. Возникающие микродефекты в процессе эксплуатации металлоизделий являются более серьёзными концентраторами, которые представляют опасность развития по глубине металла, что чаще всего приводит к разрушению.

Одним из решений описанной проблемы является применение методов ППД, наибольшая эффективность которых наблюдается именно для деталей с концентраторами напряжений. Так, например, предварительное упрочнение типовых деталей, эксплуатируемых в условиях многоциклового нагружения, приводит к увеличению предела выносливости до 30–70% и более, о чём свидетельствуют результаты научных работ [43, 45] и многих других.

Изготовлению технологических концентраторов напряжений предшествует упрочнение детали методом ОПД, процесс формирования которых сопровождается намеренным удалением части материала с наведёнными ОН и ПД. Вследствие этого в упрочнённом поверхностном слое происходит их перераспределение, причём наибольшая интенсивность процесса перераспределения ОН наблюдается в окрестности концентратора. Несмотря на это, для случаев изготовления «мелких» концентраторов, обусловленных функциональными потребностями или конструкторско-технологическими решениями, существует проблема применения

стандартных методов технологии упрочнения по причине малых геометрических размеров несплошностей по сравнению с геометрическими размерами деформирующих элементов.

Рассмотренная с математической точки зрения задача разработки метода расчёта ОН и ПД в области, прилегающей к концентратору напряжений, вызывает особый интерес в определении НДС в наименьшем сечении изучаемого тела. Важность решения такой задачи диктуется потребностями расчётной практики, поскольку при оценке предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами распределение ОН в сечении от дна концентратора по глубине используется в критериальных зависимостях [45, 43].

Существующая проблема отсутствия аналитических подходов реконструкции полей ОН в области концентратора напряжений после опережающего упрочнения поверхности трактуется высокой сложностью получения математического решения. В этом плане можно отметить лишь единственную работу [22], в которой методами теории функций комплексного переменного задача подобного рода решена для тонкой пластины с полуэллиптическим надрезом при плоском напряжённом состоянии. Однако применять это решение в прикладных задачах сложно, поскольку, например, в цилиндрических и плоских деталях с надрезами НДС относится к объёмному. В качестве замечания отметим, что получить аналитическое решение, например, в окрестности трещины даже в упругой постановке для неупрочнённой конструкции является очень сложной задачей, о чём свидетельствуют работы [95, 121, 147]. Определённые сложности возникают при численном моделировании процесса роста трещины и с помощью метода молекулярной динамики даже в упругости (и опять же – не в упрочнённых элементах конструкций), когда концентратор (трещина) создаётся путём удаления из тела нескольких рядов атомов [2, 119].

Несмотря на отмеченные замечания, получить решение задачи о распределении ОН и ПД в поверхностно упрочнённом призматическом теле в области

концентратора напряжений определённой геометрической формы можно посредством разработки метода расчёта, базирующегося на численном подходе.

По аналогии с решением, приведённым в предыдущем разделе, рассматривается призматический образец квадратного сечения $100 \times 10 \times 10$ мм с одиночным полукруглым надрезом радиуса ρ , нанесённым по технологии ОППД на упрочнённый поверхностный слой верхней грани в центральном сечении (см. рис. 2.8). Решение задачи состоит в определении НДС и характере распределения ОН и ПД в зоне профильного сквозного надреза.

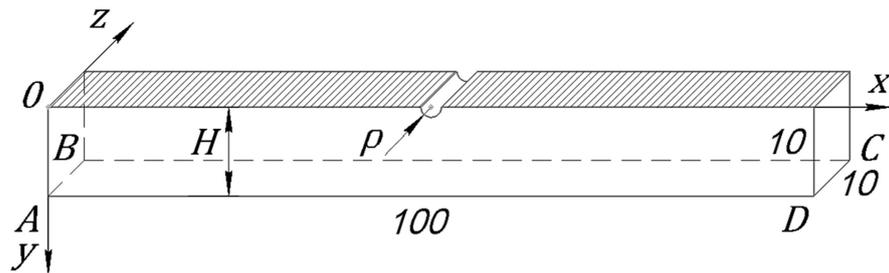


Рис. 2.8. Схематическое изображение упрочнённого образца с концентратором напряжений полукруглого профиля радиуса

Метод реконструкции полей ОН и ПД в рассматриваемом случае основан на тех же принципах и соотношениях (2.1)–(2.6), что и при построении математической модели для гладкого образца.

Согласно технологии ОППД, алгоритм решения задачи для призматического образца с одиночным концентратором заключается в повторении первого и второго этапов определения ОН и ПД и их последующего моделирования посредством равенства между пластическими и температурными деформациями, когда концентратор напряжений в образце ещё отсутствует.

На третьем этапе на упрочнённый призматический образец наносится надрез полукруглого профиля (см. рис. 2.8), т.е. из поверхностно упрочнённого слоя удаляется часть материала с наведёнными ОН и ПД. С позиции математического моделирования на этом этапе первоначальная конечно-элементная «бездефектная» модель (см. рис. 2.3) с заданными по формуле (2.7) псевдотемпературными начальными деформациями подвергается удалению части КЭ, представля-

ющих концентратор напряжений полукруглого профиля с радиусом ρ . Это приводит к образованию в объёме модели с концентратором поля полных деформаций, не удовлетворяющего уравнению совместности деформаций, которое трансформируется за счёт перераспределения упругих деформаций, и образец с надрезом приходит в равновесное состояние.

Отметим здесь следующий факт, влияющий на последующие расчёты. При нанесении надрезов, как правило, механическим способом (резанием) могут возникать существенные пластические деформации (наклёп) по периметру профиля, которые вызывают дополнительные остаточные напряжения, отделить которые от ОН вследствие ОППД невозможно. Однако в экспериментальных исследованиях используют способ, позволяющий нивелировать напряжения, вызванные резанием. Для этого тонкий слой материала толщиной 40–50 мкм в надрезе удаляется электрополированием, а предварительный надрез делается меньше с учётом удаляемого слоя, чтобы получить заданную (после полирования) геометрическую форму концентратора напряжений. Таким образом, наклёп от резания практически не оказывает влияния на формирование ОН в области концентратора напряжений после ОППД. Поэтому в дальнейших исследованиях используется гипотеза об отсутствии ОН после технологической операции нанесения концентратора.

На заключительном четвёртом этапе стандартными методами на основе МКЭ решается фиктивная задача термоупругости относительно напряжений (начальные (псевдотемпературные) деформации фактически задаются с помощью (2.7)). При этом основное внимание уделяется при геометрическом конечно-элементном моделировании области концентратора напряжений. Следует отметить, что если в гладком образце имелись лишь нормальные компоненты тензора напряжений $\sigma_x(y)$ и $\sigma_z(y)$, то в образце с концентратором (особенно в области, примыкающей к нему) возникают и недиагональные компоненты тензора напряжений, исследование которых также вызывает особый интерес.

Численное исследование выполнялось для расчётных случаев с четырьмя значениями радиуса надреза $\rho = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,5\}$ мм и при различной высоте призматического образца $H = \{2; 4; 6; 8; 10\}$ мм. Оценка НДС в области концентратора осуществлялась в четырёх сечениях (см. рис. 2.9), при этом распределение

компонент тензора ОН на всех последующих графиках строилось в зависимости от переменной толщины упрочнённого слоя h в зависимости от конкретно рассматриваемого сечения. Для сечения I–I толщина слоя имеет вид $h = y - \rho$, для сечения IV–IV – $h = y - \frac{\sqrt{3}}{2}\rho$, а для сечений II–II, III–III и гладкого образца – $h = y$.

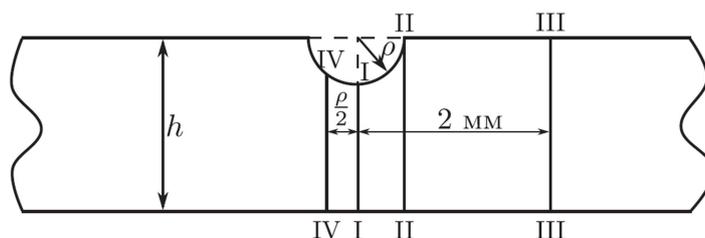


Рис. 2.9. Схематическое изображение области концентрации напряжений в области надреза полукруглого профиля

Геометрическое и конечно-элементное моделирование образца с концентратором напряжений также выполнялось методом экструзии (вытягиванием плоской сетки КЭ в объёмную в направлении оси Oz), за исключением следующей особенности. Основной акцент рассматриваемой задачи делался на размере выреза переменного радиуса ρ в зависимости от расчётного случая, поэтому моделирование концентратора представлялось объёмными элементами, расположенными по дуге полуокружности в радиальном направлении. Для учёта больших градиентов ОН в наружном слое надреза наименьший линейный размер рёбер элементов также не превышал 7 мкм. Описанный способ позволил и более точно описать полукруглую форму канавок в конечно-элементной модели (см. рис. 2.10) за счёт расположения достаточного количества элементов в окружном направлении и их сгущении вблизи концентратора, что положительно сказалось на точности расчёта ОН и ПД. При этом количество КЭ, составляющих расчётные модели образцов с надрезами, не превысило количество КЭ в аналогичных «бездефектных» моделях.

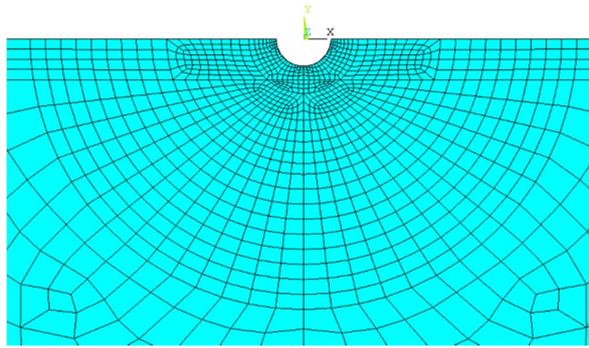


Рис. 2.10. Локальное изображение сетки КЭ, представляющей концентратор напряжений полукруглого профиля $\rho = 0,1$ мм

Для оценки возрастания степени концентрации напряжений в области «дефектов» в поверхностно упрочнённом образце выполнялся сравнительный анализ решений задач с концентраторами с решениями для гладкой «бездефектной» конструкции.

При исследовании полей ОН в зоне концентрации напряжений, полученных из решения задачи фиктивной термоупругости, наибольший интерес представляет распределение напряжений по глубине слоя в сечении I–I от дна концентратора (см. рис. 2.9), т.е. в наименьшем поперечном сечении модели, поскольку, как это уже отмечалось в главе 1, интегральная величина $\sigma_x = \sigma_x(h)$ входит в критериальные зависимости для оценки повышения предела выносливости в условиях многоциклового нагружения. На ниже приведённых графиках представлены зависимости $\sigma_x = \sigma_x(h)$ (рис. 2.11,а) и $\sigma_z = \sigma_z(h)$ (рис. 2.11,б) в сечении I–I для расчётного случая образца при $H = 2$ мм и различных значениях радиуса профильного надреза ρ . Аналогичное распределение величин ОН для случая образца высотой $H = 10$ мм показано на рис. 2.12,а, и 2.12,б соответственно. Можно заметить, что в отличие от расчётного случая гладкого образца, компоненты тензора напряжений $\sigma_x(h)$ и $\sigma_z(h)$ для которого совпадают, для образцов с концентратором напряжений указанные величины имеют существенное расхождение по значениям, причём напряжение $\sigma_z = \sigma_z(h)$ при каждом ρ меньше (по модулю), чем

напряжение $\sigma_x = \sigma_x(h)$. В частности, значение компоненты ОН $\sigma_x(h)$ на дне канавки, т.е. при $h = y - \rho$ для обоих расчётных случаев значений H при $\rho = 0,1$ мм, почти в 2 раза превышает значение $\sigma_z(h)$. Сравнение представленных графиков по соответствующим компонентам ОН свидетельствует о малозначительном влиянии высоты образца H на распределение напряжений, когда величина радиуса полукруглого надреза не превышает толщины упрочнённого слоя. Также установлено, что увеличение размера радиуса надреза свыше $\rho = 0,1$ мм «негативно» сказывается на величине ОН сжатия в призматическом образце: с увеличением ρ величины ОН в области концентратора становятся меньше (по модулю), чем в гладких образцах.

Анализ характера распределения ОН в сечении I–I по компоненте тензора $\sigma_y = \sigma_y(h)$ представляет следующую интересную особенность. Ранее было отмечено, что для гладкого образца напряжение $\sigma_y(h)$ теоретически равно нулю, а численное решение обусловлено наличием ненулевых значений только в области интенсивного воздействия сжимающих ОН, что объясняется появлением «шумов» (напряжений, значения которых на 2–3 порядка меньше, чем для компонент $\sigma_x(h)$ и $\sigma_z(h)$) из-за мелкого разбиения сетки КЭ в упрочнённом слое согласно описанной методике расчёта. В случае исследования характера распределения компоненты $\sigma_y(h)$ в поверхностно упрочнённом образце с концентратором ρ установлено, что эта величина принимает существенные значения. Наглядно характер распределения компоненты $\sigma_y = \sigma_y(h)$ продемонстрирован в виде графиков (рис. 2.13 (а, б)) для расчётных случаев образца высотой $H = 2$ мм и $H = 10$ мм соответственно.

В сечениях II–II и IV–IV кроме нормальных компонент тензора ОН наблюдаются и недиагональные компоненты. В качестве примера на рис. 2.14 приведены зависимости $\sigma_{xy} = \sigma_{xy}(h)$ для образца высотой $H = 10$ мм в сечении IV–IV при различных значениях радиуса надреза ρ . Наиболее существенные значения они

имеют для мелких надрезов, и, по всей видимости, их нужно учитывать в прочностных расчётах. Следует отметить, что в сечении III–III, расположенном на расстоянии 2 мм от центрального сечения I–I вдоль оси Ox , все компоненты тензора ОН имеют практически эквивалентный закон распределения, как и для компонент напряжений в гладком образце. Поэтому расстояние длиной в 2 мм можно условно считать границей зоны влияния концентратора напряжений на НДС призматического образца. Данный факт однозначно, хотя и частично, свидетельствует об адекватности разработанной методики оценки ОН в призматических телах с концентратором напряжений полукруглого профиля, расположенным на поверхности упрочнённой грани.

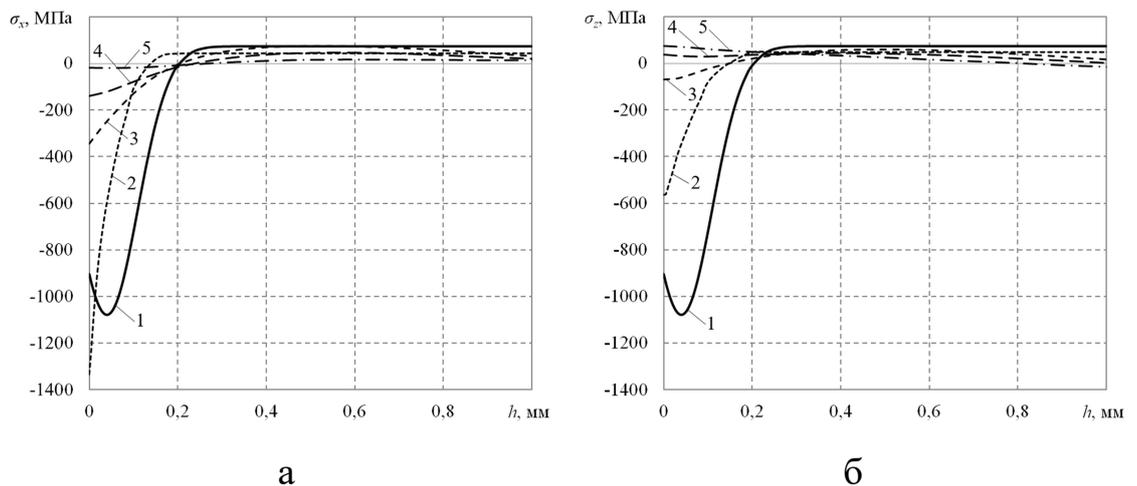


Рис. 2.11. Распределение компонент $\sigma_x = \sigma_x(h)$ (а) и $\sigma_z = \sigma_z(h)$ (б) в сечении I–I для образца высотой $H = 2$ мм. Маркеры: 1 – гладкий образец, 2 – $\rho = 0,1$ мм, 3 – $\rho = 0,2$ мм, 4 – $\rho = 0,3$ мм, 5 – $\rho = 0,5$ мм

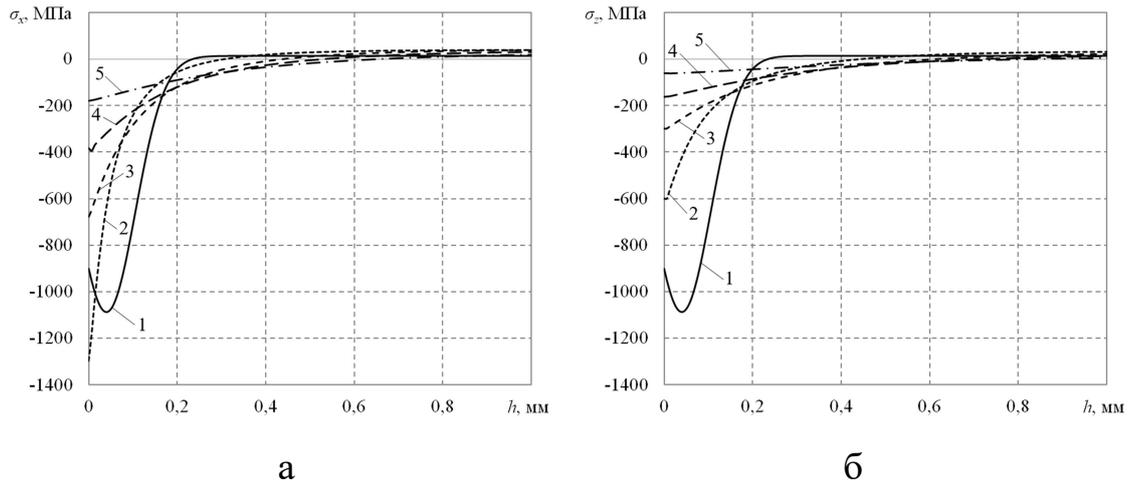


Рис. 2.12. Распределение компонент $\sigma_x = \sigma_x(h)$ (а) и $\sigma_z = \sigma_z(h)$ (б) в сечении I–I для образца высотой $H = 10$ мм. Маркеры: 1 – гладкий образец, 2 – $\rho = 0,1$ мм, 3 – $\rho = 0,2$ мм, 4 – $\rho = 0,3$ мм, 5 – $\rho = 0,5$ мм

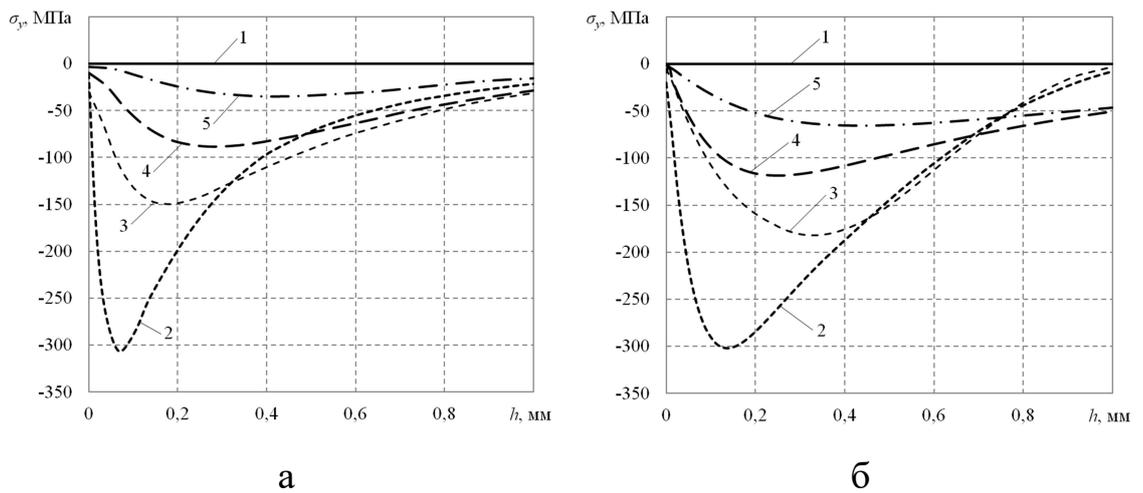


Рис. 2.13. Распределение компоненты $\sigma_y = \sigma_y(h)$ в сечении I–I для образца высотой $H = 2$ мм (а) и $H = 10$ мм (б). Маркеры: 1 – гладкий образец, 2 – $\rho = 0,1$ мм, 3 – $\rho = 0,2$ мм, 4 – $\rho = 0,3$ мм, 5 – $\rho = 0,5$ мм

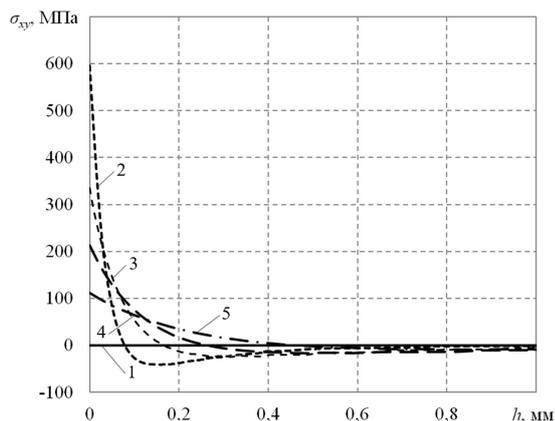


Рис. 2.14. Распределение компоненты $\sigma_{xy} = \sigma_{xy}(h)$ в сечении IV–IV для образца высотой $H = 10$. Маркеры: 1 – гладкий образец, 2 – $\rho = 0,1$ мм, 3 – $\rho = 0,2$ мм, 4 – $\rho = 0,3$ мм, 5 – $\rho = 0,5$ мм

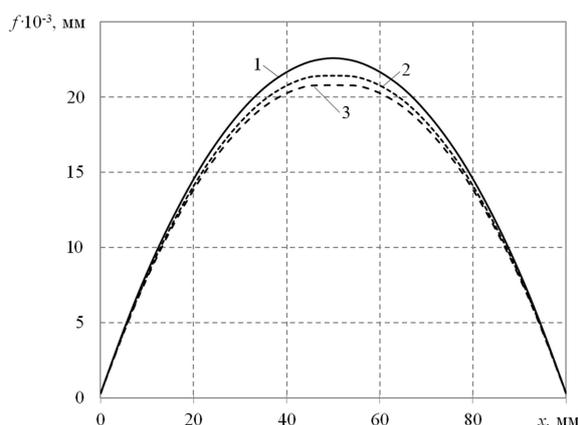


Рис. 2.15. Зависимость прогиба f для образца высотой $H = 10$ мм в срединной плоскости ($y = 5$ мм): 1 – гладкий образец, 2 – $\rho = 0,3$ мм, 3 – $\rho = 0,5$ мм

В заключение проводился сравнительный анализ по величине прогиба f для образца высотой $H = 10$ мм по срединной плоскости ($y = 5$ мм), появляющегося в процессе наведения на верхнюю поверхность ОН (см. рис. 2.15). Из анализа представленных данных следует интересный факт: с увеличением радиуса надреза величина прогиба, во-первых, падает, а во-вторых, она меньше, чем в гладком упрочнённом образце, и это несмотря на то, что сечение образца ослаблено наличием концентратора. По-видимому, это связано с локальным разрывом поля сжи-

мающих ОН $\sigma_x = \sigma_x(h)$ в области $0 \leq y \leq \rho$ и снижением их «мощности» из-за наличия надреза.

С использованием полученных результатов в работе было проведено аналогичное изучение характера распределения ОН для призматического поверхностно упрочнённого образца с одиночным надрезом квадратного (рис. 2.16,а), V-образного (рис. 2.16,б) и полуэллиптического (рис. 2.16,в) профилей при прочих равных условиях, т.е. с одной и той же информацией о полях ОН и ПД для гладкой детали.

Поскольку из решения модели с полукруглым концентратором было выявлено, что высота образца незначительно влияет на характер распределения ОН, то исследования для приведённых на рис. 2.16 образцов проводились на примере образца высотой $H = 10$ мм. В качестве ключевых геометрических характеристик концентраторов выступали следующие параметры. Квадратный поперечный надрез однозначно определялся сторонами $a = \{0,1; 0,3\}$ мм; V-образный концентратор напряжений задавался вырезом глубиной $b = \{0,1; 0,3\}$ мм с постоянным углом раскрытия $\varphi = 15^\circ$ и радиусом скругления при вершине $\rho_0 = 0,007$ мм; полуэллиптический вырез был сформирован сквозной канавкой с отношением сторон полуосей $c/d = 1/5$ при условии равенства $c = \{0,1; 0,3\}$ мм (обозначения на рис. 2.16).

Из результатов анализа графиков распределения величин ОН при решении модели с полукруглым концентратором установлено, что все значения напряжений по соответствующим компонентам практически не изменяются в случае нахождения выреза $\rho = 0,1$ мм в упрочнённом слое при различных значениях H , а при увеличении ρ уже наблюдается расхождение. В связи с этим, исследование образцов с описанными на рис. 2.16 концентраторами проводилось при двух глубинах $h = \{0,1; 0,3\}$ мм от дна концентратора, эквивалентных ключевым размерам несплошностей квадратного профиля a , V-образного b и полуэллиптического c соответственно. Распределение ОН в случае надреза квадратного профиля рассматривалось от дна концентратора в угловой точке, т.к. здесь образуется наибольшая концентрация напряжений. Результаты распределения величин ОН в

зависимости от h показаны на рис. 2.17 и 2.18 для компонент $\sigma_x = \sigma_x(h)$ (а) и $\sigma_y = \sigma_y(h)$ (б).

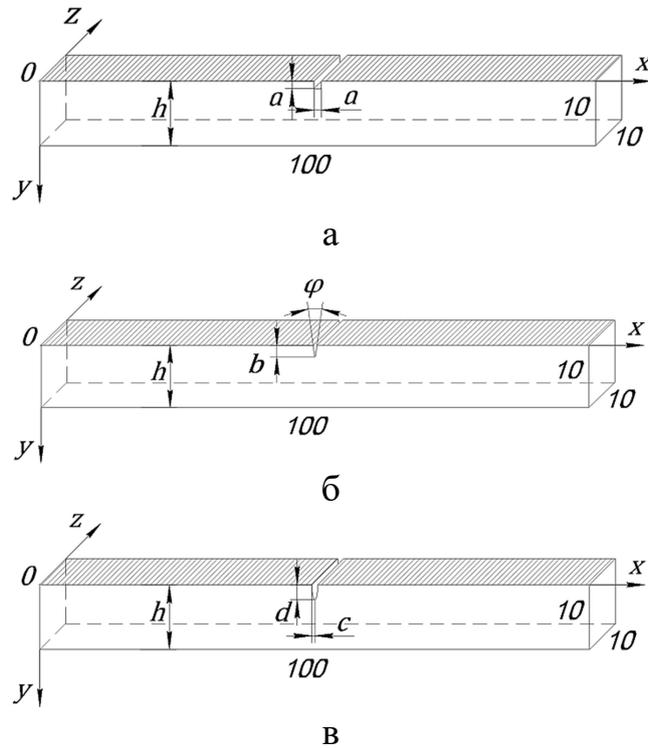


Рис. 2.16. Схематические изображения упрочнённого образца с надрезом квадратного (а), V-образного (б) и полуэллиптического (в) профиля

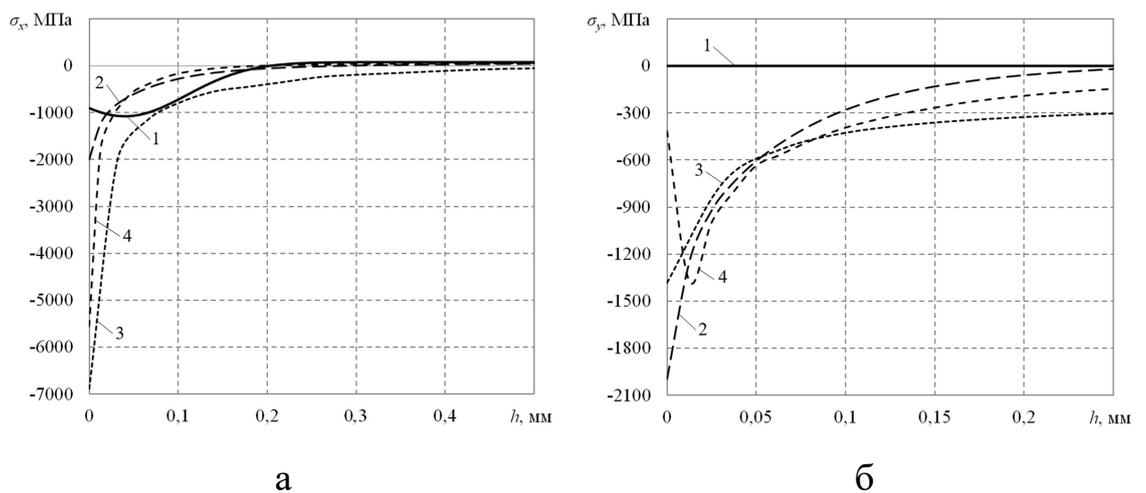


Рис. 2.17. Распределение компонент $\sigma_x = \sigma_x(h)$ (а) и $\sigma_y = \sigma_y(h)$ (б) от дна концентратора по глубине упрочнённого слоя h при $H = 10$ мм: 1 – гладкий образец, 2 – $a = 0,1$ мм, 3 – $b = 0,1$ мм, $\varphi = 15^\circ$, 4 – $c = 0,1$ мм

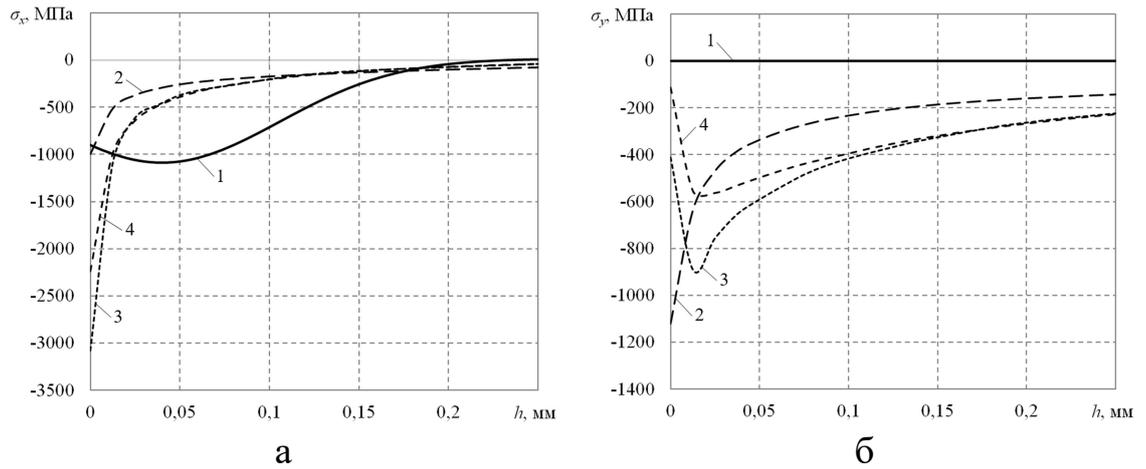


Рис. 2.18. Распределение компонент $\sigma_x = \sigma_x(h)$ (а) и $\sigma_y = \sigma_y(h)$ (б) от дна концентратора по глубине упрочнённого слоя h при $H = 10$ мм: 1 – гладкий образец, 2 – $a = 0,3$ мм, 3 – $b = 0,3$ мм, $\varphi = 15^\circ$, 4 – $c = 0,3$ мм

При сравнительном анализе полученных результатов можно заметить, что в наиболее «острых» концентраторах напряжений, форма профиля надреза которых близка к трещинообразному виду, наблюдаются несоизмеримо большие значения ОН (превышающие, например, предел текучести материала ЭП742 в несколько раз). С позиции механики разрушения это явление обосновано наличием состояния, близкого к сингулярности упругих напряжений вблизи кончика дефекта. Установлено, что на расстоянии 0,5 мм и более для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(h)$ и на расстоянии свыше 1 мм для компоненты $\sigma_y = \sigma_y(h)$ от кромки надреза по мере удаления от концентратора напряжений в направлении оси Ox все полученные решения асимптотически приближаются к решению компонент ОН для бездефектного образца, что также можно трактовать как один из элементов адекватности разработанного численного метода.

2.4. Исследование влияния величины зоны упрочнения в области надреза полукруглого профиля призматического образца на характер и величину остаточных напряжений в упругой постановке

Рассмотрим применение разработанной методики расчёта ОН для оценки влияния размеров зоны упрочнения в области центрального надреза ($x = 50$ мм) на примере надреза полукруглого профиля на НДС призматического образца, изготовленного из того же сплава ЭП742. В этом случае поверхностному упрочнению подвергается не вся верхняя грань, а лишь её малая часть вблизи концентратора напряжений (заштрихована на рис. 2.19). Задача состоит в исследовании характера и величины ОН по глубине от дна концентратора в зависимости от радиуса ρ и величины зоны упрочнения $2k$. Основная проблема в этом случае заключается в определении оптимального значения величины k , увеличение которой практически уже не влияет на НДС в области надреза.

Восстановление полей ОН и ПД для показанной на рис. 2.19 модели образца выполняется на основе уже известной методики расчёта по первоначальным деформациям, приведённой в разделе 2.3. Как уже отмечалось выше, этот подход широко используется в современных исследованиях в связи с возросшим спектром возможностей вычислительной техники и программного обеспечения для решения задач прикладного характера [6, 48, 55, 56, 64, 80, 88, 92].

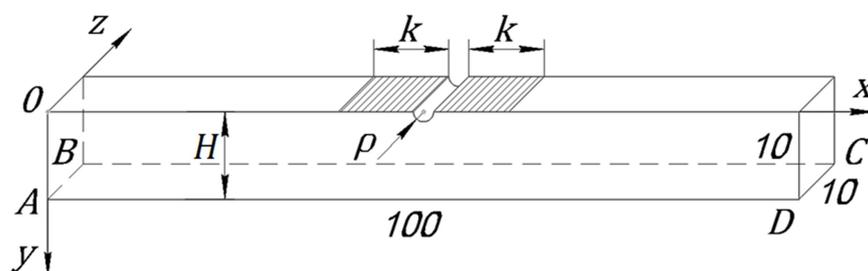


Рис. 2.19. Схематическое изображение частично упрочнённого образца с концентратором напряжений

Отличительная особенность подхода при численном решении температурной задачи в программной среде ANSYS заключается в способе задания темпера-

турного поля $T = T(y)$ посредством частичного приложения температуры $T = T_1 = 400$ °С со стороны упрочнённой верхней поверхности образца и задания температуры $T = T_0 = 20$ °С по всей поверхности противоположной ей грани. При этом большая часть верхней поверхности (за исключением зоны длиной $2k$ и шириной 10 мм), как и оставшиеся боковые грани, были теплоизолированы. Граничные условия, накладываемые на расчётную модель при решении задачи фиктивной термоупругости, принимались по аналогии с рассмотренными ранее граничными условиями для гладкого образца и образца с концентраторами напряжений.

Основное исследование проводилось при значениях радиуса надреза $\rho = \{0,1; 0,3; 0,5\}$ мм и при различных значениях величины зоны упрочнения $k = \{1; 2; 4; 6; 8; 10\}$ мм. Следует отметить, что расчётные случаи упрочнения всей верхней грани при трёх значениях ρ , когда параметр $k = \{49,9; 49,7; 49,5\}$ мм, были ранее рассмотрены в пункте 2.3 настоящей работы. С целью проведения сравнительного анализа полученных результатов исследование частичного упрочнения верхней грани проводилось и для гладкого «бездефектного» образца.

В качестве иллюстрации на нижеприведённых графиках показаны результаты расчётных значений ОН $\sigma_x = \sigma_x(y)$ (рис. 2.20 (а, б)), $\sigma_y = \sigma_y(y)$ (рис. 2.20,в) и $\sigma_z = \sigma_z(y)$ (рис. 2.20,г), распределённых по высоте упрочнённого слоя в центральном сечении ($x = 50$ мм) в зависимости от значения параметра k для гладкого образца и образца с полукруглым надрезом $\rho = 0,1$ мм. Для случая гладкого «бездефектного» образца величина h соответствует глубине упрочнённого слоя от верхней грани в зависимости от зоны упрочнения $k = 2$ мм, $k = 6$ мм и $k = 50$ мм (в последнем случае упрочнена вся верхняя грань). Для образца с концентратором размер зоны полного упрочнения верхней грани для всех рассматриваемых расчётных случаев определяется как $k = 50 - \rho$.

Из анализа результатов расчётов и представленных графиков следует, что в гладком образце (см. рис. 2.20,а) распределение ОН в центральном сечении при $k > 8$ мм практически не изменяется и близко к НДС гладкой модели образца с

полностью упрочненной гранью. На приведённых графиках распределения нормальных компонент тензора ОН при радиусе надреза $\rho = 0,1$ мм, рис. 2.20 (б, в, г), находящегося в зоне упрочнения материала (в области его сжатия), аналогичное распределение напряжений практически стабилизируется и близко к случаю упрочнения всей грани также уже при $k \geq 8$ мм. Этот же результат справедлив и для надрезов $\rho = 0,3$ мм и $\rho = 0,5$ мм (см. рис. 2.21), однако в этом случае величины всех компонент тензора сжимающих напряжений существенно меньше, чем при упрочнении всей верхней грани призматического образца. Это связано с тем, что глубина надреза велика по сравнению с толщиной упрочнённого слоя $h = 200$ мкм.

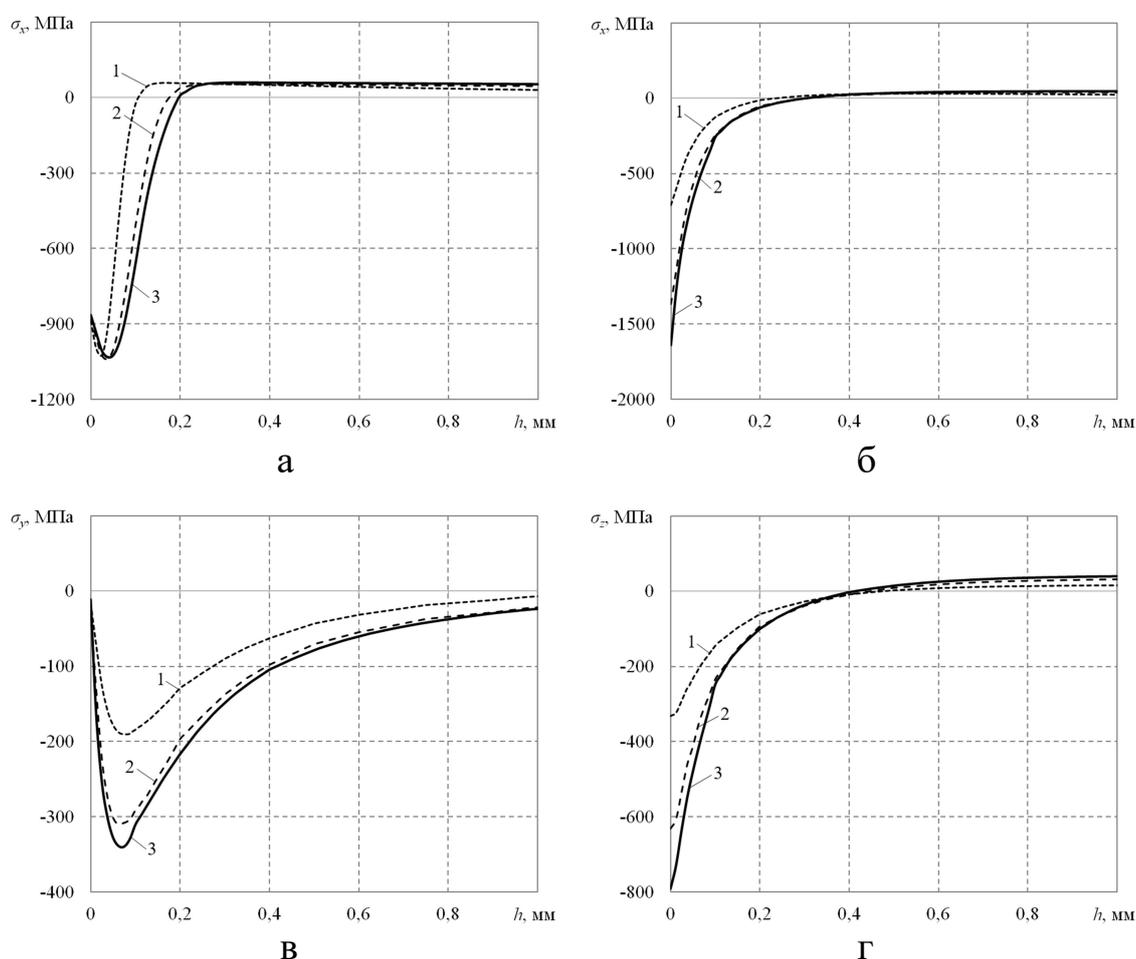


Рис. 2.20. Распределение остаточных напряжений в гладком образце (а) и в центральном сечении образца с надрезом $\rho = 0,1$ мм (б, в, г) в зависимости от величины k : 1 – $k = 2$ мм, 2 – $k = 6$ мм, 3 – $k = 50$ мм (а), $k = 49,9$ мм (б, в, г)

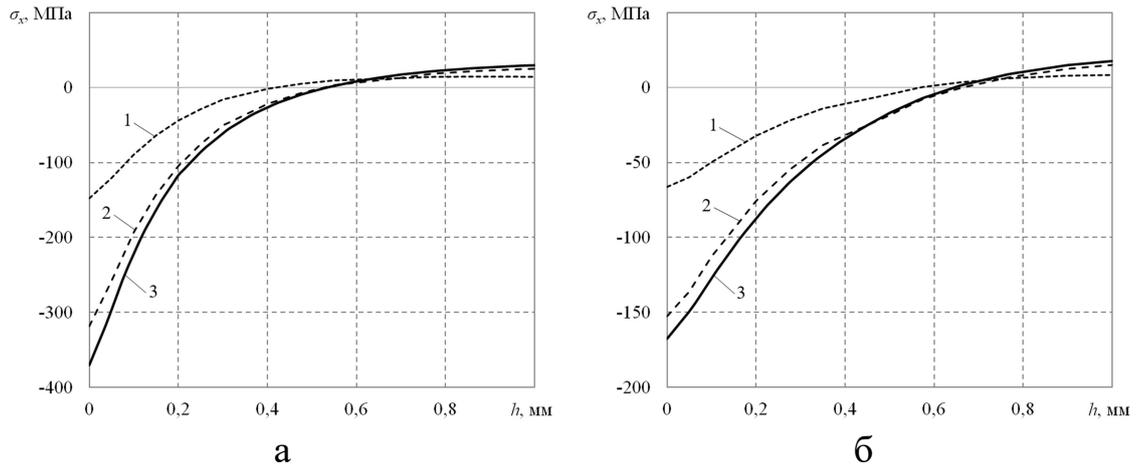


Рис. 2.21. Распределение остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(h)$ в центральном сечении образца с надрезом $\rho = 0,3$ мм (а) и $\rho = 0,5$ мм (б) h в зависимости от величины k : 1 – $k = 2$ мм, 2 – $k = 6$ мм, 3 – $k = 49,7$ мм (а), $k = 49,5$ мм (б)

Выполненные исследования показывают, что при применении технологии ОПД под изготовление технологического концентратора напряжений существует оптимальный размер зоны упрочнения, увеличение которого не приводит к значительным изменениям НДС в наименьшем сечении конструкции с полукруглой канавкой. Этот результат можно применять для назначения оптимальных режимов упрочнения наружной поверхности призматических тел с типовым концентратором напряжений технологического назначения при использовании технологии ОПД.

2.5. Исследование остаточных напряжений в призматическом поверхностно упрочнённом образце с периодически повторяющимися концентраторами напряжений типа сквозных полукруглых надрезов

Наличие одного технологического концентратора напряжений на поверхности детали приводит к локальному изменению НДС, несколько типовых несплошностей – представляют серьёзное снижение прочности металлоизделия. Изучение НДС образцов с периодически повторяющимися профильными концентраторами напряжений обосновано конструкторско-технологической потребно-

стью, например, при проектировании ёлочных замков лопаток ГТД, резьбовых соединений различного назначения и т.д. [44]. Поэтому здесь возникает практический интерес в эффективности ППД в случае применения технологии ОПД.

Исследование компонент ОН проводилось на основе призматического поверхностно упрочнённого образца, ослабленного повторяющимися надрезами полукруглого профиля $\rho = \{0,1; 0,3\}$ мм в количестве $n = \{3; 5; 7; 9\}$ (см. рис. 2.22). Нечётное количество надрезов n выбиралось из тех соображений, чтобы реализовать детальное изучение центрально расположенного концентратора и по полученным данным выполнить сравнительный анализ результатов в сечениях симметрично расположенных надрезов. Их нахождение предполагалось либо в упрочнённом слое образца ($\rho = 0,1$ мм), либо за его пределами, частично в основном материале ($\rho = 0,3$ мм).

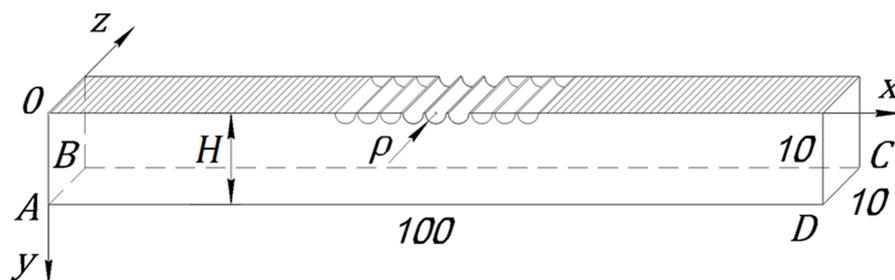


Рис. 2.22. Схематическое изображение образца с упрочнённой верхней гранью при наличии повторяющихся концентраторов напряжений

Задача восстановления полей ОН и ПД при заданной высоте образца $H = 10$ мм решалась с параметрами аппроксимации σ_0 , σ_1 , и b , приведёнными в таблице 2.1 для аналогичной по высоте гладкого образца. Как и в образце с одиночным надрезом, применялся численный метод расчёта величин ОН и ПД по известному распределению экспериментальной компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ (см. рис. 2.2).

Алгоритм численного решения задачи в рассматриваемом случае отличается лишь особенностью геометрического и конечно-элементного моделирования концентраторов образца в количестве n . Для этого сначала выполнялось построение двухмерной сетки КЭ, представляющей сегмент модели высотой H с надрез-

зом полукруглой формы, который методом экструзии также вытягивался в объёмную форму (см. рис. 2.23). Затем, полученный объём с сеткой КЭ смещался в направлении оси Ox до совпадения торцевой грани с плоскостью yz , после чего отражался симметрично относительно этой плоскости. Подобная процедура повторялась несколько раз до получения модели с требуемым количеством концентраторов. После моделирования участка призматического образца с концентраторами выполнялось ориентирование полученной модели в системе координат по центральному концентратору и достраивалась недостающая гладкая часть модели методом экструзии торцевых поверхностей вдоль оси Ox . Устранение отсутствия связи между некоторыми элементами модели выполнялось за счёт сшивки узлов с помощью встроенной в программу ANSYS команды. Описанный метод «наращивания» модели позволил получить структурированную сетку объёмных КЭ во всех исследуемых концентраторах напряжений. Общий вид модели и локальное представление сетки КЭ с концентраторами для расчётного случая при $\rho = 0,3$ мм и $n = 9$ показаны на рис. 2.24,а и рис. 2.24,б соответственно.

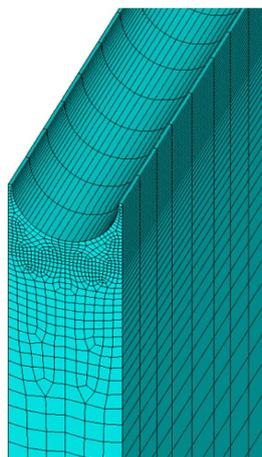


Рис. 2.23. Увеличенное изображение объёмной сетки КЭ, представляющей сегмент образца с полукруглым надрезом

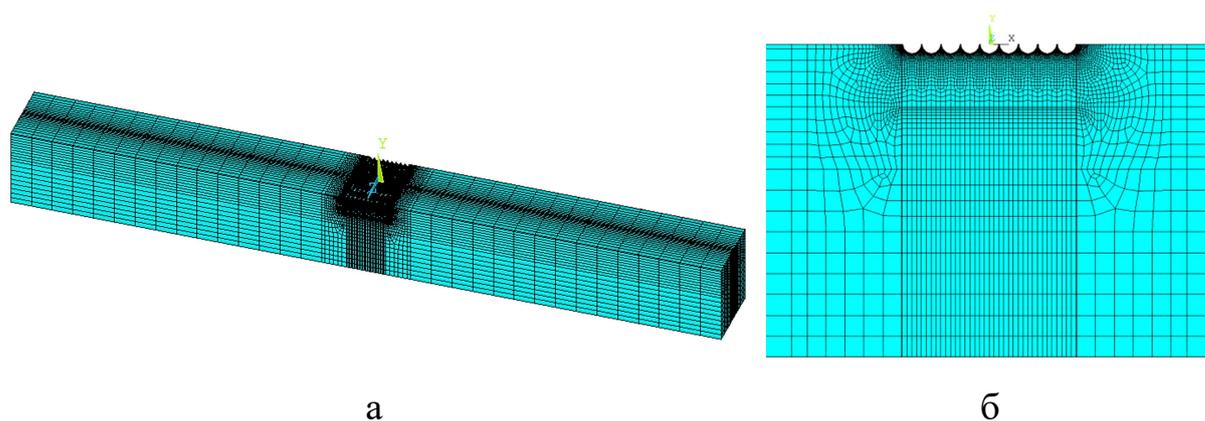


Рис. 2.24. Общий вид сетки КЭ модели (а) и увеличенное изображение концентраторов $\rho = 0,3$ мм в количестве $n = 9$ (б)

Оценка полученных результатов решения для каждого отдельно взятого расчётного случая выполнялась по сечениям, проходящим от впадины каждого концентратора на глубину $h = 1$ мм. Изучение величин ОН при глубине свыше этого значения лишено всякого смысла, так как распределение значений компонент тензора ОН $\sigma_i = \sigma_i(y)$ ($i = x, y, z$) при $(1 \leq y \leq h)$ носит асимптотический характер. Для идентификации поперечных концентраторов напряжений их нумерация проводилась по порядку слева направо. В качестве примера на графиках приводятся результаты расчётов компонент ОН для расчётного случая при $n = 9$ и $\rho = 0,1$ мм (рис. 2.25,а) и $\rho = 0,3$ мм (рис. 2.25,б) по компоненте $\sigma_x = \sigma_x(y)$, а также при $n = 9$ для $\rho = 0,3$ мм по компонентам $\sigma_y = \sigma_y(y)$ (рис. 2.25,в) и $\sigma_z = \sigma_z(y)$ (рис. 2.25,г). Маркер 5 соответствует центральной канавке, а маркеры $\{1, 9\}$, $\{2, 8\}$, $\{3, 7\}$, $\{4, 6\}$ – номерам канавок, расположенных симметрично относительно центральной по мере удаления от неё, соответственно. Маркер 0 на рис. 2.25,а соответствует распределению компоненты ОН $\sigma_x = \sigma_x(y)$ упрочнённом слое гладкого (бездефектного) образца.

Из графиков видно, что по мере удаления канавок от центра к периферии наблюдается тенденция существенного снижения величины напряжений для всех компонент тензора сжимающих ОН. При этом значения ОН в примыкающих к

центральному надрезу 5 канавок 4 и 6 для всех расчётных случаев практически совпадают. Отдельно следует отметить, что несмотря на выход канавок 1, 2, 8 и 9 с радиусами $\rho = 0,3$ мм из зоны упрочнения, в них всё ещё наблюдаются сжимающие ОН. Результаты распределения компоненты ОН $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h для других расчётных случаев $\rho = \{0,1; 0,3\}$ мм при $n = \{3; 5; 7\}$ приведены ниже на рис. 2.26. Обозначение маркеров при этом аналогично предыдущему рисунку 2.25.

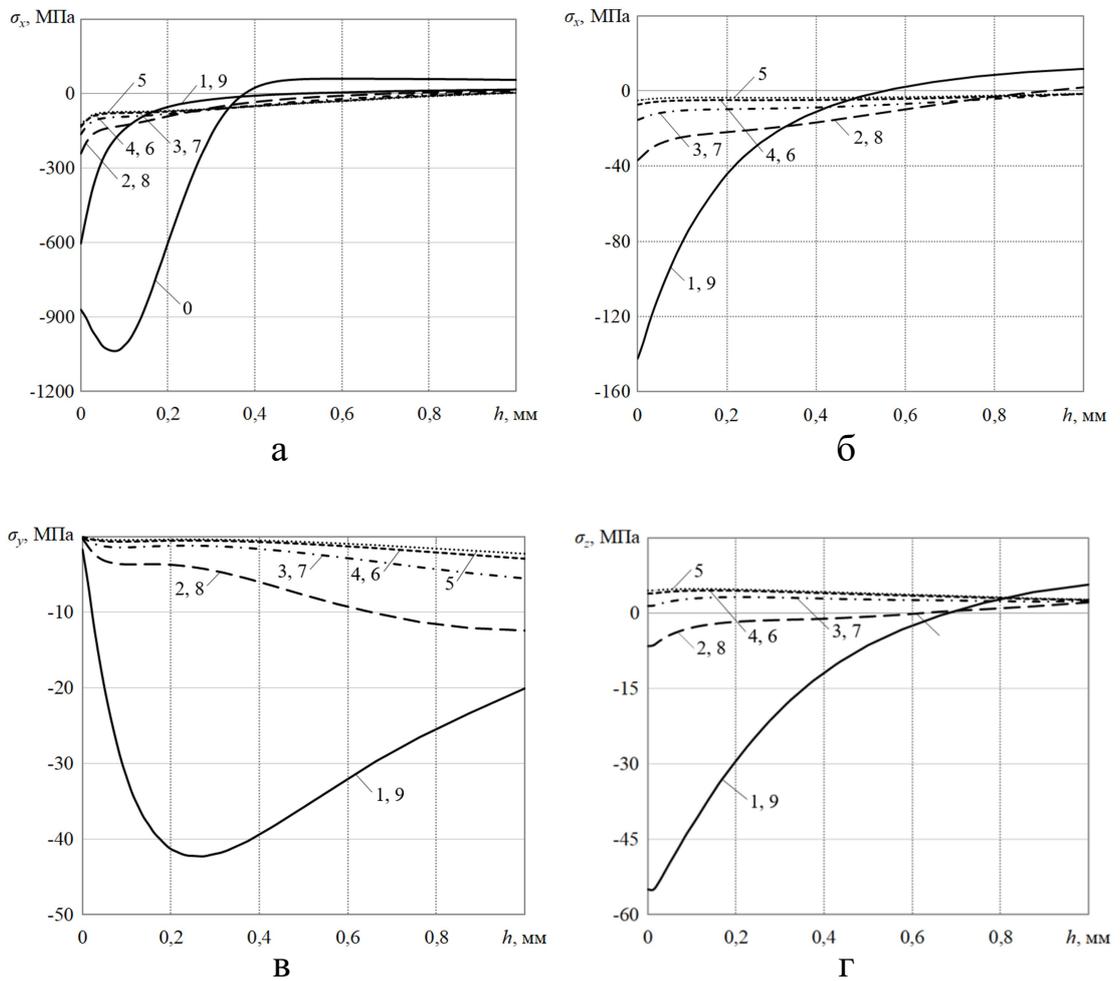


Рис. 2.25. Распределение компонент остаточных напряжений для случая $n = 9$: а – $\sigma_x = \sigma_x(y)$ при $\rho = 0,1$ мм, б – $\sigma_x = \sigma_x(y)$ при $\rho = 0,3$ мм, в – $\sigma_y = \sigma_y(y)$ при $\rho = 0,3$ мм, г – $\sigma_z = \sigma_z(y)$ при $\rho = 0,3$ мм

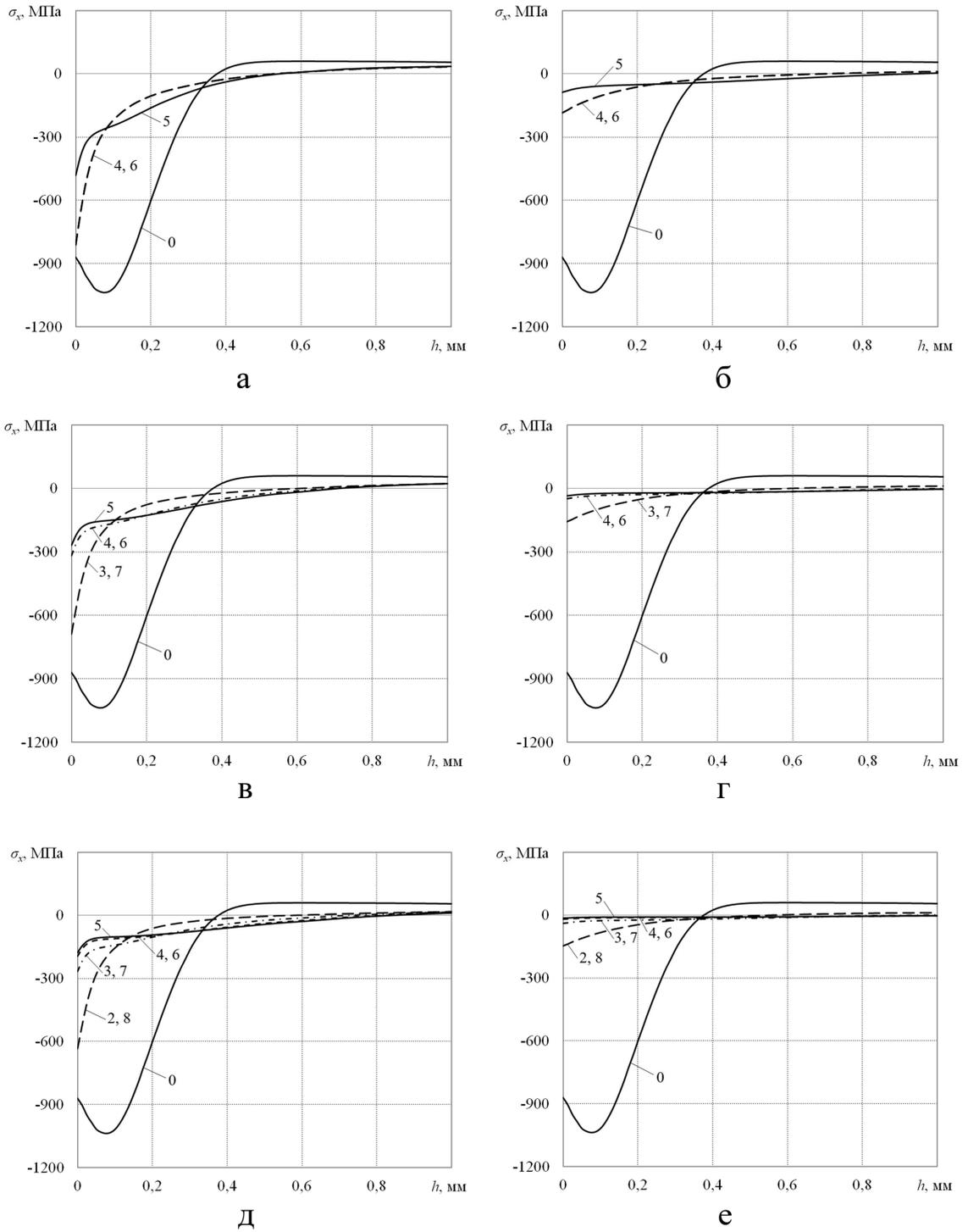


Рис. 2.26. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h для различных случаев n : а — $n = 3, \rho = 0,1$ мм, б — $n = 3, \rho = 0,3$ мм, в — $n = 5, \rho = 0,1$ мм, г — $n = 5, \rho = 0,3$ мм, д — $n = 7, \rho = 0,1$ мм, е — $n = 7, \rho = 0,3$ мм

Сделаем некоторые выводы по данному пункту. Анализ данных расчёта и графической информации (рис. 2.25 и 2.26) 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. Но при глубине надреза, меньшем толщины упрочнённого слоя, т.е. при $\rho = 0,1$ мм, ОН ещё сохраняют значительную величину, особенно при $n = 3$ и $n = 5$. Как следствие этого вывода отметим, что для оценки НДС в призматическом образце с периодически повторяющимися концентраторами можно использовать разработанную КЭ-модель в упругой постановке, которая используется и для гладкого образца.

2.6. Выводы по главе 2

Исходя из представленных результатов исследований можно сделать ниже следующие выводы.

1. Разработан в упругой постановке численный метод расчёта ОН в призматическом образце с поперечными одиночными сквозными надрезами полукруглого, квадратного, V-образного и полуэллиптического профилей и периодически повторяющимися концентраторами типа сквозных полукруглых надрезов после опережающего поверхностного пластического деформирования. Выполнена проверка адекватности численного метода расчёта остаточных напряжений экспериментальным данным в частном случае гладкого поверхностно упрочнённого образца из сплава ЭП742, наблюдается соответствие расчётных и экспериментальных данных.
2. Выполнен параметрический анализ влияния геометрических размеров и формы надрезов, их количества и величины зоны поверхностного упрочнения на характер напряжённо-деформированного состояния в области концентрации напряжений в поверхностно упрочнённом призматическом образце.
3. Установлено, что если глубина поперечного надреза рассмотренных типов не превышает толщины упрочнённого слоя (области сжатия материала), то величина продольной компоненты тензора остаточных напряжений в непосредственной близости ко дну концентратора существенно превышает (по модулю) аналогичную величину для гладкого поверхностно упрочнённого призматического образца. Если же глубина надреза больше толщины упрочнённого слоя, то остаточные напряжения в наименьшем сечении детали меньше (по модулю), чем в гладком образце.
4. Для гладких образцов и образцов с надрезами установлены оптимальные области локального упрочнения поверхности, за границами которых напряжённо-деформированное состояние практически стабилизируется, что даёт инструмент для оптимизации процесса упрочнения поверхности плоской детали при нанесении на неё надрезов технологического назначения.
5. Показано, что в упрочнённом образце с профильным концентратором напряжений величина прогиба вследствие наведённых самоуравновешенных ОН меньше, чем в гладком «бездефектном» образце.

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

Материалы данной главы излагаются в соответствии с работами автора [79, 82, 83] настоящей диссертационной работы.

3.1. Постановка задачи

При решении задач теории упругости по определению НДС в телах с геометрическими надрезами существует проблема оценки напряжений вблизи очага концентрации напряжений, связанная с правдоподобностью полученных результатов. Существующие подходы решения задач подобного рода предписывают сравнительно высокий уровень напряжений в этом месте, поэтому оценка прочностных свойств изучаемого тела посредством исследования напряжений на базе теории упругости с позиции практической значимости лишена смысла. Этот факт теоретически обоснован на примере задачи для упругого (хрупкого) тела с трещиной А. Гриффитсом, аналитическое решение которой представляет сингулярность напряжений в вершине дефекта. В реальной конструкции напряжения ограничены пределом текучести материала, превышение значения которого приводит к появлению необратимых пластических деформаций и последующему разрушению. Поэтому решение таких задач должно сводиться к решению в упругопластической постановке.

Всё вышеизложенное относится и к поставленным задачам для поверхностно упрочнённых конструкций с различными видами концентраторов напряжений. В главе 2 показано, что для ряда концентраторов напряжений, глубина которых меньше толщины упрочнённого слоя, решения в упругой постановке дают практически неприемлемые значения ОН, модули значений которых могут превосходить предел текучести материала в несколько раз (см. графики на рис. 2.11,а, 2.12,а, 2.17 (а, б), 2.18 (а, б)). В связи с этим целью данной главы является разра-

ботка метода расчёта остаточных напряжений в призматическом образце с концентраторами напряжений после ОППД, рассмотренными в главе 2, с использованием упругопластических постановок соответствующих задач и выполнении сравнительного анализа решений в упругой и упругопластической постановках. Отметим, что подобные задачи в механике упрочнённых конструкций в настоящее время не рассматривались.

3.2. Разработка и реализация метода расчёта полей остаточных напряжений в области сквозных надрезов различного профиля поверхностно упрочнённого призматического образца в упругопластической постановке

В разделе 2.4 на примере анализа ОН в области острых трещиноподобных концентраторов отмечалось, что полученные на основе решения задачи фиктивной термоупругости значения сжимающих напряжений не отражают физичность процесса ППД ввиду сильно завышенных показателей по сравнению со значениями ОН в гладком образце, при этом значения сжимающих напряжений были в несколько раз выше предела текучести в некоторых частных случаях. С этой целью было выполнено исследование компонент напряжений в поверхностно упрочнённом слое на примере призматическом образце с расчётными случаями надрезов, приведённых на рис. 2.16 (а, б, в).

Как было отмечено выше, решение задач подобного рода следует выполнять с учётом ограничения упругих деформаций и напряжений введением предела текучести материала. На основе этих соображений была проведена модификация существующего численного метода расчёта ОН и ПД в упрочнённом слое призматического образца посредством добавления в модель материала кривой упругопластического деформирования для сплава ЭП742 (см. рис. 3.1). Порядок выполнения численного решения задачи для этого случая остаётся таким же, как и в

случае решения задачи фиктивной термоупругости по первоначальным (термоупругим) деформациям.

Отдельно отметим особенность решения термоупругопластической задачи, поскольку исходной информацией для её решения в решателе пакета ANSYS является диаграмма упругопластического деформирования сплава ЭП742. Во-первых, для материала ЭП742 её в научной литературе, к сожалению, не имеется. Поэтому при исследовании НДС упрочнённого призматического образца в упругопластической постановке предполагалось, что диаграммы «растяжение-сжатие» для этого сплава идентичны. Другими словами, эффекты типа Баушингера для сплава ЭП742 в дальнейших исследованиях не учитываются. Симметрия свойств на «растяжение-сжатие» используется и в главе 4 для деформации ползучести. Во-вторых, уровень ОН в области сжатия даже для гладкого образца достаточно высокий, а для детали с «мелкими» концентраторами они ещё больше (по модулю), что приводит к появлению вторичных пластических деформаций большой интенсивности в деталях с концентраторами напряжений. В связи с этим в настоящей работе используется не номинальная диаграмма упругопластического деформирования в координатах «номинальное напряжение (σ_0) – полная деформация (ε)», а диаграмма «истинное напряжение (σ) – полная деформация (ε)». Связь между истинным (σ) и номинальным (σ_0) напряжениями при одноосном растяжении образца устанавливается в соответствии с теорией реологического деформирования и накопления повреждённости в виде [59]

$$\sigma = \sigma_0(1 + \omega), \quad \dot{\omega} = \alpha \sigma \dot{q}, \quad (3.1)$$

где ω – параметр повреждённости, q – пластическая деформация, $\alpha = \text{const}$ (феноменологический параметр), σ и σ_0 соответствуют одному и тому же уровню пластической деформации q . В работе [59] для жёсткого режима нагружения одноосного образца ($\dot{\varepsilon} = \text{const}$) получена неявно заданная зависимость $\sigma_0 = \sigma_0(q)$:

$$q = c \left[\sigma_0 \exp \left(\int_0^q \alpha \sigma_0(\xi) d\xi \right) - \sigma_T \right]^n, \quad (3.2)$$

где σ_T – предел текучести (пропорциональности), c и n – параметры аппроксимации начального участка диаграммы упругопластического деформирования степенной зависимостью

$$q = c(\sigma_0 - \sigma_T)^n, \quad (3.3)$$

когда можно считать, что $\omega \approx 0$ и $\sigma \cong \sigma_0$.

На рис. 3.1 приведены кривые «мгновенного» упругопластического деформирования для сплава ЭП742 при $T = 20$ °С в различных координатах [59, рис. 3.8,а], из анализа которых следует, что диаграмма для номинального напряжения имеет ниспадающий участок, а для истинного напряжения зависимость $\sigma - \varepsilon$ в соответствии с формулами (3.1)–(3.3) является монотонно возрастающей функцией.

При решении упругопластической задачи в пакете ANSYS предполагалось, что в соответствующей фиктивной термоупругопластической задаче кривая деформирования не зависит от температуры.

Реализация численного метода с помощью программного комплекса ANSYS в упругопластической постановке заключается в описании пластического поведения материала с помощью кусочно-линейной кривой деформирования (полилинейной моделью материала), построенной в истинных координатах $\sigma - \varepsilon$ (кривая 3 на рис. 3.1). Это обосновано требованием конечно-элементного пакета, позволяющим выполнять расчёт упругопластической задачи только при условии строго возрастающей ветви кривой деформирования.

Алгоритм построения кусочно-линейной упругопластической кривой в программе ANSYS Mechanical APDL по умолчанию подразумевает задание координат «напряжение–полная деформация» по точкам $\{\sigma_1, \varepsilon_1\}, \{\sigma_2, \varepsilon_2\}, \dots, \{\sigma_i, \varepsilon_i\}$, причём первая задаваемая точка должна строго соответствовать отношению

$$E = E(T) = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}. \text{ Следует указать, что такой способ справедлив при отсутствии за-}$$

висимости модуля упругости от температуры. В случае, когда значение модуля упругости изменяется по высоте образца и задана зависимость $E = E(T)$ (при условии неравномерного распределения температуры T по высоте H), применяет-

ся иной способ задания упругопластической кривой в координатах «напряжение–пластическая деформация». При этом отсутствует связь между $E(T)$ и $\sigma_i(\varepsilon_i)$ на начальной стадии неупругого деформирования, а первая задаваемая точка при этом имеет координаты $\{\sigma_1 = \sigma_T, \varepsilon_1 = 0\}$, где σ_T – предел текучести (пропорциональности) материала. Начальная составляющая кривой (до достижения значений расчётных напряжений σ_T) однозначно определяется параметрами линейной упругости ν и $E(T)$.

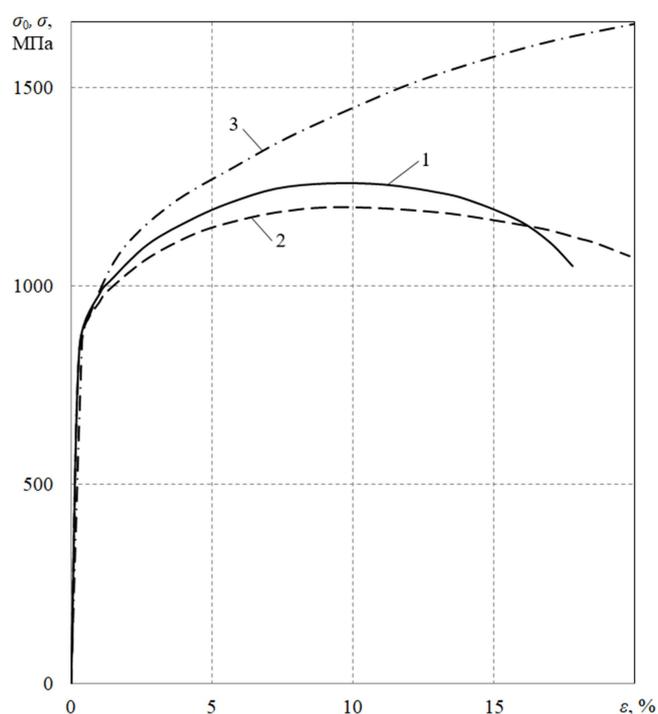


Рис. 3.1. Кривые упругопластического деформирования сплава ЭП742 при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ [59, рис. 3.8,а]: 1 – экспериментальные данные, 2 – расчёт в координатах $\sigma_0 - \varepsilon$, 3 – расчёт в координатах $\sigma - \varepsilon$

Значения параметров модели для описания пластической деформации сплава ЭП742, согласно данным работы [59], приведены ниже в таблице

Таблица 3.1. Предел текучести σ_T для сплава ЭП742 принимался равным пределу пропорциональности $\sigma_{пр}$, значение которого также приведено ниже.

Значения параметров сплава ЭП742 для описания деформации пластичности

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{пр}}, \text{МПа}$	$a, \text{МПа}^{-n_1}$	n_1	$\gamma_1, \text{МПа}^{-1}$	m_2
ЭП742	20	863,3	$1,356 \cdot 10^{-6}$	1,776	$1,916 \cdot 10^{-3}$	0

Для реализации численного метода расчёта в упругопластической постановке использовались те же расчётные (конечно-элементные) модели, что и при решении задач фиктивной термоупругости, поскольку формирующие их объёмные элементы SOLID185 позволяют учесть такие свойства, как пластичность, ползучесть, большие деформации и т.д.

Наибольший интерес с позиции классической механики разрушения представляет компонента тензора ОН $\sigma_x = \sigma_x(y)$, так как эта компонента тензора напряжений в значительной степени влияет на трещиностойкость изделий призматической формы с поперечным расположением дефектов, поэтому детальное исследование данного и последующих разделов посвящено в основном именно этой величине.

На рис. 3.2–3.7, а представлены результаты распределения компоненты ОН $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по толщине упрочнённого слоя h от дна концентратора квадратного (см. рис. 2.16,а), V-образного (см. рис. 2.16,б) и полуэллиптического (см. рис. 2.16,в) профилей, полученные в ходе решения задачи фиктивной термоупругопластичности для каждого отдельно рассматриваемого расчётного случая призматического образца. Анализ полученных результатов решения (см. рис. 3.2–3.4) выполнялся по сечению в плоскости yz , проходящему от впадины надреза на глубину $h = h(y)$, не превышающую 1 мм. Для частичной проверки адекватности разработанного метода также рассматривалась компонента $\sigma_x = \sigma_x(x)$ при $h = 0$ (см. рис. 3.5–3.7), распределённая по длине образца $l = l(x)$ в продольном направлении наружного упрочнённого слоя от кромки надреза в сторону торцевой грани образца на расстояние до 2 мм (в зависимости от рассматриваемого случая). Следует отметить, что изучение величин ОН свыше указанных значений h и l лишено всякого смысла, поскольку распределение всех компонент ОН $\sigma_i = \sigma_i(x)$, $\sigma_i = \sigma_i(y)$ ($i = x, y, z$) по мере удаления от концентратора принимает асимптоти-

ческий характер, приближаясь к решению для гладкого образца, что можно считать оценкой адекватности построенного численного решения в упругопластической постановке. Для количественного сравнения на все представленные графики дополнительно нанесены результаты распределения компонент ОН, полученные из решения задачи в упругой постановке для гладкого образца и образца с указанными профильными надрезами.

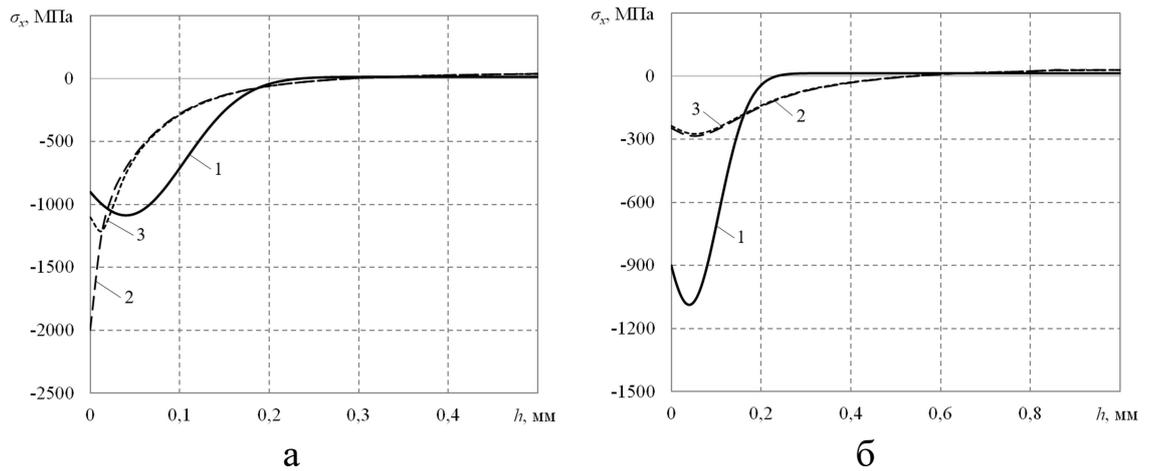


Рис. 3.2. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ в зоне концентратора квадратного профиля по глубине h при $a = 0,1$ мм (а) и $a = 0,3$ мм (б):
1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение,
3 – решение в упругопластической постановке

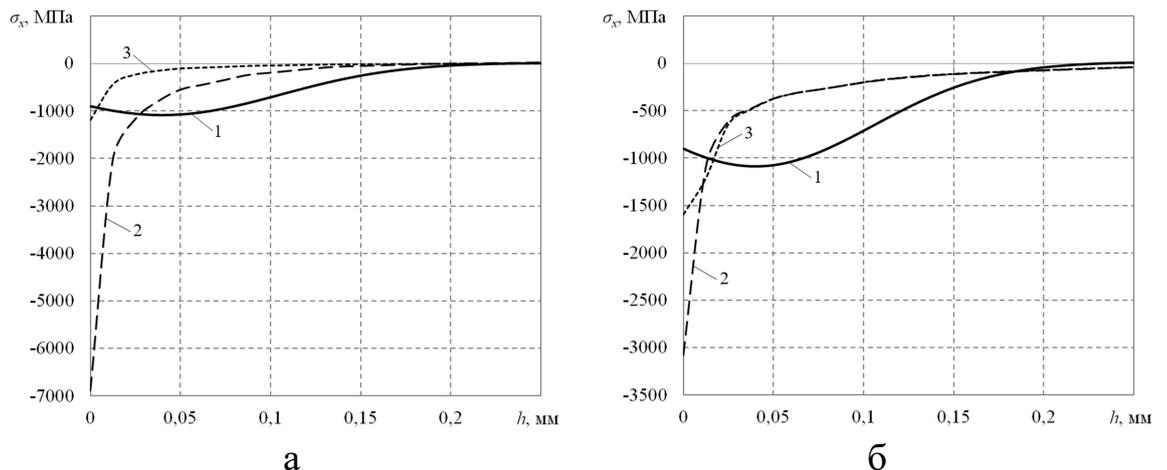


Рис. 3.3. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ в зоне концентратора V-образного профиля по глубине h и с углом раскрытия $\varphi = 15^\circ$ при $b = 0,1$ мм (а) и $b = 0,3$ мм (б): 1 – решение для гладкого образца,
2 – упругое решение, 3 – решение в упругопластической постановке

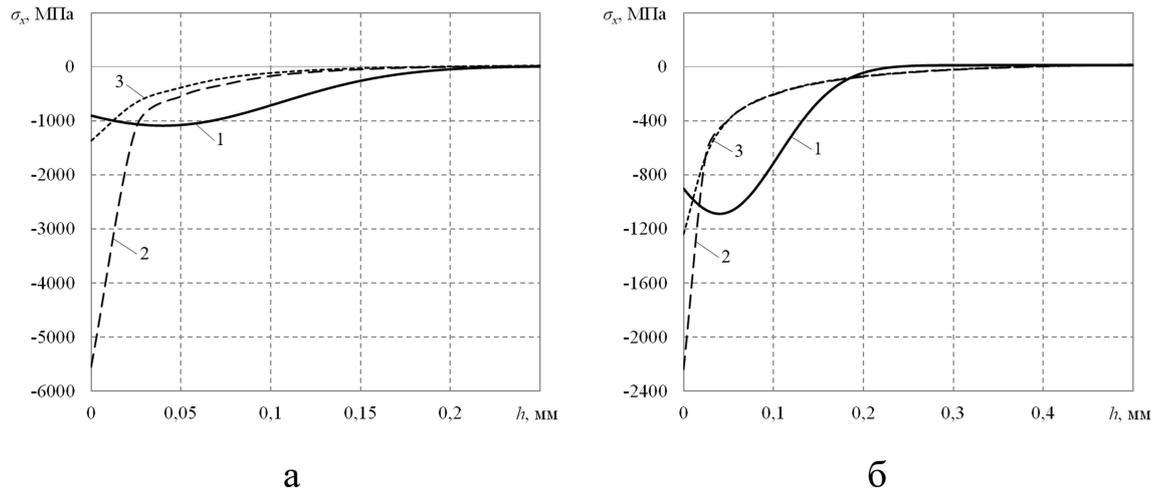


Рис. 3.4. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ в зоне концентратора полуэллиптического профиля по глубине h и соотношением $c/d = 1/5$ при $c = 0,1$ мм (а) и $c = 0,3$ мм (б): 1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение, 3 – решение в упругопластической постановке

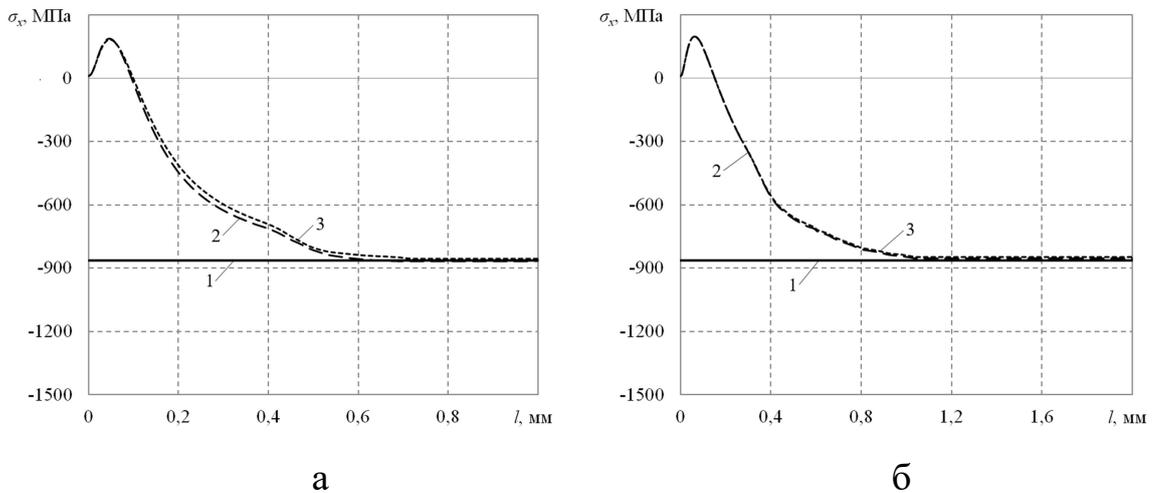


Рис. 3.5. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(x)$ в зоне концентратора квадратного профиля по длине l при $a = 0,1$ мм (а) и $a = 0,3$ мм (б): 1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение, 3 – решение в упругопластической постановке

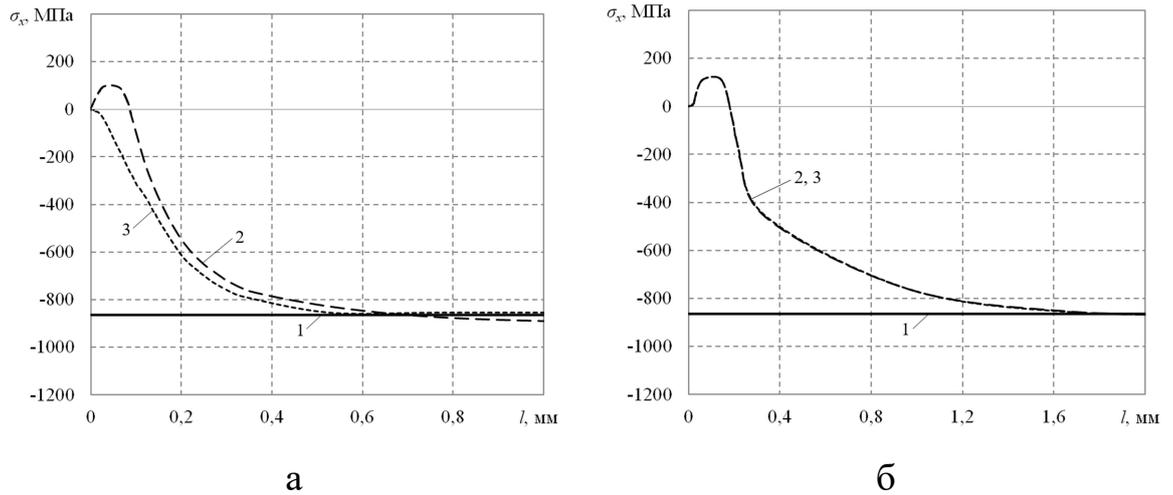


Рис. 3.6. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(x)$ в зоне концентратора V-образного профиля по длине l и с углом раскрытия $\varphi = 15^\circ$ при $b = 0,1$ мм (а) и $b = 0,3$ мм (б): 1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение, 3 – решение в упругопластической постановке

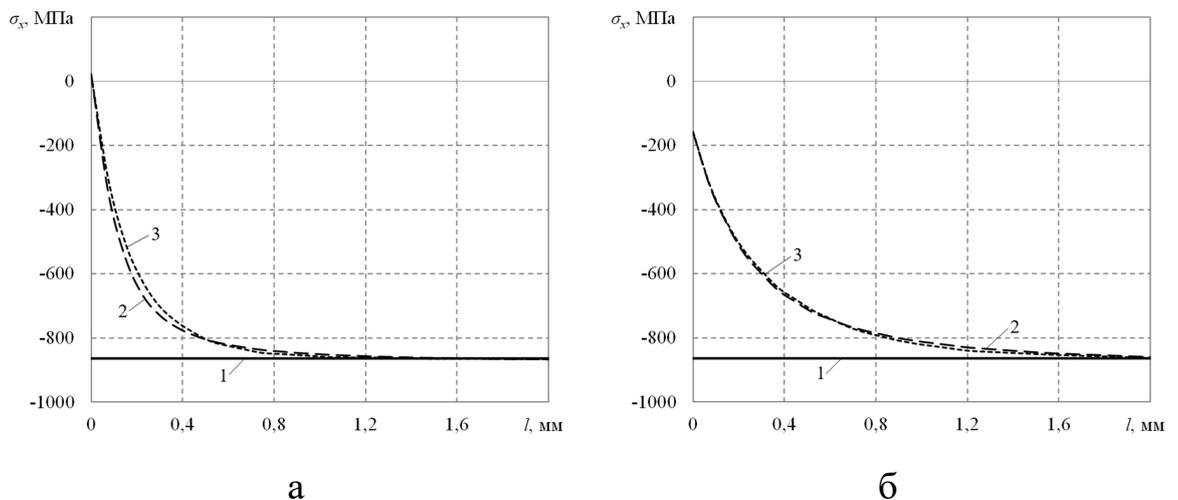


Рис. 3.7. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(x)$ в зоне концентратора полуэллиптического профиля по длине l и соотношением $c/d = 1/5$ при $c = 0,1$ мм (а) и $c = 0,3$ мм (б): 1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение, 3 – решение в упругопластической постановке

На основе полученных данных можно сделать заключение, что значительное расхождение наблюдается между результатами остаточных сжимающих

напряжений из решения задач фиктивной термоупругости и термоупругопластичности по мере увеличения «остроты» поперечного сквозного надреза. Наиболее заметен этот факт при анализе расчётного случая образца с V-образным вырезом. Используя критерий оценки (2.8) для случая $b = 0,1$ мм расхождение значений ОН по компоненте $\sigma_x = \sigma_x(x)$ между двумя полученными решениями в области упрочнения ($h = 200$ мкм) составляет $\Delta_x^\sigma = 73,89\%$, а для случая $b = 0,3$ мм – $\Delta_x^\sigma = 45,06\%$. Научное объяснение этого явления состоит в аналогии с сингулярностью упругих растягивающих напряжений вблизи трещиноподобного концентратора при раскрытии. Помимо этого, анализ НДС для упрочнённых тел с острыми несплошностями демонстрирует наличие дополнительных сжимающих напряжений на дне концентратора, возникающих в результате смыкания берегов надреза, что характерно для нераспространяющихся дефектов типа трещин вследствие их закрытия.

Обобщая полученные результаты, можно сделать однозначный вывод о том, что решение задач подобного рода следует проводить с учётом зоны пластичности материала.

В качестве подтверждения разработанного подхода схожий анализ выполнялся и для поверхностно упрочнённого образца с полукруглым надрезом радиуса ρ , расчётная схема которой приведена на рис. 2.8. Расчётные случаи рассматривались для образца высотой $H = 10$ мм при значении радиуса полукруглого надреза $\rho = \{0,1; 0,3; 0,5\}$ мм. В качестве иллюстраций ниже приведены графики распределения компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h от дна концентратора напряжений для упругого решения гладкого образца, упругого и упругопластического решений для образца с концентратором $\rho = 0,1$ мм (рис. 3.8,а), $\rho = 0,3$ мм (рис. 3.9,а) и $\rho = 0,5$ мм (рис. 3.10,а). Анализ адекватности применяемого подхода по решению задачи, как и для случаев образца с трещиноподобными «острыми» надрезами, выполнялся на основе сравнительной оценки значений ОН по компоненте $\sigma_x = \sigma_x(x)$, распределённой в центральном продольном сечении от кромки надре-

за на длину l . Результаты распределения напряжений $\sigma_x = \sigma_x(x)$ отображены на рис. 3.8–3.10 в зависимости от ρ соответственно. Как следует из этих графиков, расчётные данные для образцов с надрезами асимптотически приближаются к решению для гладкой модели при $l > 2$ мм, что частично свидетельствует об адекватности модели расчёта для призматического образца с надрезами.

Таким образом, для рассмотренных образцов с надрезами с высокой концентрацией напряжений на дне концентратора упругое решение не отражает реального НДС (см. рис. 3.2–3.4,а и рис. 3.8,а), здесь необходимо использовать математическую модель для упругопластической постановки соответствующих задач.

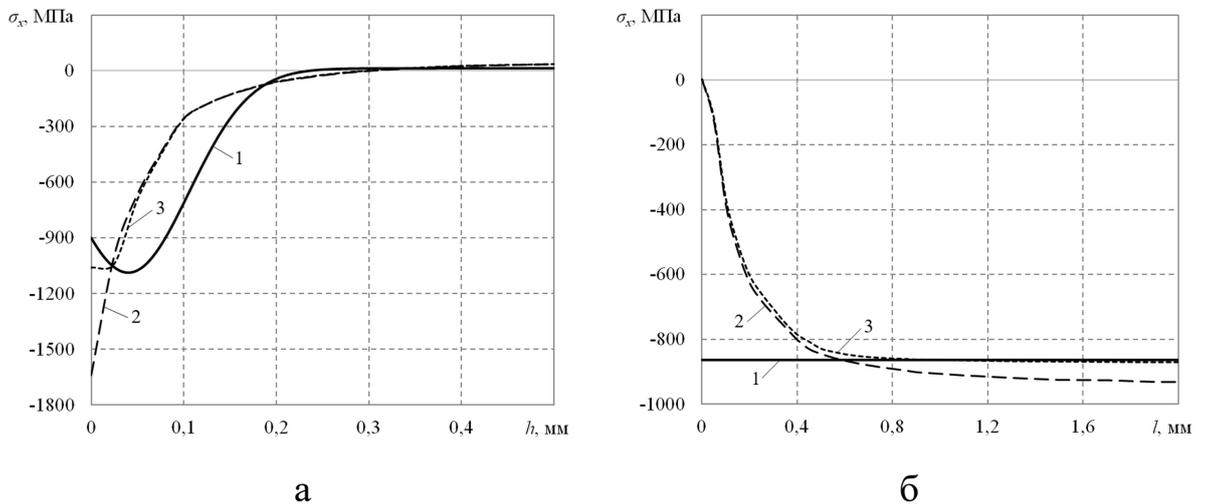


Рис. 3.8. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h (а) и $\sigma_x = \sigma_x(y)$

по длине l (б) в образце с полукруглым надрезом $\rho = 0,1$ мм:

1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение,

3 – решение в упругопластической постановке

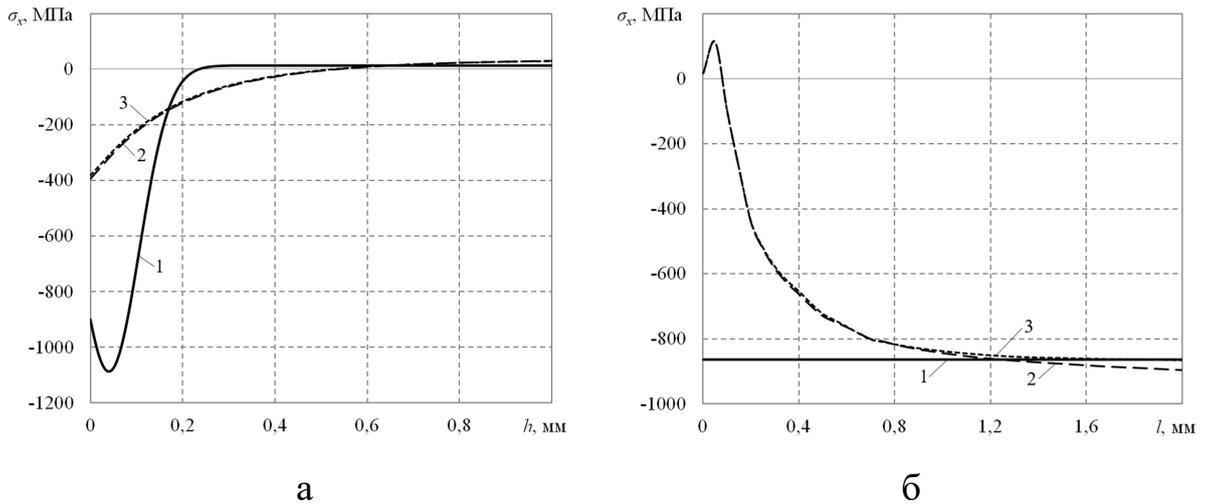


Рис. 3.9. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h (а) и $\sigma_x = \sigma_x(y)$

по длине l (б) в образце с полукруглым надрезом $\rho = 0,3$ мм:

1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение,

3 – решение в упругопластической постановке

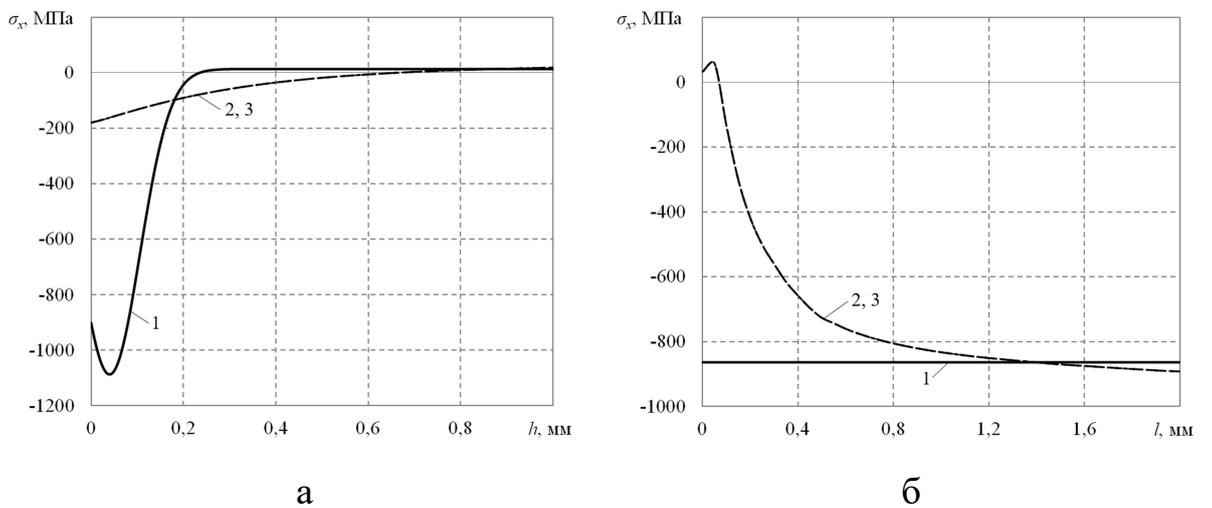


Рис. 3.10. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h (а) и $\sigma_x = \sigma_x(y)$

по длине l (б) в образце с полукруглым надрезом $\rho = 0,5$ мм:

1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение,

3 – решение в упругопластической постановке

3.3. Исследование влияния угла раскрытия сквозного трещиноподобного дефекта в упрочнённом призматическом образце на формирование остаточных напряжений в упругопластической постановке

В предыдущих разделах 2.3 и 3.2 при изучении призматического образца с надрезом V-образного профиля основное внимание уделялось влиянию параметра глубины b на характер и величину ОН в окрестности концентратора напряжений. При этом не учитывалось изменение начального угла раскрытия надреза φ , т.е. его величина принималась постоянной для всех рассматриваемых расчётных случаев ($\varphi = 15^\circ$). Если рассматривать этот концентратор в качестве дефекта, возникающего на подготовительном этапе или при эксплуатации изделия в виде скола, царапины, вмятины или иной трещиноподобной несплошности, то значение φ , может быть гораздо больше принятого во внимание. Тогда возникает вопрос о влиянии этого угла на характер распределения и величину компонент тензоров ОН, исследуемых вблизи зоны раскрытия дефекта.

Детальное изучение вопроса о распределении поля остаточных сжимающих напряжений на прочность изделий вблизи типовых концентраторов имеет отражение во многих публикациях, посвящённых изучению усталостной прочности материалов и элементов конструкций. Так, в статьях [111, 113] на примере образцов, изготовленных из суперсплава на никелевой основе, при внедрении поверхностных повреждений в виде «тупых» вмятин и царапин оценивается влияние ОН в указанных дефектах на выносливость при условии появления усталостной трещины на дне концентратора. Исследование чувствительности материалов к концентрации напряжений для призматических образцов с глубокими V-образными надрезами в зависимости от заданного угла раскрытия проиллюстрировано в работе [44]. В работе [104] для призматического дробеструйно упрочнённого образца из алюминиевого сплава экспериментальным и конечно-элементным методами получены результаты исследования ОН вблизи V-образного надреза, на основе чего установлено, что концентрация напряжений по продольной компоненте преобладает с увеличением «остроты» надреза в его основании (кончике).

Следует отметить, что во всех вышечисленных работах рассматриваемый угол φ для описанных дефектов принимается со значением $\varphi > 15^\circ$. Поэтому изучение влияния начального угла раскрытия φ для сквозного поверхностного V-образного надреза на НДС в окрестности концентратора проводилось на основе расчётной схемы, представленной ранее (см. рис. 2.16,б). Помимо уже полученных результатов (при $\varphi = 15^\circ$), текущее исследование выполнялось для расчётных случаев угла раскрытия $\varphi = \{30^\circ; 40^\circ; 60^\circ; 90^\circ\}$ при значениях глубины дефекта $b = \{0,1; 0,3\}$ мм. Радиус основания надреза заданного профиля не превышал $\rho_0 = 0,01$ мм.

Наглядное представление результатов распределения компонент тензора ОН $\sigma_i = \sigma_i(y)$ ($i = x, y, z$) по глубине упрочнённого слоя h в зависимости от угла раскрытия φ , полученных из решения термоупругопластической задачи, показано на рис. 3.11–3.13. Анализ результатов показал, что заметное различие между величинами напряжений наблюдается в непосредственной близости заострённого дна концентратора в пределах 100–500 мкм по глубине (в зависимости от рассматриваемой компоненты ОН). Детализация кривых распределения ОН от дна V-образного надреза по толщине образца показана в пределах 100 мкм по оси Oy .

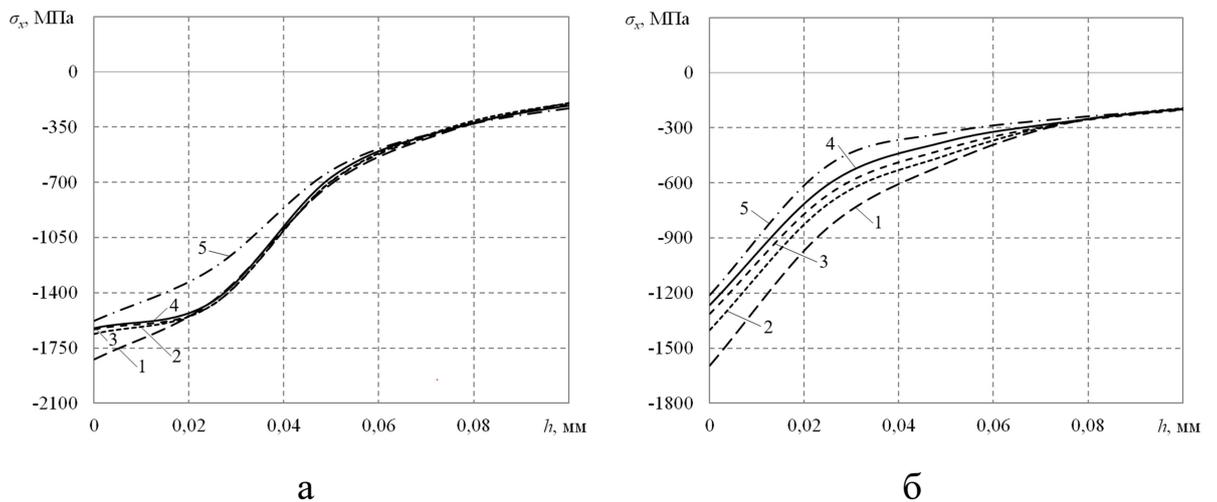


Рис. 3.11. Распределение компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h в зависимости от начального угла раскрытия φ при $b = 0,1$ мм (а) и $b = 0,3$ мм (б): 1 – $\varphi = 15^\circ$, 2 – $\varphi = 30^\circ$, 3 – $\varphi = 40^\circ$, 4 – $\varphi = 60^\circ$, 5 – $\varphi = 90^\circ$

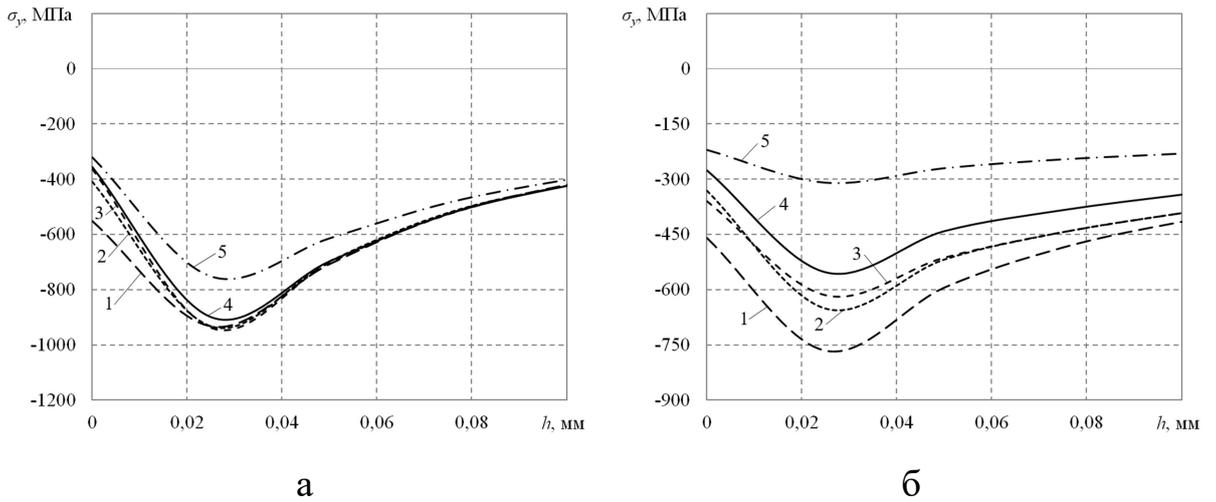


Рис. 3.12. Распределение компоненты $\sigma_y = \sigma_y(y)$ по глубине h в зависимости от начального угла раскрытия φ при $b = 0,1$ мм (а) и $b = 0,3$ мм (б): 1 – $\varphi = 15^\circ$, 2 – $\varphi = 30^\circ$, 3 – $\varphi = 40^\circ$, 4 – $\varphi = 60^\circ$, 5 – $\varphi = 90^\circ$

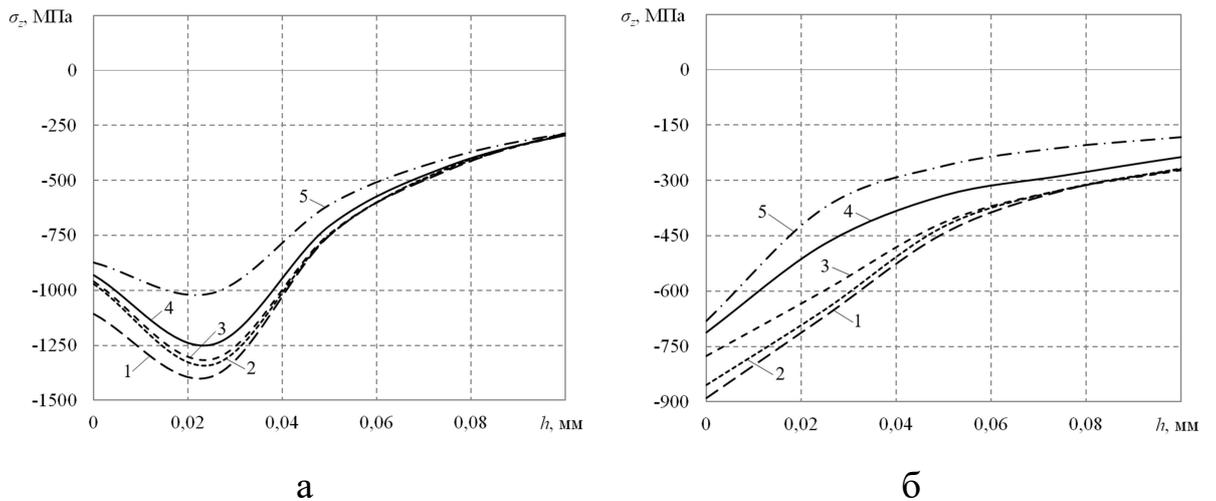


Рис. 3.13. Распределение компоненты $\sigma_z = \sigma_z(y)$ по глубине h в зависимости от начального угла раскрытия φ при $b = 0,1$ мм (а) и $b = 0,3$ мм (б): 1 – $\varphi = 15^\circ$, 2 – $\varphi = 30^\circ$, 3 – $\varphi = 40^\circ$, 4 – $\varphi = 60^\circ$, 5 – $\varphi = 90^\circ$

Для образца с V-образным концентратором глубиной $b = 0,1$ мм были также изучены расчётные случаи с меньшим углом раскрытия $\varphi = \{1^\circ, 5^\circ, 10^\circ\}$ и радиу-

сом в вершине не более $\rho_0 = 0,01$ мм. Исследование расчётного случая, когда несплошность (трещина) представляет собой математический разрез с углом $\varphi = 0^\circ$, в данной работе не предполагалось, т.к. он не имеет практической значимости. Оценка характера распределения ОН при нахождении дефекта в тонком упрочнённом слое выполнялась по наиболее значимой компоненте $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h от дна концентратора. Графически различие между полученными кривыми для $\sigma_x = \sigma_x(y)$ в зависимости от начального угла раскрытия φ показано на рис. 3.14. Для сравнения здесь также представлен результат решения задачи при $\varphi = 15^\circ$.

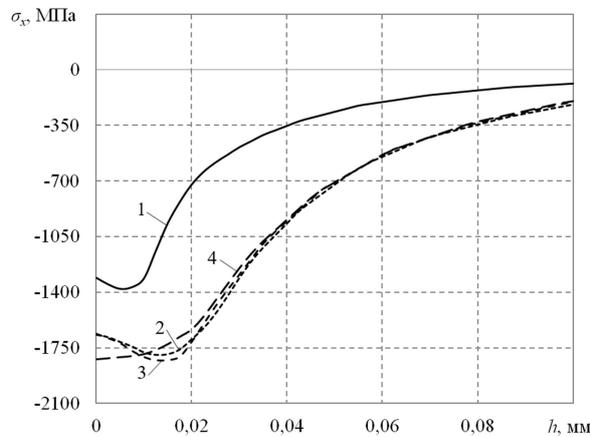


Рис. 3.14. Распределение компоненты $\sigma_z = \sigma_z(y)$ по глубине h в зависимости от начального угла раскрытия φ при $b = 0,1$ мм:

$$1 - \varphi = 1^\circ, 2 - \varphi = 5^\circ, 3 - \varphi = 10^\circ, 4 - \varphi = 15^\circ$$

Анализ расхождения результатов решения задачи в упругой (рис. 3.15–3.17) и упругопластической (рис. 3.11 и рис. 3.14) постановках на основе сравнительной оценки выполнялся по значениям компонент тензоров расчётных напряжений, распределённых по высоте h в пределах 200 мкм от дна дефекта в зависимости от глубины надреза b и начального угла раскрытия его берегов φ . В таблице 3.2 с помощью соотношения (2.8) приведены данные из сравнения полученных ОН для всех расчётных случаев модели с концентратором напряжений.

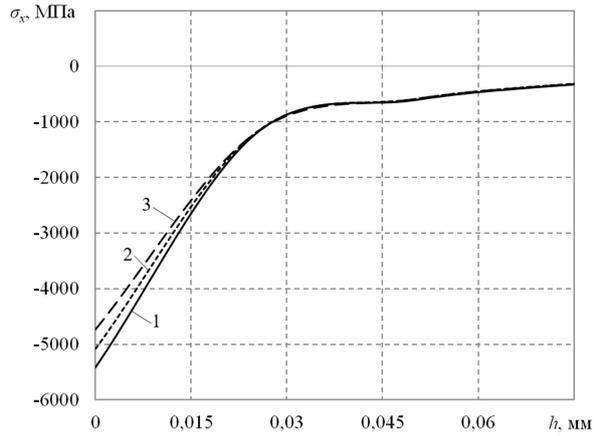


Рис. 3.15. Распределение значений компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h , полученных из упругого решения задачи, в зависимости от начального угла раскрытия φ при $b = 0,1$ мм: 1 – $\varphi = 1^\circ$, 2 – $\varphi = 5^\circ$, 3 – $\varphi = 10^\circ$

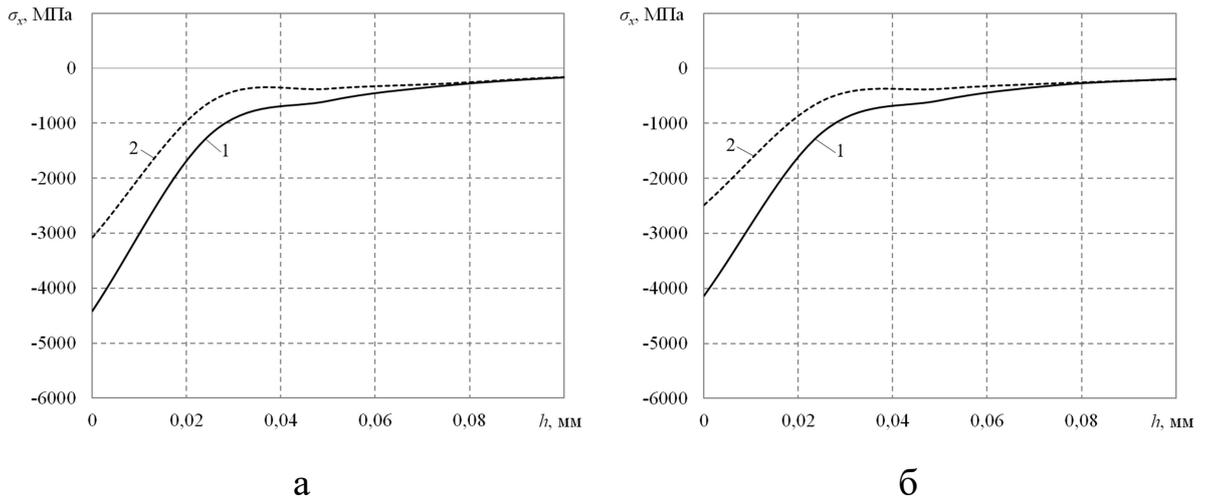


Рис. 3.16. Распределение значений компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h , полученных из упругого решения задачи, в зависимости от начального угла раскрытия $\varphi = 15^\circ$ (а) и $\varphi = 30^\circ$ (б) и глубины надреза b :

1 – $b = 0,1$ мм, 2 – $b = 0,3$ мм

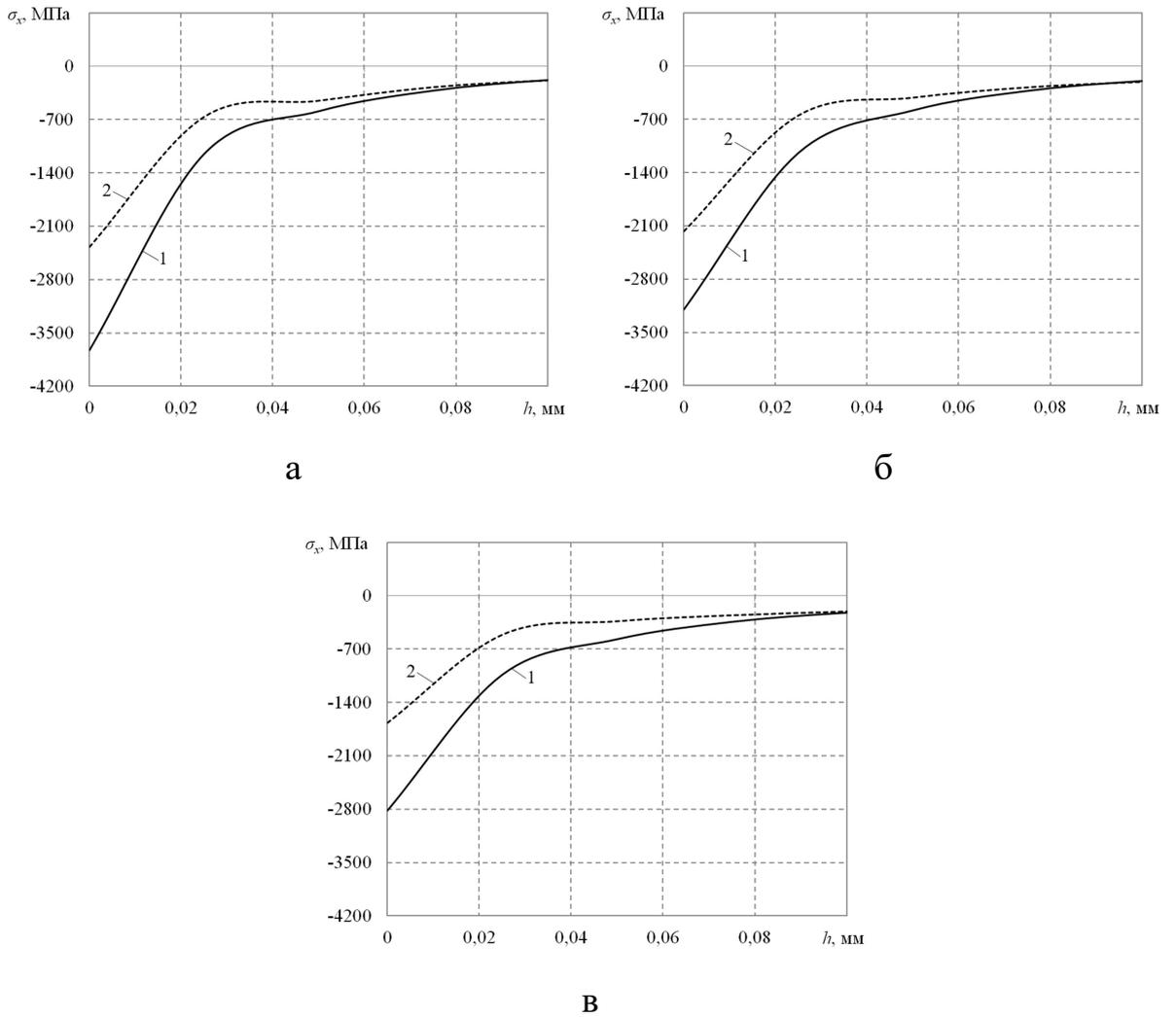


Рис. 3.17. Распределение значений компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ по глубине h , полученных из упругого решения задачи, в зависимости от начального угла раскрытия $\varphi = 40^\circ$ (а), $\varphi = 60^\circ$ (б), $\varphi = 90^\circ$ (в) и глубины надреза b :
1 – $b = 0,1$ мм, 2 – $b = 0,3$ мм

Сводная таблица оценки расхождения компонент $\sigma_i = \sigma_i(y)$ ($i = x, y, z$) между упругим и упругопластическим решениями задачи для случая образца с V-образным надрезом в зависимости от значений φ и b

Глубина дефекта b , мм	Угол раскрытия φ , град	Расхождение Δ_i^σ между компонентами ОН из упругого и упругопластического решения задачи, %		
		Δ_x^σ	Δ_y^σ	Δ_z^σ
0,1	1	168,27	70,83	139,61
	5	80,29	20,39	51,32
	10	75,15	19,21	47,13
	15	73,89	18,66	46,58
	30	73,53	18,36	44,51
	40	72,79	18,29	43,3
	60	70,22	17,25	41,28
	90	58,87	13,42	33,29
0,3	15	45,06	9,97	16,88
	30	43,12	8,13	16,07
	40	31,37	6,29	11,71
	60	29,41	5,42	11,23
	90	18,76	4,33	5,93

На основе представленных результатов решения задачи реконструкции полей ОН вблизи дефекта трещиноподобного вида в упругопластической постановке можно сделать вывод о том, что при увеличении начального угла раскрытия дефекта V-образного профиля от 1° до 15° в пределах $b = 0,1$ мм и возле зоны дна концентратора напряжений происходит возрастание (по модулю) сжимающих ОН, а увеличение этого угла от 15° до 90° сопровождается снижением их эффективности для всех компонент тензора. В случае, когда дефект находится на глубине $b = 0,3$ мм от упрочнённой поверхности, для значений ОН наблюдается мо-

нотонное снижение по абсолютной величине при увеличении угла раскрытия φ от наименьшего значения. Отсюда следует, что применение метода ППД (или его эффективность при эксплуатации) при упрочнении призматического тела со сквозным V-образным концентратором напряжений, глубина которого не превышает толщину упрочнённого слоя h ($h = 200$ мкм), имеет наибольшую эффективность лишь при значениях угла раскрытия $\varphi \leq 60^\circ$. При этом увеличение раскрытия угла свыше 60° между берегами приводит к заметному снижению уровня сжимающих ОН вблизи кончика дефекта для компонент $\sigma_y = \sigma_y(y)$ и $\sigma_z = \sigma_z(y)$ применительно для всех расчётных случаев. Помимо этого следует отметить, что выравнивание распределения значений сжимающих ОН осуществляется в пределах 100–500 мкм от дна концентратора по глубине h в зависимости от рассматриваемой компоненты. Основываясь на результатах таблицы 3.2 можно также сделать вывод о том, что по мере увеличения угла раскрытия φ для всех компонент тензора сжимающих ОН в пределах 200 мкм наблюдается асимптотическое снижение расхождения результатов между упругим и упругопластическим решениями при обоих расчётных случаях глубины дефекта b . Это, в свою очередь, хорошо согласуется с теорией сингулярности упругих напряжений вблизи кончика трещины.

3.4. Численный метод восстановления остаточных напряжений для призматического образца с несквозной поперечной трещиной в упругопластической постановке

Представленные выше в работе результаты исследований были посвящены изучению полей НДС в области сквозных поверхностных концентраторов напряжений профильного типа. На практике при эксплуатации реальных конструкций возникающие на поверхностях призматических деталей дефекты чаще всего склонны к появлению локальных несквозных трещиноподобных дефектов, являющихся последствиями контакта относительно более твёрдых тел при соударе-

нии. Такие несплошности приводят к видоизменению геометрии поверхностного слоя деталей вследствие необратимых деформаций, вызываемых ударом. Анализ НДС вблизи дефектов подобного рода происхождения является основной задачей при оценке усталостной прочности повреждённых металлоизделий по причине высокой концентрации напряжений. Отдельный интерес представляет аналогичное изучение характера распределения полей ОН в указанной области при условии предварительного упрочнения наружного слоя гладкой детали методами ППД.

Решение задачи реконструкции полей ОН в приповерхностном слое упрочнённого тела рассматривалось на примере призматического образца $100 \times 10 \times 10$ мм с центрально расположенной несквозной объёмной трещиной V-образного профиля длиной 3 мм (рис. 3.18).

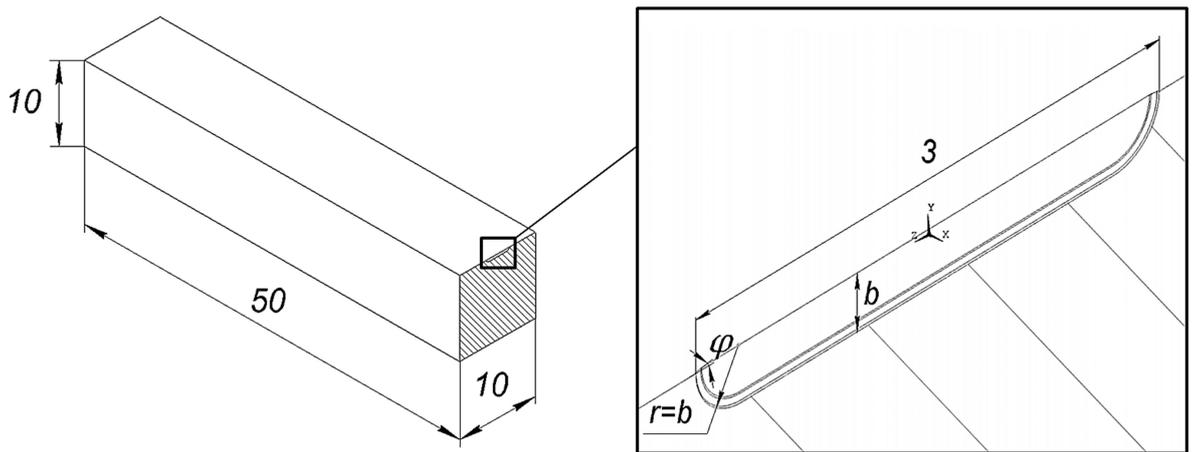


Рис. 3.18. Схематическое изображение рассечённого образца в месте несквозной центральной трещины V-образного профиля

Отличительной особенностью от сквозного концентратора здесь является наличие скруглений на концах трещины радиусом r , зависящим от её глубины b . С этой точки зрения контур дефекта получается плавным, что позволяет избежать острых кромок, где, как известно, концентрация напряжений наиболее интенсивна. Место схождения берегов трещины, представляющее фронт трещины, также

имеет скругление радиусом $r_0 = 0,01$ мм. Начальный угол раскрытия дефекта принимался равным $\varphi = 15^\circ$.

Изучение влияния несквозного поверхностного дефекта в упрочнённого образца на особенность НДС в области концентрации напряжений выполнялось для расчётных случаев глубины $b = \{0,1; 0,3\}$ мм методом решения задачи фиктивной термоупругопластичности по феноменологической модели (2.1)–(2.6) с учётом кривой неупругого деформирования в истинных координатах для сплава ЭП742, полученной по соотношениям (3.1)–(3.3).

Особое место при решении этой задачи было уделено математическому моделированию КЭ модели упрочнённого призматического образца с концентратором напряжений. Сам процесс разработки модели заключался в следующем. Первоначально в плоскости xu создавалась половина плоского поперечного сечения V-образного контура дефекта с учётом принимаемых параметров трещины, на которую накладывалась сетка плоских КЭ типа Mesh 200 с опцией четырёхузловых плоских элементов. Затем выполнялось построение траектории выдавливания, представляющей также половинный фронт трещины (вследствие двойной симметрии модели относительно главных плоскостей (xu и uz) системы координат). Полученная после преобразования сложная геометрическая фигура формировала четвертую часть объёмной поверхностной трещины, состоящей из объёмных элементов SOLID185. Процесс дальнейшего достраивания до полной модели осуществлялся аналогичным методом выдавливания граничных поверхностей в направлениях соответствующих осей координат Ox , Oy и Oz и зеркальным отражением построенных объёмов относительно плоскостей симметрии xu и uz .

Следует отметить, что наибольшее сгущение сетки КЭ в рассматриваемом случае осуществлялось непосредственно при формировании трещиноподобного несквозного выреза с линейным размером грани элементов, не превышающим 7 мкм, с целью точного математического описания упрочнённой среды. Формирование структурированной сетки вблизи дна концентратора (фронта трещины) выполнялось концентрическим расположением элементов. В качестве примера результата моделирования на рис. 3.19 представлена локальная область объёмной трещины с помощью КЭ при глубине дефекта $b = 0,1$ мм.

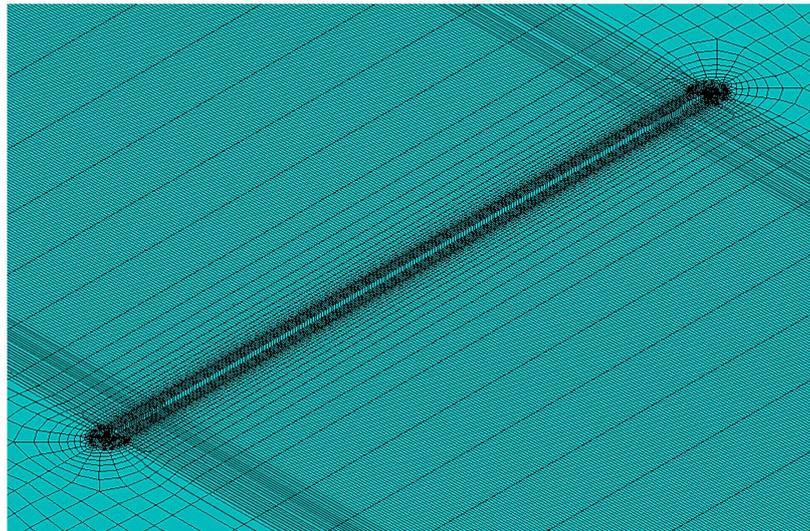


Рис. 3.19. Локальное представление конечно-элементной модели в области несквозной V-образной трещины при $b = 0,1$ мм

Исследование характера распределения компонент тензора ОН для данной задачи выполнялось по полученным значениям в узлах КЭ модели, распределённых вдоль четырёх направляющих линий (см. рис. 3.20): по глубине дефекта от наружной поверхности (маркер 1), по глубине дефекта от дна трещины в центральном сечении (маркер 2), вдоль линии фронта трещины (маркер 3) и вдоль одной из кромок берега раскрытия трещины (маркер 4).

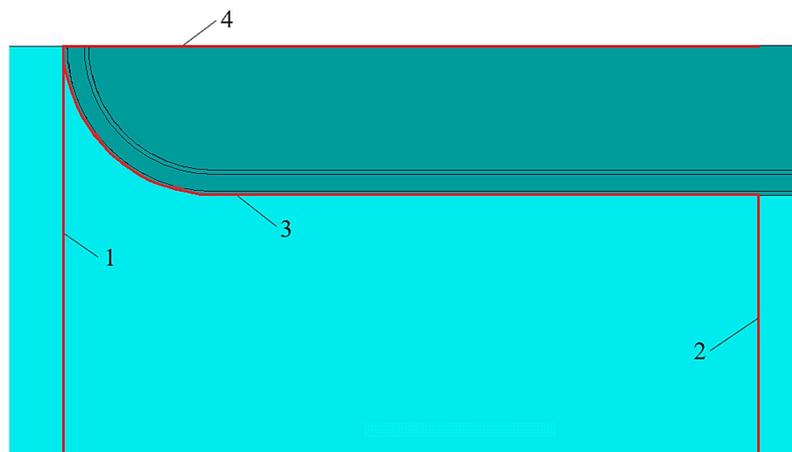


Рис. 3.20. Схематизация исследования величин остаточных напряжений в зоне несквозной трещины по направляющим линиям: 1 – по глубине от начала трещины, 2 – по глубине от центра трещины, 3 – вдоль фронта трещины, 4 – вдоль левой кромки берега трещины

Графическое отображение распределения компонент тензоров ОН $\sigma_i = \sigma_i(y)$ ($i = x, y, z$) в зоне несквозного дефекта при двух расчётных случаях глубины $b = \{0,1; 0,3\}$ мм показано ниже на рис. 3.21–3.24. Сплошная линия соответствует расчётному случаю при глубине несквозной трещины $b = 0,1$ мм, пунктирная линия – при $b = 0,3$ мм. Важно отметить, что в зависимости от выбранной схемы исследования (см. рис. 3.20) оценка характера распределения ОН производилась либо по глубине h (схемы 1 и 2), либо в поперечном направлении образца по полудлине фронта трещины l_1 (схема 3) и по полудлине кромки берега трещины l_2 (схема 4).

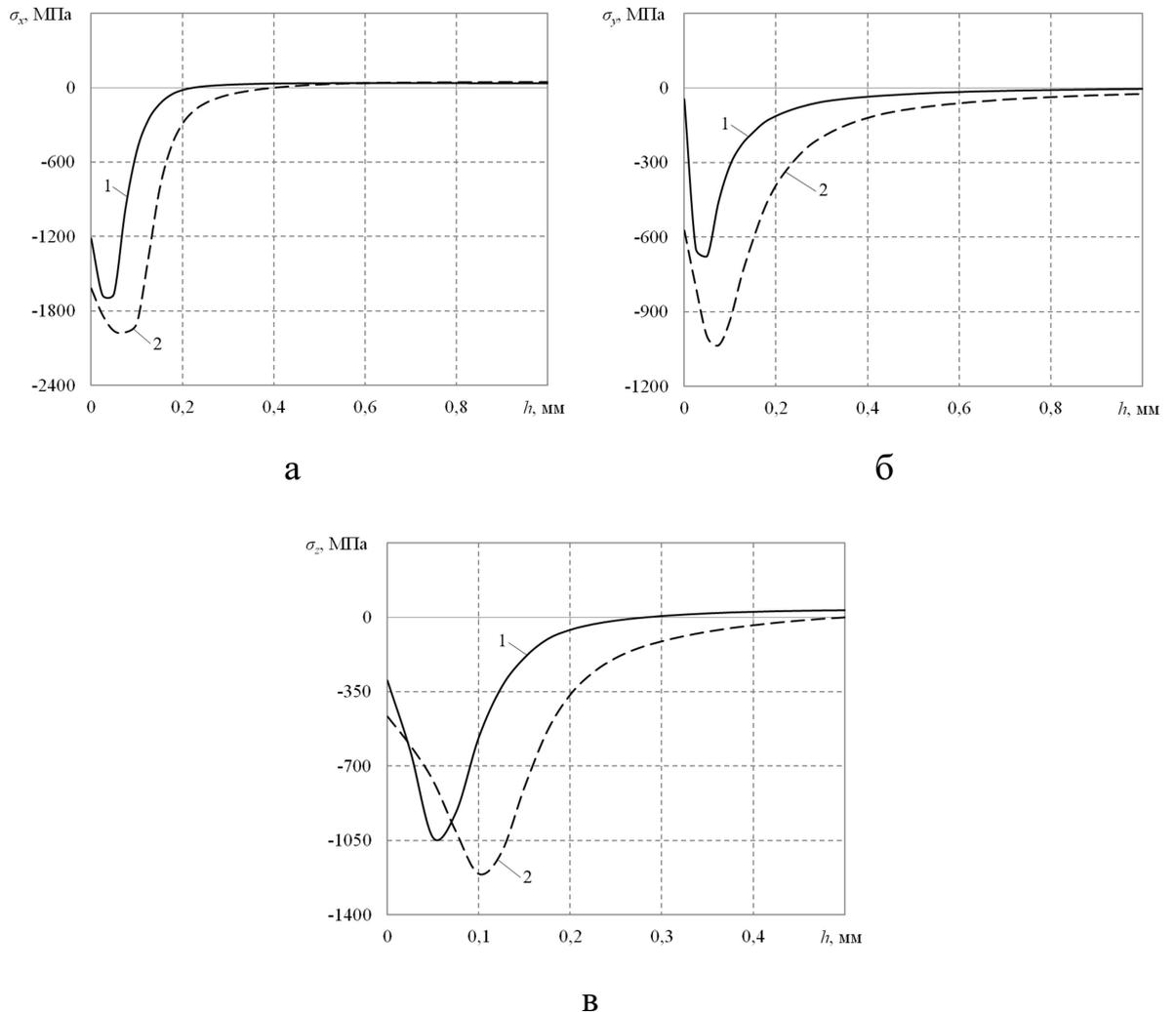


Рис. 3.21. Распределение компонент $\sigma_x = \sigma_x(y)$ (а), $\sigma_y = \sigma_y(y)$ (б) и $\sigma_z = \sigma_z(y)$ (в) по глубине h от наружной поверхности трещины (схема 1): 1 – $b = 0,1$ мм, 2 – $b = 0,3$ мм

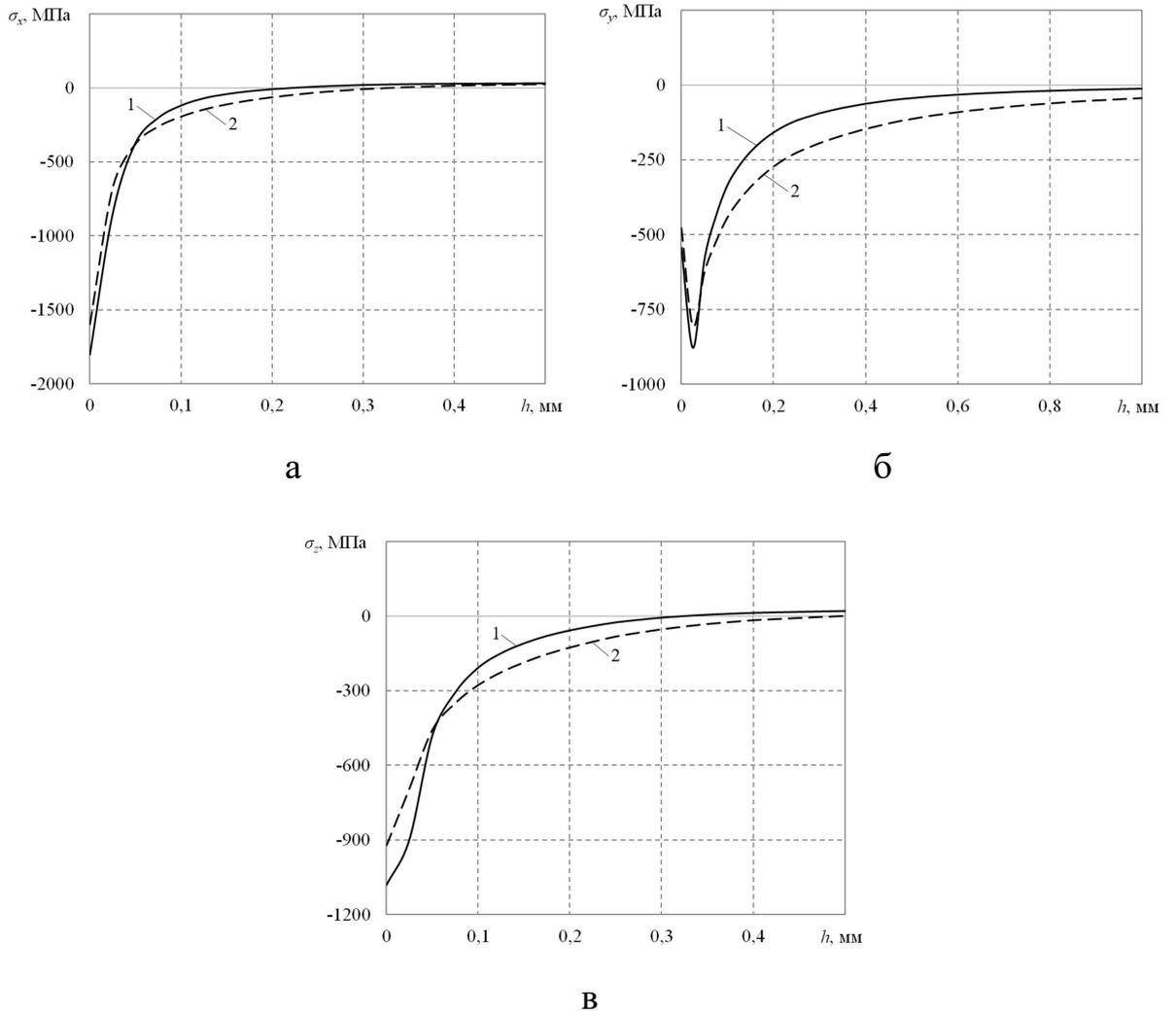


Рис. 3.22. Распределение компонент $\sigma_x = \sigma_x(y)$ (а), $\sigma_y = \sigma_y(y)$ (б) и $\sigma_z = \sigma_z(y)$ (в) по глубине h от дна трещины в центральном сечении (схема 2): 1 – $b = 0,1$ мм, 2 – $b = 0,3$ мм

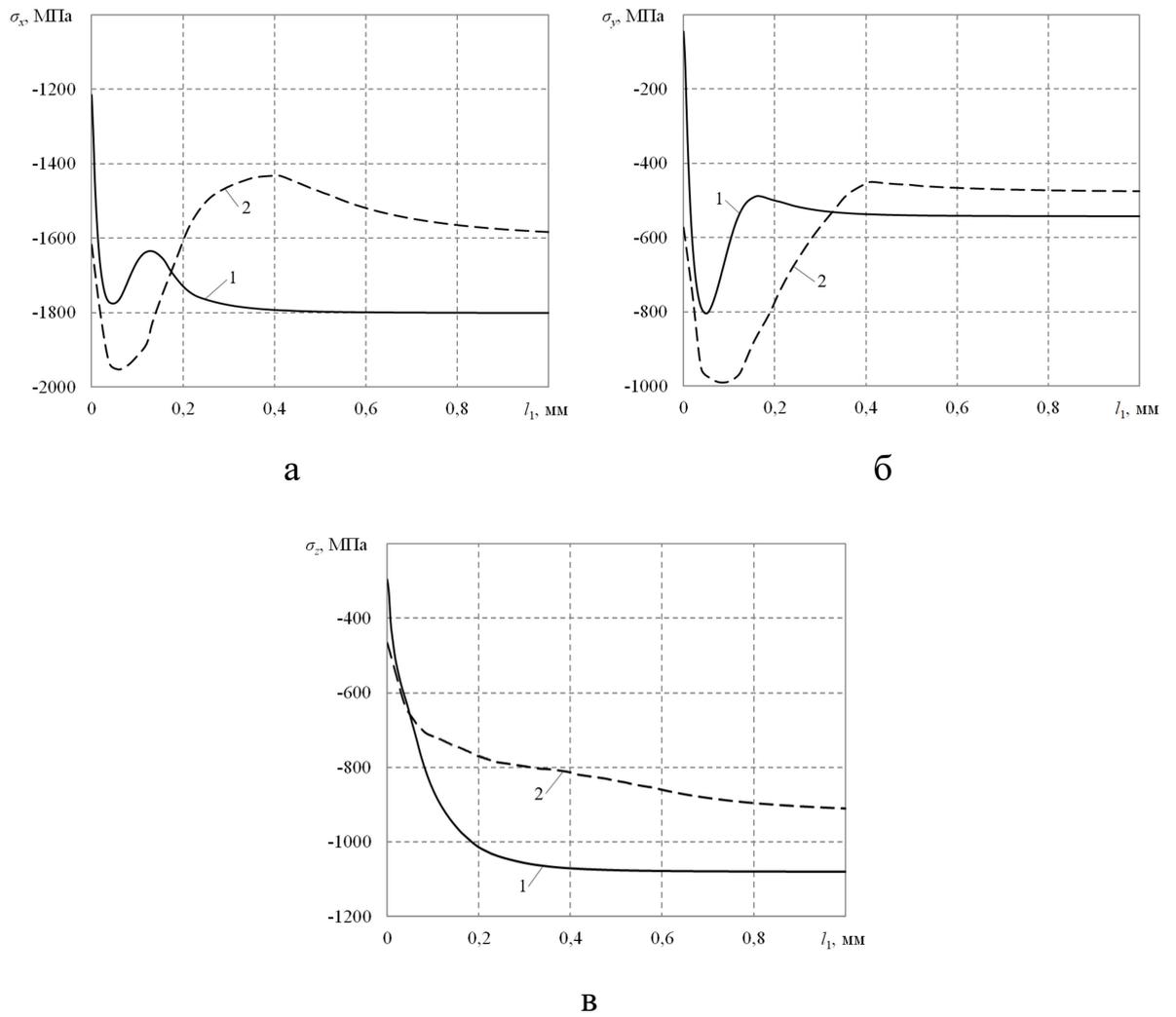


Рис. 3.23. Распределение компонент $\sigma_x = \sigma_x(y)$ (а), $\sigma_y = \sigma_y(y)$ (б) и $\sigma_z = \sigma_z(y)$ (в) по полудлине фронта трещины l_1 (схема 3):

1 – $b = 0,1$ мм, 2 – $b = 0,3$ мм

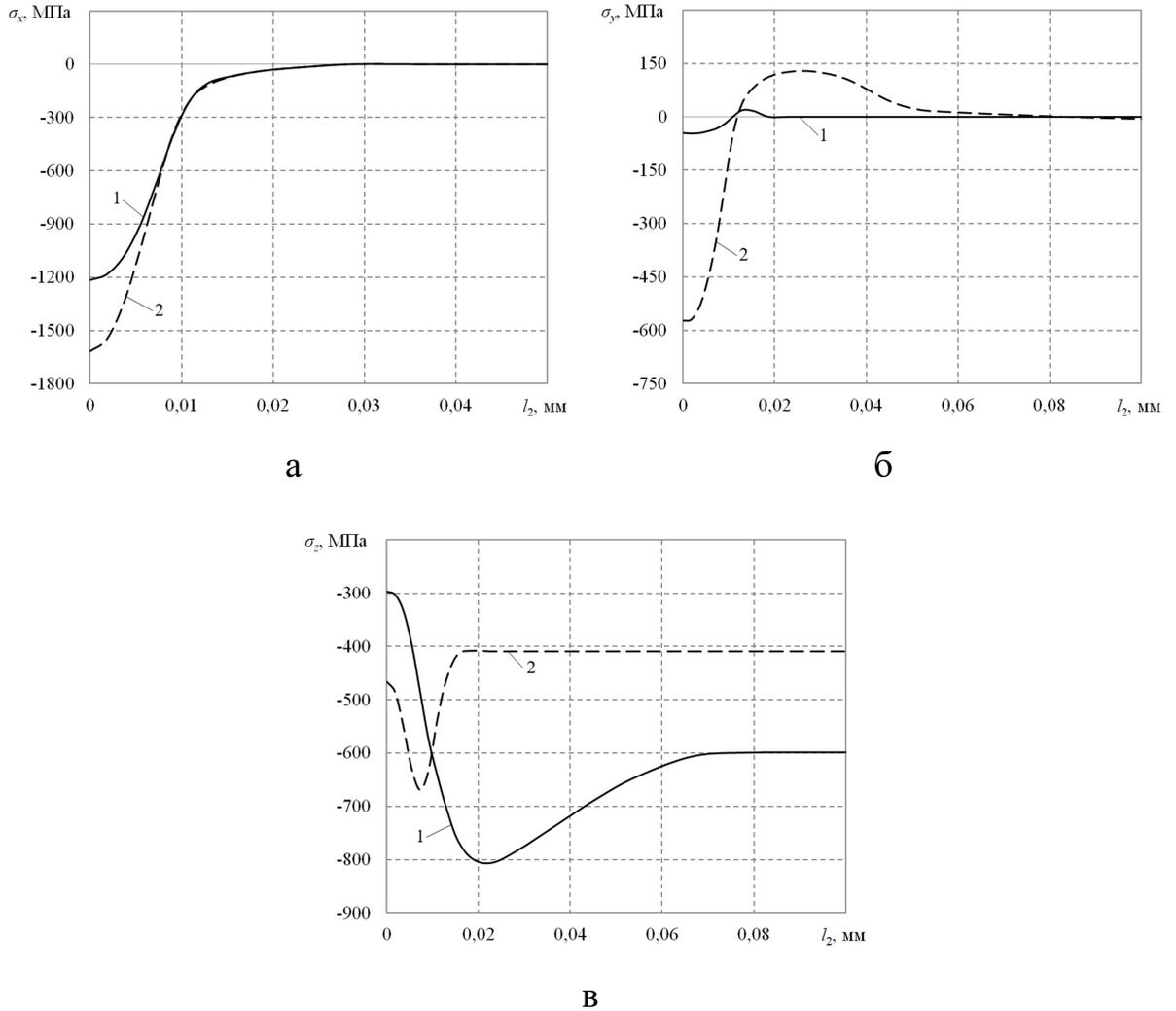


Рис. 3.24. Распределение компонент $\sigma_x = \sigma_x(y)$ (а), $\sigma_y = \sigma_y(y)$ (б) и $\sigma_z = \sigma_z(y)$ (в) по полудлине кромки берега трещины l_2 (схема 4):

$$1 - b = 0,1 \text{ мм}, 2 - b = 0,3 \text{ мм}$$

На основе полученных данных по компонентам ОН, исследуемых в различных направлениях вблизи трещины, выполнялся детальный анализ характера распределения величин напряжений. Из рис. 3.21, 3.23 и 3.24 можно заметить, что практически для всех компонент напряжений при глубине дефекта $b = 0,3$ мм в пределах начальной области раскрытия на поверхности трещины наблюдаются бóльшие (по модулю) значения остаточных сжимающих напряжений по сравнению с расчётным случаем при $b = 0,1$ мм. Это явление, как и в случае сквозного V-образного выреза, объясняется наличием дополнительных напряжений сжатия,

возникающих вследствие появления изгибающих моментов в области дефекта, которые приводят к закрытию трещины. При этом интенсивность этого эффекта увеличивается по мере роста глубины дефекта. Поэтому сжимающие ОН при $b = 0,1$ мм в упрочнённом слое приобретают меньшие значения для значений l_2 до 0,008 мм для компоненты тензора $\sigma_x = \sigma_x(y)$ (см. рис. 3.24,а), до 1 мм для компоненты тензора $\sigma_y = \sigma_y(y)$ (см. рис. 3.21,б), после чего наблюдается с некоторым приближением равенство численных значений напряжений по обоим расчётным случаям глубины трещины для соответствующих компонент. При анализе распределения напряжений по глубине от дна трещины по центральному сечению (см. рис. 3.22) полученные результаты для соответствующих компонент при $b = \{0,1; 0,3\}$ мм практически совпадают.

Частичная проверка адекватности разработанного метода расчёта полей ОН в зоне дефекта оценивалась исходя из результатов расчётов для напряжений $\sigma_x = \sigma_x(y)$ и $\sigma_y = \sigma_y(y)$, измеренных вдоль кромки одного из берегов трещины по полудлине l_2 и равных нулю (рис. 3.24 (а, б)). Согласно теории разрушения напряжения в местах разрыва материала (значительного расхождения между берегами трещины) равны нулю, поскольку конструкция в этом месте не оказывает сопротивления. При этом компонента ОН $\sigma_z = \sigma_z(y)$, распределённая в поперечном направлении образца, для указанного случая отлична от нуля (рис. 3.24,в). Важно отметить, что по всем компонентам тензора ОН $\sigma_i = \sigma_i(y)$ ($i = x, y, z$) наблюдаются экстремальные значения вблизи дна концентратора.

Помимо нормальных компонент ОН, в текущем разделе исследованию подвергались и касательные напряжения. Оценка уровня и характера их распределения в упрочнённых деталях и элементах конструкций имеет также особый интерес, поскольку при эксплуатации изделий такие напряжения чаще всего приводят к мгновенному разрушению по наиболее ослабленному сечению. Изучение касательных напряжений проводилось по тем же схемам исследования расчётных значений компонент (см. рис. 3.20) в координатных плоскостях xy , yz и xz .

Наглядная иллюстрация распределения компонент тензора касательных напряжений $\sigma_{xy} = \sigma_{xy}(y)$ (рис. 3.25,а), $\sigma_{xz} = \sigma_{xz}(y)$ (рис. 3.25,б) и $\sigma_{yz} = \sigma_{yz}(y)$ (рис. 3.26) в области несквозной трещины при $b = \{0,1; 0,3\}$ мм для схем исследования 1, 3 и 4 показана ниже. Необходимо отметить, что графическое представление по всем трём компонентам тензора касательных напряжений приведено лишь при распределении напряжений по глубине h от наружной поверхности трещины (схема 1), поскольку полученные значения отличны от нуля и соизмеримы с компонентами тензора нормальных ОН $\sigma_i = \sigma_i(y)$ ($i = x, y, z$). Для других схем исследования напряжений (за исключением схемы 2) ненулевые значения напряжений соответствуют только компоненте $\sigma_{yz} = \sigma_{yz}(y)$. При анализе касательных компонент по схеме 2 установлено, что все значения напряжений в центральном сечении трещины пренебрежимо малы и практически равны нулю.

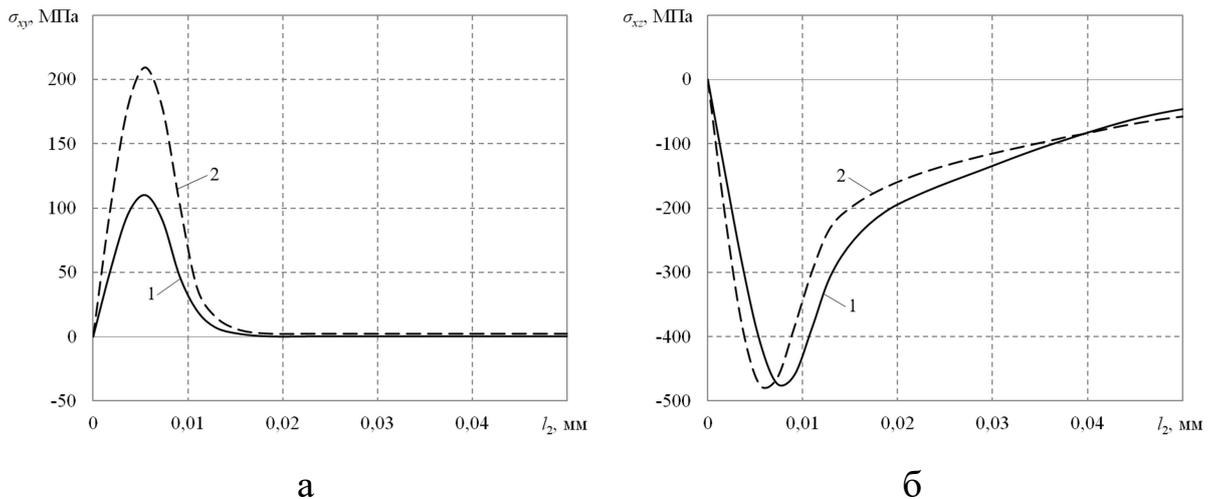


Рис. 3.25. Распределение компонент $\sigma_{xy} = \sigma_{xy}(y)$ (а) и $\sigma_{xz} = \sigma_{xz}(y)$ (б) по поудлине кромки берега трещины l_2 : 1 – $b = 0,1$ мм, 2 – $b = 0,3$ мм

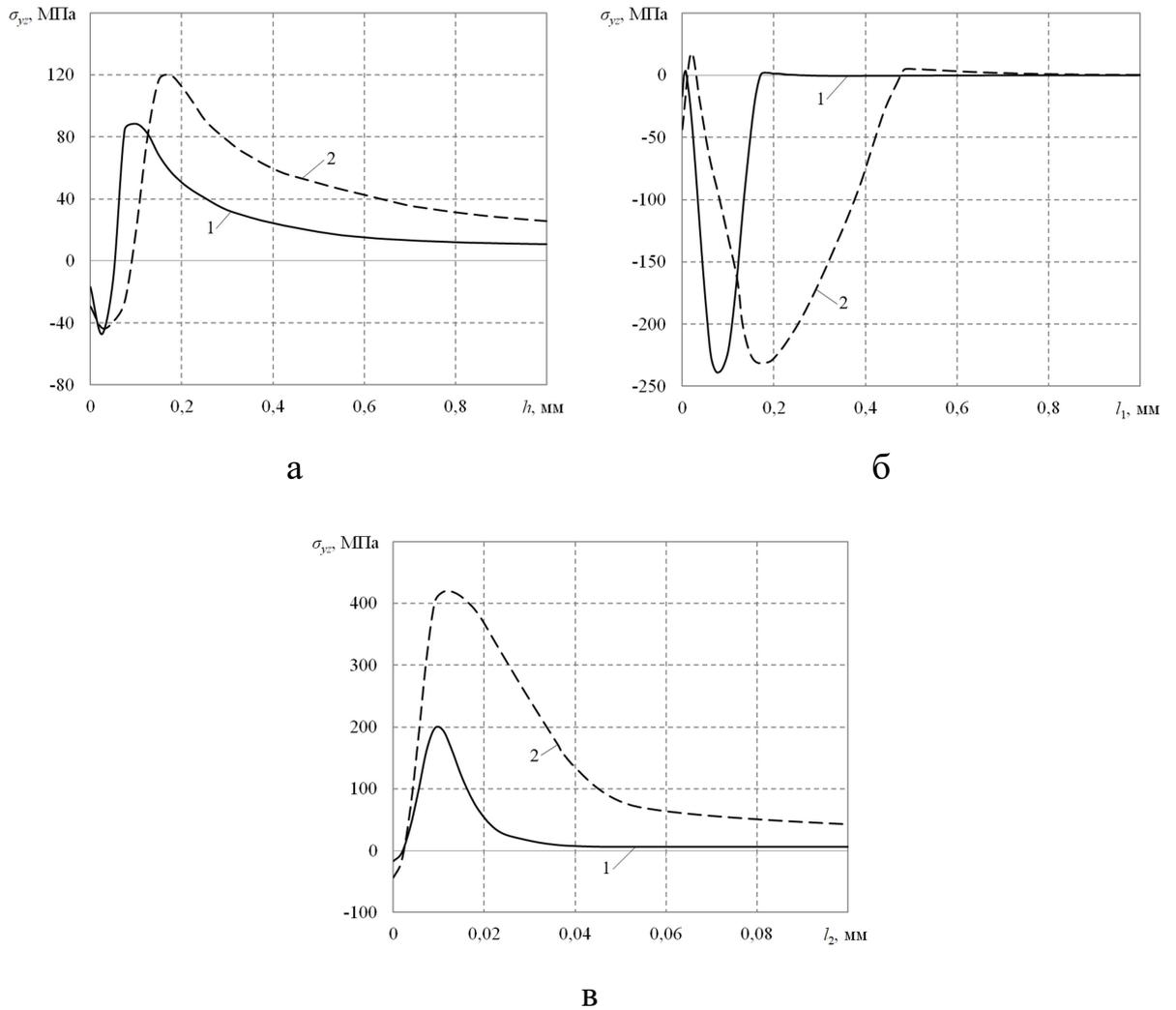


Рис. 3.26. Распределение компоненты $\sigma_{yz} = \sigma_{yz}(y)$ по глубине h от наружной поверхности трещины (а), по полудлине фронта трещины l_1 (б) и по полудлине кромки берега трещины l_2 (в):

1 – $b = 0,1$ мм, 2 – $b = 0,3$ мм

Из графиков видно, что касательные напряжения принимают максимальные (по модулю) значения при их распределении по кромке берега трещины на расстоянии около 5–10 мкм от фронта дефекта для компонент $\sigma_{xz} = \sigma_{xz}(y)$ при обоих случаях глубины b и для компоненты $\sigma_{yz} = \sigma_{yz}(y)$ при $b = 0,3$ мм, после чего наблюдается асимптотическое приближение значений к нулю. Также установлено, что для всех рассматриваемых компонент значения касательных напряжений

при глубине трещины $b = 0,3$ мм принимают бóльшие либо равные значения, чем при $b = 0,1$ мм.

Проанализируем полученные результаты с точки зрения прикладных задач и инженерной практики. Как уже отмечалось в первой главе работы, технологические методы поверхностного пластического упрочнения развивались, начиная с 50–60 годов прошлого века, и наибольшее применение они нашли в авиадвигателестроении, энергетическом и общем машиностроении. Опытным путём и практикой эксплуатации было установлено существенное увеличение ресурса ответственных деталей, газотурбинных двигателей (диски, лопатки, ёлочные замки, резьбовые соединения и другие детали), подшипников качения и прочих деталей и элементов конструкций, подвергнутых процедурам упрочнения, и связано это с наличием сжимающих ОН в тонком приповерхностном слое. Наибольший эффект наблюдается для упрочнённых деталей в условиях многоцикловых режимов испытаний или эксплуатации. Исходя из прикладных задач отметим, что условия, например, работы лопаток турбины характеризуются интенсивными вибрационными нагрузками, которые создают циклические рабочие напряжения. Циклические рабочие напряжения в совокупности с высокой рабочей температурой приводят к эрозии поверхности лопаток – образованию микродефектов различной природы, что и приводит к усталостному разрушению лопаток. Наблюдаемый в последние годы повышенный интерес двигателестроительных фирм к разработке и применению более эффективных методов упрочнения деталей газотурбинных двигателей (ГТД) связан, главным образом, с большими потерями вследствие досрочного снятия двигателей с эксплуатации из-за повреждения упрочнённых лопаток вентилятора и компрессора от попадания на вход двигателей посторонних предметов, от соударения с которыми образуются как сквозные, так и несквозные дефекты трещиноподобного типа (царапины, вмятины, забоины и т.д.). Такая эксплуатационная ситуация как раз и соответствует технологии ОППД, когда на гладкую (бездефектную) упрочнённую поверхность наносится концентратор напряжений.

В США ещё в 1994 году принята общенациональная многолетняя программа повышения усталостной прочности деталей ГТД [120]. Одной из основных целей программы по борьбе с разрушением от многоциклового усталости деталей ГТД является увеличение допустимых размеров забоины, трещиноподобных дефектов, царапин и т.д. в лопатках вентиляторов в 15 раз: с 5 до 75 mils (с 0,127 мм до 1,875 мм) [120]. Тем более, что статистический анализ показал, что количество двигателей, досрочно снимаемых с эксплуатации по причине повреждения посторонними предметами, составляет в военной авиации до 40–50% от общего числа досрочно снимаемых двигателей. В качестве замечания отметим, что в рамках уже отмеченной программы США проводятся ежегодные общенациональные конференции по отмеченным выше проблемам.

Выполненные в третьей главе исследования укладываются в рамки затронутых выше проблем, поскольку теоретически позволяют оценить изменение НДС в поверхностно упрочнённой гладкой детали после нанесения эксплуатационного дефекта (либо технологически предусмотренного надреза) сквозного или несквозного типов, в том числе и трещиноподобного (типа царапин), поскольку об эффективности ППД в этих условиях можно судить по уровню ОН в области, примыкающей к концентратору напряжений. По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации прикладного характера.

Во-первых, если глубина дефекта (надреза, царапины и прочее) от поверхности не превосходит глубины упрочнённого слоя (области сжатия материала), то ОН сжатия в области от дна концентратора даже выше, чем в поверхностно упрочнённой гладкой детали. В этом случае дефекты не приведут к снижению ресурса, рассчитанного, например, для гладкой (бездефектной) детали. В случае же, когда глубина дефекта превосходит толщину упрочнённого слоя, величина ОН в области от дна концентратора меньше, чем в гладкой детали. Но ОН до глубины дефекта, до 2–3 раз превосходящую толщину упрочнённого слоя, имеют ещё значительную величину и, тем самым, сохраняется положительное влияние

упрочнения на характеристики ресурса (показатели надёжности) упрочнённого изделия (конкретно – призматического образца).

Во-вторых, установлено, что когда глубина дефекта не превосходит толщины упрочнённого слоя для расчётной оценки возникающих полей ОН в области концентратора напряжений необходимо использовать упругопластическую постановку задачи, поскольку решение в упругой постановке даёт нереально завышенные (по модулю) величины остаточных сжимающих напряжений в сечениях от дна концентратора (особенно для трещиноподобных дефектов), превышающие (иногда в несколько раз) предел текучести материала призматического образца (по крайней мере, из сплава ЭП742). В случае, когда глубина сквозного концентратора больше толщины упрочнённого слоя, то решения в упругой и упругопластической постановке задачи дают близкие результаты, поэтому здесь можно использовать упругую постановку задачи. Однако здесь следует отметить, что для случая образца с несквозным трещиноподобным концентратором, глубина которого превышает толщину упрочнённого слоя, расчётные значения ОН из решения задачи в упругой постановке также демонстрируют существенно завышенные значения по отношению к аналогичному упругопластическому решению.

Эти два основных вывода можно рекомендовать исследователям, занимающимся прикладными задачами, например, в двигателестроении при оценке эффективности поверхностного пластического упрочнения как при разработке соответствующей конструкторско-технологической документации на стадии проектирования деталей, так и на стадии эксплуатации при возникновении дефектов при ударном контакте упрочнённой детали с инородными предметами.

3.5. Выводы по главе 3

1. Разработан 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 упругопластической постановке, базирующийся на конечно-элементном моделировании и известном начальном напряжённо-деформированном состоянии для гладкого упрочнённого призматического образца.
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 в случае, когда концентратор находится полностью или частично в упрочнённом слое.
3. Выполнен детальный сравнительный анализ решений задач определения остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях с поверхностными концентраторами типа сквозных надрезов полукруглого, квадратного, V-образного и полуэллиптического сечений и в трещиноподобных дефектах в упругой и упругопластической постановках. Показано, что если концентратор находится частично или полностью в упрочнённом слое, то наблюдается существенное расхождение упругого решения с упругопластическим для остаточных напряжений в сечениях от дна концентратора, достигающее погрешности до 100–200% в среднеквадратической норме и нескольких сотен процентов по максимальным (по модулю) значениям. Если же глубина концентратора превышает величину упрочнённого слоя более чем в 1,5 раза, то упругое и упругопластическое решения дают близкие результаты и по мере удаления от концентратора они асимптотически приближаются друг к другу.
4. Даны конкретные рекомендации по использованию полученных результатов и данных расчётов в прикладных инженерных задачах оценки ресурса поверхностно упрочнённых призматических деталей с поверхностными концентраторами напряжений независимо от природы их возникновения.

Глава 4. Исследование релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённой призматическом образце с концентраторами напряжений типа сквозных надрезов в условиях ползучести

Материал данной главы излагается в соответствии с работами автора [57, 84, 99].

4.1. Постановка задачи

Рассматриваемые в предыдущих главах вопросы относились лишь к особенностям реконструкции полей ОН и ПД для гладких «бездефектных» призматических тел и аналогичных тел при наличии одиночных или периодически повторяющихся концентраторов, размеру зоны влияния поверхностного упрочнения, упругому и упругопластическому поведению материала вблизи концентраторов напряжений. Основная задача при этом заключалась в анализе характера распределения фиксируемых (расчётных) значений ОН в области надреза, полученных при упругой или упругопластической постановках задач, однако не учитывалось влияние реологических процессов, например, в условиях высокотемпературной ползучести и силового воздействия. Многочисленные опубликованные труды как отечественных [3, 7, 15, 18, 22, 31, 38, 40, 43–45, 52, 59, 62, 68, 70, 73, 101], так и зарубежных [104, 111–113, 117, 134, 144, 145, 149, 150] исследователей демонстрируют острую необходимость в изучении ряда вопросов о влиянии температурно-силового воздействия на НДС деталей и элементов металлоконструкций с упрочнённой и неупрочнённой структурой поверхностного слоя. С практической точки зрения повышение прочностного ресурса изделий до сих пор остаётся актуальной проблемой для любого уровня машиностроения по причине отсутствия единого универсального подхода усиления конструкций без дополнительных конструктивных решений и неувеличения материалоёмкости. Кроме того, имеющуюся ситуацию усугубляет тот факт, что не всегда применяемый метод упрочнения

деталей позволяет добиться ожидаемого эффекта ввиду слабой изученности действующих эксплуатационных нагрузок на реологическое поведение материала в упрочнённом слое. Наиболее ярким примером в этом отношении выступает явление ползучести, приводящее к перераспределению напряжений (в том числе и ОН) и возникновению остаточных деформаций в теле с течением времени.

Основная цель данной главы диссертационного исследования заключается в разработке феноменологических методов расчёта полей ОН и ПД для поверхностно упрочнённых призматических тел с концентраторами напряжений при учёте эффекта релаксации ОН, вызванной высокотемпературной ползучестью.

Здесь следует отметить, что проблема решения задач ползучести и релаксации ОН в поверхностно упрочнённых элементах конструкций в мировой научной практике практически не рассматривается, имеются лишь экспериментальные работы по определению релаксации ОН в случае ползучести. Теоретические методы решения краевых задач такого рода систематически развиваются лишь в научной школе Самарского государственного технического университета (СамГТУ), исследователями которой решён ряд задач релаксации ОН в условиях ползучести для гладких (бездефектных) цилиндрических и призматических тел в условиях сложного нагружения (термоэкспозиция, кручение, растяжение, внутреннее давление) для цилиндрических тел и термоэкспозиции и двухосного нагружения для призматических тел [16, 58, 60, 61, 63, 65, 66, 69–71, 73, 74–76]. Однако задачи релаксации ОН в условиях ползучести в элементах конструкций с концентраторами напряжений теоретического характера ни в научной школе СамГТУ, ни зарубежными учёными не ставились и не решались.

4.2. Решение задачи расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом гладком образце при ползучести методом конечных элементов и её экспериментальная проверка в условиях термоэкспозиции

Целью данного пункта является отработка численного метода расчёта кинетики полей ОН в условиях ползучести на основе метода конечных элементов в вычислительном пакете ANSYS для гладкого образца, поскольку в научной литературе [73] имеются экспериментальные данные для призматического поверхностно упрочнённого образца из сплава ЭП742 как после процедуры упрочнения, так и после ползучести в течение 100 часов при $T = 650$ °С. Поэтому имеется возможность проверки адекватности результатов расчёта на основе численного метода экспериментальными данными для гладкого образца. Кроме этого, здесь выполняется сравнение расчётов на основе МКЭ с численными же решениями для гладкого образца на основе метода сеток и хорошо известного в теории ползучести метода шагов по времени, реализованного в работах [58, 73]. В комплексе решения на основе МКЭ, метода сеток и данные экспериментальных исследований позволяют сделать вывод об адекватности МКЭ в частном случае гладкого образца и далее использовать его в расчётной практике для призматических поверхностно упрочнённых образцов с концентраторами напряжений, для которых отсутствуют соответствующие экспериментальные данные.

Для этой цели сначала рассмотрим решение задачи о релаксации ОН вследствие ползучести на основе метода сеток на примере поверхностно упрочнённой гладкой призматического образца $100 \times 10 \times 10$ мм (см. рис. 2.1), изготовленной из того же жаропрочного никелевого сплава ЭП742. В силу отсутствия поверхностных и иных концентраторов напряжений задачу реконструкции полей ОН и ПД в пределах толщины упрочнённого слоя ($h = 200$ мкм) справедливо решать в упругой постановке по известным соотношениям (2.1)–(2.7) на основе расчётных этапов с первого по четвёртый, как это было показано в разделе 2.2 настоящей диссертационной работы на примере упрочнённого гладкого образца квадратного се-

чения. Численные результаты НДС такого образца, полученные на последнем (четвёртом) расчётном этапе, являются исходными данными для процедуры расчёта полей ОН с учётом ползучести. Известно, что ползучесть является физическим процессом, зависящим от времени, поэтому реологическое деформирование, сопровождающееся релаксацией ОН, рассматривается с начального момента времени $t_0 = 0$, причём предполагается мгновенное прогревание образца с температуры $T = T_0 = 20$ °С до температуры $T = T_1 = 650$ °С. Такую особенность, связанную с кинетикой ОН в условиях высокотемпературной ползучести с температурной выдержкой по времени t без силового нагружения и при известном начальном НДС тела, принято называть термоэкспозицией [73].

Общий принцип решения задачи заключается в оценке «жёсткости» конструкции, которая представляется зависимостью модуля упругости от температуры ($E_0 = E_0(T_0) = 2,21 \cdot 10^5$ МПа, $E_1 = E_1(T_1) = 1,96 \cdot 10^5$ МПа). Поскольку решение методом сеток, построенное в работах [58, 73], используется в дальнейшем для сравнительного анализа с решением по разработанному диссертантом методу на основе МКЭ, приведём его основные элементы метода [58, 73]. Дальнейший материал изложен в соответствии с работами [58, 73].

После процедуры изотропного упрочнения поверхности призматического образца в момент времени $t = 0$ при температуре $T = T_0$ имеем следующее распределение ОН и ПД (см. формулы (2.5)):

$$\sigma_x(y) = \sigma_y(y), \quad q_x(y) = q_z(y) = -\frac{1-\nu}{E_0} \sigma_x(y), \quad q_y(y) = \frac{2(1-\nu)}{E_0} \sigma_x(y). \quad (4.1)$$

После ступенчатого изменения температуры с $T = T_0$ до $T = T_1$ ($T_1 > T_0$) в предположении, что новых пластических деформаций не возникает, получаем распределение полей ОН и ПД при $t = 0 + 0$:

$$\sigma_x(y) = \frac{E_1}{1-\nu} q_x(y), \quad \sigma_z(y) = \sigma_x(y), \quad (4.2)$$

где $q_x(y)$ задаётся формулой (4.1) при известной экспериментальной эпюре $\sigma_x = \sigma_x(y)$ после упрочнения, аппроксимированной соотношением (2.6).

В случае температурной выдержки при $T = T_1$ в образце с течением времени $t \in [0, t^*]$ будут накапливаться деформации ползучести $p_j = p_j(y, t)$ ($j = x, y, z$), а соотношения, описывающие компоненты полных деформаций во времени вследствие явления ползучести при $T = T_1$, будут определяться из следующих уравнений (см. гипотезу (2.1)):

$$\begin{aligned}\varepsilon_x(y, t) &= \frac{1}{E_1} [\sigma_x(y, t) - \nu \sigma_z(y, t)] + q_x(y) + p_x(y, t) = 0, \\ \varepsilon_z(y, t) &= \frac{1}{E_1} [\sigma_z(y, t) - \nu \sigma_x(y, t)] + q_z(y) + p_z(y, t) = 0.\end{aligned}\tag{4.3}$$

Компонента полных деформаций $\varepsilon_y(y, t)$ является «пассивной» и с учётом условия несжимаемости деформаций ползучести $p_x + p_y + p_z = 0$ может быть представлена в следующем виде

$$\varepsilon_y(y, t) = -\frac{\nu}{E_1} [\sigma_x(y, t) + \sigma_z(y, t)] + q_y(y) - (p_x(y, t) + p_z(y, t)).$$

Из решения системы уравнений (4.3) относительно компонент $\sigma_x(y, t)$ и $\sigma_z(y, t)$, получаем соотношения, описывающие кинетику ОН для указанных компонент:

$$\begin{aligned}\sigma_x(y, t) &= \frac{E_1(T_1)}{\nu^2 - 1} (q_x(y) + p_x(y, t) + \nu(q_z(y) + p_z(y, t))), \\ \sigma_z(y, t) &= \frac{E_1(T_1)}{\nu^2 - 1} (q_z(y) + p_z(y, t) + \nu(q_x(y) + p_x(y, t))).\end{aligned}\tag{4.4}$$

Таким образом, при известных значениях компонент тензора деформации ползучести $p_x(y, t)$ и $p_z(y, t)$ величины соответствующих компонент ОН $\sigma_x(y, t)$ и $\sigma_z(y, t)$ определяются из решения системы (4.4).

При вычислении величин деформаций ползучести $p_x(y, t)$ и $p_z(y, t)$ в работах [58, 73] использовали метод шагов по времени применительно к выбранной теории ползучести, суть которого заключается в следующем. Пусть выполнена дискретизация по времени $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = t^*$ с заданным шагом $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n-1$) при известных значениях $p_j = p_j(y, t)$ ($j = x, y, z$). Тогда на ос-

новании выбранной теории ползучести вычисляются приращения деформаций ползучести $\Delta p_j(y, t_i)$ за шаг по времени Δt_i для всех y и находятся значения $p_j(y, t_{i+1}) = p_j(y, t_i) + \Delta p_j(y, t_i)$. Затем, с учётом $\sigma_y(y) = 0$, по формулам (4.4) определяются оставшиеся компоненты $\sigma_j(y, t_{i+1})$ ($j = x, z$). В случае, когда в момент времени $t = t^* + 0$ выполняется температурная разгрузка образца от $T = T_1$ до $T = T_0$, модуль Юнга мгновенно изменяется со значения $E_1(T_1)$ на $E_0(T_0)$. Отсюда зависимость (4.4) при $T = T_0$ принимает вид:

$$\begin{aligned}\sigma_x(y, t^* + 0) &= \frac{E_0(T_0)}{\nu^2 - 1} [q_x(y) + p_x(y, t^* + 0) + \nu(q_z(y) + p_z(y, t^* + 0))], \\ \sigma_z(y, t^* + 0) &= \frac{E_0(T_0)}{\nu^2 - 1} [q_z(y) + p_z(y, t^* + 0) + \nu(q_x(y) + p_x(y, t^* + 0))].\end{aligned}\quad (4.5)$$

Полученная система уравнений задаёт окончательные выражения для величин ОН в условиях термоэкспозиции в момент времени $t = t^* + 0$.

Для реализации расчётов по модели (4.1)–(4.5) в работе [73] использованы квазилинейные уравнения установившейся ползучести вида

$$\dot{p}_{ij} = \frac{3}{2} c S^{n-1} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \right), \quad (4.6)$$

где p_{ij} – компоненты тензора деформаций ползучести, S – интенсивность напряжений, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, $\sigma_{kk} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$, c и n – константы конкретного материала. Выбор модели (4.6) в работе [73] обоснован тем, что за время 100 часов, согласно экспериментальным данным для сплава ЭП742 при $T = 650$ °С, которые приведены в работе В. П. Радченко и Ю. А. Ерёминым [59], первой стадией ползучести можно пренебречь ввиду незначительной величины накопленной на этой стадии деформации ползучести, и можно без ущерба использовать лишь вторую стадию ползучести, соответствующую стадии установившейся ползучести при сложном напряжённом состоянии и описываемой уравнением (4.6). В расчётах использовались следующие значения параметров c и n для сплава ЭП742 при $T = 650$ °С [59]: $n = 14,3$, $c = 0,722 \cdot 10^{-6} (\sigma_{**})^{-n}$, где $\sigma_{**} = 500$ МПа.

Расчёты, выполненные по (4.1)–(4.5) в дальнейшем сравнивались с расчётами по МКЭ, развиваемому в настоящей диссертационной работе.

Рассмотрим теперь методологию решения задачи ползучести гладкого поверхностно упрочнённого образца в рамках развиваемого в настоящем исследовании подхода, основанного на МКЭ. Численная реализация осуществлена, как и предыдущие задачи в главах 2 и 3, в программном вычислительном пакете ANSYS с использованием опции решения задач ползучести.

Как уже было отмечено ранее, для решения задачи, помимо описания упругих свойств материала исследуемого образца, следует определиться с выбором теории ползучести, согласно которой будет задано реологическое поведение материала при исходных граничных условиях. В качестве математической модели, позволяющей учитывать установившуюся стадию ползучести материала, можно выбрать степенную модель Нортона, заложенную в соответствующей библиотеке теорией ползучести в пакете ANSYS

$$\dot{\rho} = \beta \sigma^n, \quad (4.7)$$

где β и n – константы материала, при этом показатель нелинейности n для металлов является достаточно большим и содержится в диапазоне $3 \leq n \leq 8$, а для ряда современных высокопрочных сталей – $3 \leq n \leq 18$ [70].

Математическое описание закона Нортона в программе ANSYS имеет обобщённый вид

$$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} e^{-C_3/T}, \quad (4.8)$$

где C_1 , C_2 , C_3 – константы материала, T – значение абсолютной температуры.

Сопоставляя (4.7) и (4.8), можно заметить, что для описания эффекта ползучести с помощью закона Нортона при численном решении задачи МКЭ должны быть известны постоянные материала C_1 и C_2 . При этом значение параметра C_3 согласно (4.7) можно положить равным нулю.

Величины C_1 и C_2 определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} C_1 &= c(\sigma^{**})^{-n}, \\ C_2 &= n, \end{aligned} \quad (4.9)$$

где c , σ^{**} и n – параметры модели, методика идентификации которых изложена в [59, 70].

Как уже отмечалось ранее, в работе [73] для сплава ЭП742 при температуре 650° С приведены следующие значения параметров материала, позволяющих описать установившуюся стадию ползучести: $c = 0,722 \cdot 10^{-6}$, $\sigma^{**} = 500$ МПа, $n = 14,3$.

Для перехода к этапу расчёта релаксации ОН в поверхностно упрочнённом гладком образце при высокотемпературной ползучести удобно воспользоваться уже имеющимися результатами исходного НДС после процедуры упрочнения, приведёнными в разделе 2.2. Расчёт кинетики ОН выполнялся при условии термоэкспозиции с температурной выдержкой по времени, не превышающей $t = 100$ ч. Дискретизация по времени выдержки при использовании программного комплекса ANSYS выполнялось заданием временного шага Δt в блоке настроек решателя в два этапа. На первом этапе рассматривался процесс реологического деформирования упрочнённого образца по времени от $t_0 = 0$ до $t_1 = 1$ ч с малым значением временного шага $\Delta t_1 = 0,02$ ч, поскольку эффект релаксации ОН здесь имеет наибольшую интенсивность. На втором этапе решение задачи продолжалось по времени от $t_1 = 1$ ч до $t_2 = 100$ ч со значением $\Delta t_2 = 1$ ч. Отметим, что геометрия КЭ модели была такой же, как и при решении задач реконструкции ОН после упрочнения (глава 2).

Ниже на рис. 4.1 приведены результаты численного расчёта на основе МКЭ для компоненты ОН $\sigma_x = \sigma_x(y, t)$ с учётом их релаксации при ползучести. Величины напряжений и характер их распределения в пределах толщины упрочнённого слоя фиксировались для вывода графиков «на печать» в моменты времени $t = \{0; 0,2; 1; 100\}$ ч. Следует отметить, что экспериментальные (сплошная линия) и расчётные (штриховая линия) результаты, показанные маркером 1, являются начальным НДС поверхностно упрочнённой гладкого образца при $T_0 = 20$ °С

($t = 0$) и приведены на графике для наглядного сравнения распределения компоненты напряжений $\sigma_x = \sigma_x(y)$ вследствие их последующей релаксации. Маркерами 2, 3 и 4 отмечены кривые распределения ОН $\sigma_x = \sigma_x(y, t)$ по глубине h при высокотемпературной ползучести ($T_1 = 650$ °С), определённые за время температурной выдержки $t = 0,2$ ч, $t = 1$ ч и $t = 100$ ч соответственно. Распределение ОН после мгновенной температурной разгрузки с $T_1 = 650$ °С до $T_0 = 20$ °С в момент времени $t = 100$ ч для экспериментальной (сплошная линия, соответствующая результатам экспериментальных данных [59, 73]) и расчётной (штриховая линия) эпюр отмечено маркером 5. При этом расхождение полученных результатов расчёта финишных ОН с экспериментальными данными (показаны соответствующими кривыми с маркером 5) в условиях термоэкспозиции в пределах толщины упрочнённого слоя в норме (2.8) составило $\Delta_x^\sigma = 11,63\%$.

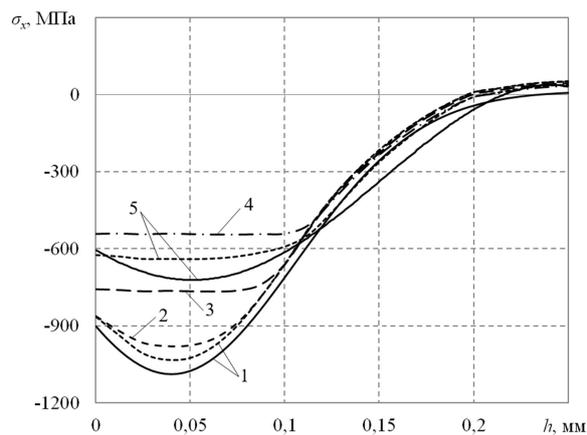


Рис. 4.1. Кинетика остаточных напряжений $\sigma_x = \sigma_x(y, t)$ при ползучести, распределённых по глубине h от верхней поверхности в зависимости от времени выдержки t : 1 – расчётная по МКЭ (штриховая линия) и экспериментальная (сплошная линия) эпюры при $t = 0$, 2 – $t = 0,2$ ч, 3 – $t = 1$ ч, 4 – $t = 100$ ч, 5 – расчётная (штриховая линия) и экспериментальная (сплошная линия) эпюры при температурной разгрузке в момент времени $t = 100$ ч

Из приведённых на рис. 4.1 зависимостей следует, что в условиях высоко-температурной ползучести для представленных случаев распределения ОН $\sigma_x = \sigma_x(y, t)$ наибольшему изменению уровня сжимающих напряжений (релаксации напряжений) подвергается упрочнённый слой образца, находящийся на глубине $0 \leq y \leq 0,1$ мм от верхней поверхности. Примечательно, что за пределами глубины $y > 0,1$ мм для всех расчётных случаев кинетика ОН по времени выдержки t при ползучести практически не изменяется, однако при этом наибольшая величина расчётных значений сжимающих ОН после термоэкспозиции и мгновенной температурной разгрузки уменьшилась в 1,69 раз по сравнению с их максимальным (по модулю) значением ОН при первоначальном НДС после упрочнения ($t = 0$). Тем не менее, после температурной разгрузки гладкого образца на глубине $0 \leq y \leq 0,1$ мм всё ещё наблюдается область с максимальными напряжениями сжатия: для расчётных значений $\sigma_x^{\max}(y) \approx -600$ МПа, а для экспериментальных значений $\sigma_x^{\max}(y) \approx -780$ МПа. В заключение следует отметить, что полученная разница $\Delta_x^\sigma = 11,63\%$ между расчётными значениями ОН и экспериментальными данными, замеренными по толщине упрочнённого слоя, согласно «рекомендации» Ю. Н. Работнова относительно исследований в области ползучести находится в пределах допустимого отклонения (до 20%) и «не считается чрезмерно большой» [52], что в целом подтверждает адекватность разработанной на основе МКЭ методики экспериментальным данным для гладкого образца.

Выполнен также сравнительный анализ данных расчёта по модели (4.1)–(4.5) (сеточный метод) с данными расчёта с использованием МКЭ. На рис. 4.2 приведены данные в начальный момент времени $t = 0$ после упрочнения и в финишный момент времени при $t = 100$ ч после температурной разгрузки. Как следует из данных на рис. 4.2 наблюдается хорошее соответствие как расчётных данных по обоим методикам, так и их хорошая коррелированность с экспериментальными данными.

Таким образом, в данном пункте установлена адекватность КЭ модели экспериментальным данным и данным расчёта на основе метода сеток в частном случае для гладкого образца, что даёт основание применять разработанную модель на основе МКЭ и в расчётах ползучести поверхностно упрочнённых призматических образцов с концентраторами напряжений.

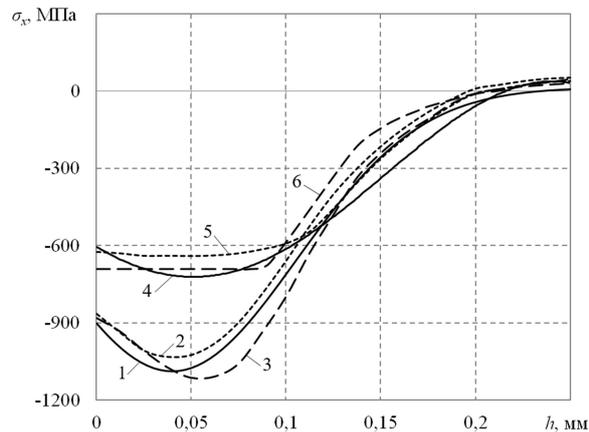


Рис. 4.2. Графики для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y, t)$ при ползучести:

- 1 – экспериментальные данные при $t = 0$ (после упрочнения), 2 – расчётные данные по методу конечных элементов ($t = 0$), 3 – расчётные данные по методу сеток ($t = 0$), 4 – экспериментальные данные при $t = 100$ ч, 5 – расчётные данные по методу конечных элементов ($t = 100$ ч), 6 – расчётные данные по методу сеток ($t = 100$ ч)

4.3. Исследование релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом образце с полукруглыми и V-образными надрезами при ползучести в условиях термоэкспозиции и силового воздействия в упругопластической постановке

Наиболее сложным видом нагружения (и одновременно самым «опасным») является температурно-силовое воздействие на элементы металлических конструкций. Превышение предельно допускаемых температур при эксплуатации изделий вследствие неучтённых факторов наделяет металл повышенной текучестью, что приводит к искажению первоначальной геометрической формы из-за

необратимых пластических деформаций – процесса реологического деформирования. При этом даже незначительные силовые статические нагрузки несомненно могут способствовать нарушению работоспособности изделия вследствие ползучести.

Отмеченные в предыдущих разделах результаты исследований относились к анализу перераспределения ОН в телах призматической формы при наличии концентраторов напряжений после упрочнения, оценивалось влияние действия температуры на кинетику наведённых напряжений в гладком «бездефектном» образце методами ППД вследствие высокотемпературной ползучести, однако силовое нагружение упрочнённых образцов для всех рассмотренных ранее задач не выполнялось. В связи с этим, текущий раздел диссертационного исследования посвящён изучению воздействия реологического высокотемпературного деформирования упрочнённого образца с концентраторами напряжений при постоянной статической нагрузке.

Как было установлено в главе 3, в отличие от упругого расчёта полей ОН и ПД для гладкого образца, задачу реконструкции НДС для случая упрочнённого образца с поверхностными концентраторами следует свести к задаче фиктивной термоупругопластичности ввиду существенного расхождения результатов ОН, полученных из упругого и упругопластического решений. Оценка характера распределения и уровня сжимающих ОН при термоэкспозиции с учётом пластичности материала вблизи профильного надреза также имеет особый научный интерес. Ранее этот вопрос на примере экспериментальных исследований рассматривался авторами [60], но с позиции теории упругости на примере цилиндрических упрочнённых образцов, изготовленных из сплавов В95 и Д16Т, с круговыми надрезами различного радиуса. Анализ кинетики ОН при ползучести для упрочнённых призматических тел с концентраторами напряжений профильного типа в рамках существующей теории для упругопластической постановки рассматривается впервые.

Рассмотрим сначала на примере поверхностно упрочнённого призматического образца с полукруглым надрезом (см. рис. 2.8) методику расчёта релаксации первоначально наведённых ОН в условиях ползучести без учёта влияния силового воздействия, т.е. в случае чистой термоэкспозиции. Как и в случае упрочнённого гладкого образца, исходными данными численного решения задачи является известное из решения задачи фиктивной термоупругости (термоупругопластичности) распределение полей ОН, принятая теория ползучести (в нашем случае модель Нортона) и известные константы материала образца c , σ^{**} и m , описывающие стадию установившейся ползучести. С целью проведения сравнительного анализа рассмотрим независимо друг от друга одну и ту же задачу в упругой и упругопластической постановках, приняв в качестве начального НДС исследуемого образца соответствующее распределение ОН $\sigma_i = \sigma_i(y)$ ($i = x, y, z$) после упрочнения, а время термоэкспозиции – $t = 100$ ч. С целью понимания терминов «упругая» и «упругопластическая» постановка задач в условиях ползучести отметим, что здесь имеются ввиду задачи с начальными напряжённо-деформированными состояниями после упрочнения, полученными либо в упругой постановке (глава 2), либо в упругопластической постановке (глава 3).

Методика численного решения задачи релаксации ОН для упрочнённого образца с полукруглым надрезом в упругой постановке (случай 1) аналогична решению задачи для гладкой модели, т.е. решение полностью повторяет установленный алгоритм расчёта. В случае упругопластической постановки задачи (случай 2) начальное распределение ОН основано на нелинейном решении, поскольку модель материала призматического тела (в отличие от случая 1), описывает упругопластические свойства в зоне надреза за пределом текучести. Задание кривой упругопластического деформирования материала приводит к переходу от модуля упругости $E(T)$ к касательному модулю $E_\tau(T, t) = \frac{\sigma_i(y, t)}{e_i^p(y, t)}$ при $\sigma_i(y, t) > \sigma_\tau$, величина которого пересчитывается для каждого расчётного шага по времени t .

Сравнительный анализ данных выполнялся для каждого расчётного случая в зависимости от времени температурной выдержки $t = \{0; 0,02; 1; 50; 100\}$ ч при высокотемпературной ползучести ($T = 650$ °С, материал образца – сплав ЭП742) в условиях термоэкспозиции. На рис. 4.3,а приведены результаты численного расчёта кинетики ОН по глубине h от дна концентратора полукруглого надреза для компоненты $\sigma_x(y, t)$, зафиксированных после процедуры ППД до начала реологического деформирования ($t = 0$) и представляющих начальное НДС для конкретной расчётной схемы призматического образца. Упругому решению задачи (режим 1) для образца с полукруглыми надрезами $\rho = 0,1$ мм и $\rho = 0,3$ мм здесь соответствуют кривые 2 и 4. Результаты решения этих же задач в упругопластической постановке (режим 2) показаны в виде кривых 3 и 5. Кривым 1 соответствуют расчётные результаты кинетики ОН в гладком образце. Маркеры, показанные на рис. 4.3,а, соответствуют экспериментальным данным распределения компоненты ОН $\sigma_x(y)$ в гладком призматическом образце. Аналогичные обозначения кривых приведены и для иллюстрации кинетики ОН в зависимости от времени выдержки $t = \{0,02; 1; 50\}$ ч (рис. 4.3 (б, в, г) соответственно). В качестве замечания отметим, что все графики на рис. 4.3 приведены лишь к соответствующему моменту времени без температурной разгрузки.

Отдельно на рис. 4.4 приведена детализация кинетики ОН для расчётных схем образцов с одиночным надрезом $\rho = 0,1$ мм (рис. 4.4,а) и $\rho = 0,3$ мм (рис. 4.4,б) после температурной выдержки в течение времени $t = 100$ ч. Для наглядного сравнения полученных решений на графики также нанесены финишные результаты для гладкого образца, отображённые в виде кривой 1. Результаты кинетики ОН для упругого и упругопластического решений задач для образца с надрезом ρ показаны кривыми 2 и 3. Построенные по расчётным результатам кривые 1–3 описывают кинетику ОН в призматических упрочнённых телах в условиях реологического деформирования без температурной разгрузки. Выполняя в соответствии с (4.5) температурную разгрузку с $T = T_1 = 650$ °С до $T = T_0 = 20$ °С, получаем финишные значения ОН для случая упругого решения задачи образца с

концентратором напряжений, показанные в виде кривой 4. Эти результаты целесообразно сравнить с расчётными (кривая 5) и экспериментальными (маркеры) данными о перераспределении остаточных сжимающих напряжений в упрочнённом слое гладкого образца при аналогичной температурной разгрузке после 100 часов ползучести.

Сравнительный анализ расчётных данных, представленных на рис. 4.3, показал, что при оценке кинетики ОН по компоненте $\sigma_x = \sigma_x(y, t)$ для образца с надрезом $\rho = 0,1$ мм в условиях термоэкспозиции учёт зоны пластичности вблизи концентратора напряжений имеет значение в пределах 20 мкм по толщине упрочнённого слоя от дна надреза и только в течение первого часа реологического нагружения, после чего по причине релаксации ОН наблюдается хорошая сходимость результатов расчёта между решениями задачи в упругой и упругопластической постановках. Для образца с надрезом $\rho = 0,3$ мм эта особенность не имеет отражения ввиду того, что применение технологии ОПД при таком размере концентратора напряжений не приводит к появлению вторичных пластических деформаций после упрочнения, т.к. размер надреза превышает толщину упрочнённого слоя, а значит характер распределения ОН и их уровень в зоне концентратора подвержены действию релаксации только в зависимости от времени температурной выдержки при реологическом деформировании и независимо от начального условия упругой или упругопластической постановки задачи.

Из представленных на рис. 4.3, а и 4.4 графиков кинетики напряжений для компоненты $\sigma_x = \sigma_x(y)$ следует, что в процессе реологического деформирования, протекающего в условиях термоэкспозиции, наибольшая релаксация наведённых вследствие ППД сжимающих ОН за 100 ч температурной выдержки наблюдается для случая образца с полукруглым надрезом $\rho = 0,1$ мм в пределах 50 мкм по глубине от дна концентратора. Численное сравнение финишных результатов показало, что после температурной разгрузки ($t = 100$ ч) для образца при исходном НДС из упругого решения ($t = 0$) величина релаксации согласно (2.8) составляет 66,1%, а в случае сопоставления с начальным ($t = 0$) упругопластическим распределени-

ем полей ОН – 26,22%. При этом для образца с полукруглым надрезом $\rho = 0,3$ мм аналогичная сравнительная оценка результатов решения задачи в упругой и упругопластической постановках релаксация ОН составляет 19,87% и 16,26% соответственно.

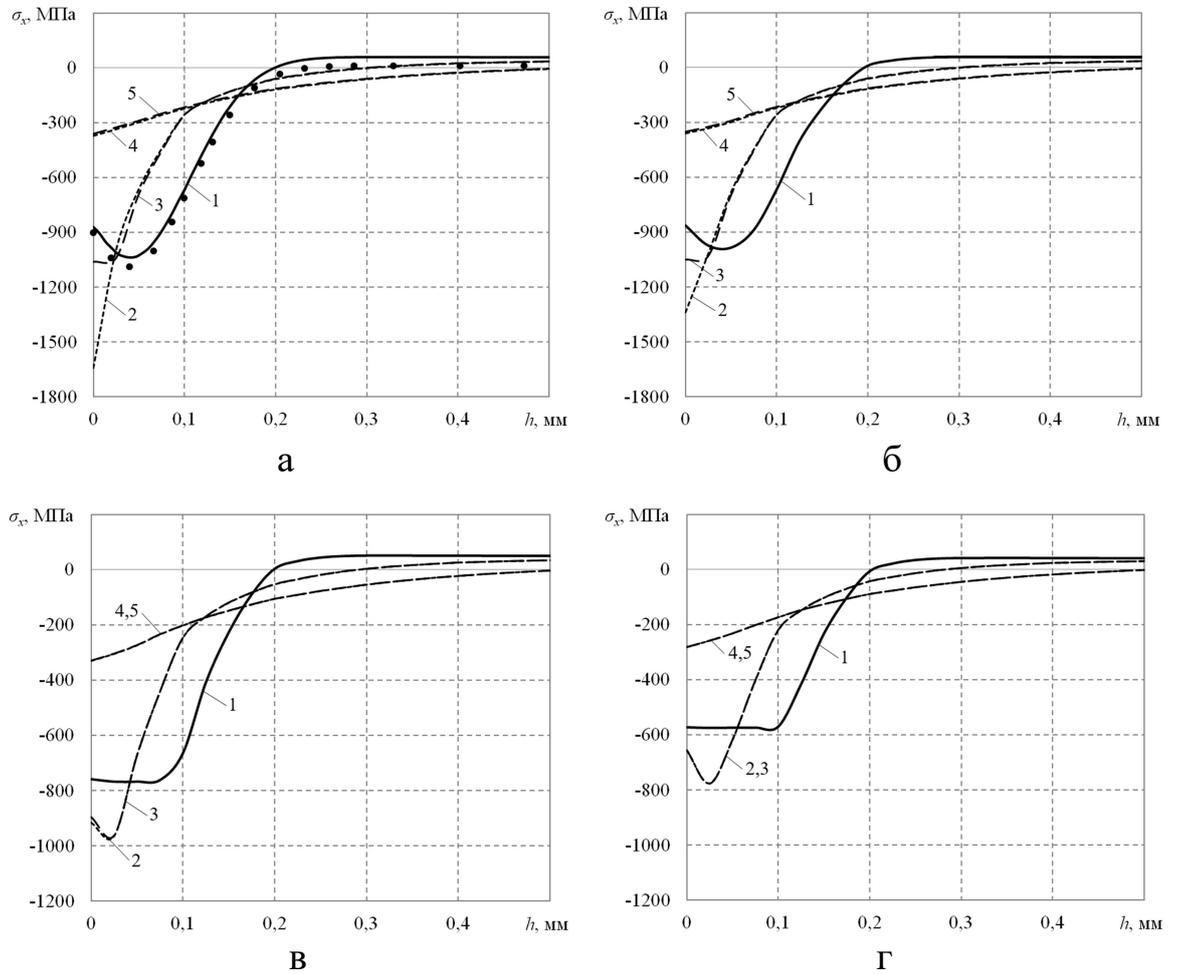


Рис. 4.3. Кинетика остаточных напряжений $\sigma_x(y)$ по глубине h при температуре $T = 650$ °С в условиях термоэкспозиции в различные моменты времени: а – $t = 0$, б – $t = 0,02$ ч, в – $t = 1$ ч, г – $t = 50$ ч. Маркеры: ● – экспериментальные данные после упрочнения гладкого образца, 1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение при $\rho = 0,1$ мм, 3 – упругопластическое решение при $\rho = 0,1$ мм, 4 – упругое решение при $\rho = 0,3$ мм, 5 – упругопластическое решение при $\rho = 0,3$ мм

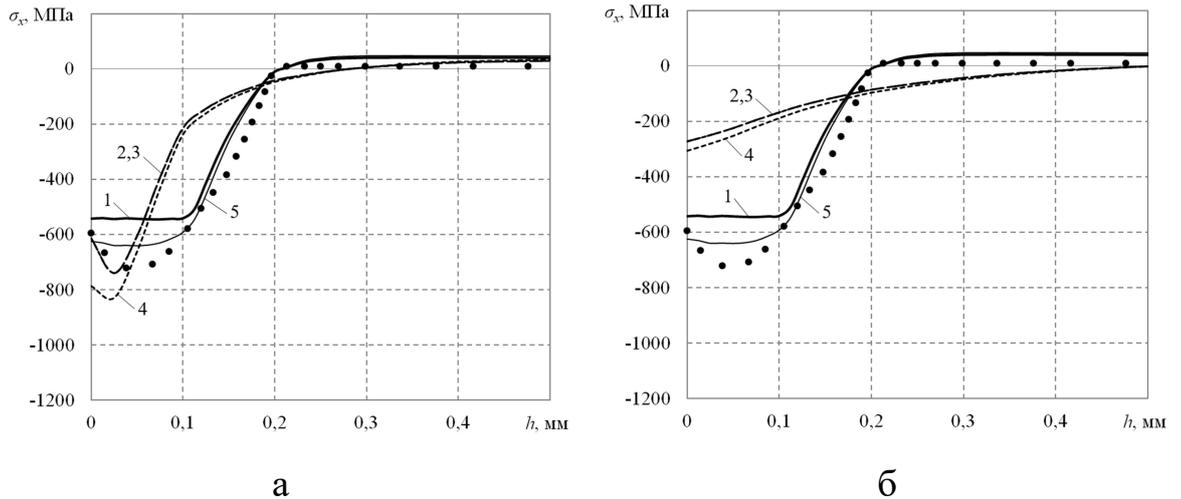


Рис. 4.4. Результат кинетики остаточных напряжений по компоненте $\sigma_x(y)$ по глубине h при температуре $T = 650$ °С в условиях термоэкспозиции после температурной выдержки $t = 100$ ч для образца с надрезом $\rho = 0,1$ мм (а) и $\rho = 0,3$ мм (б). Маркеры: 1 – гладкий образец, 2 – упругое решение для образца с надрезом, 3 – упругопластическое решение для образца с надрезом, 4 – температурная разгрузка упругого образца с надрезом, 5 – температурная разгрузка гладкого образца (расчёт), ● – температурная разгрузка гладкого образца (эксперимент)

Вторая категория задач рассматривалась в условиях температурно-силового воздействия. Поскольку исследуемые в настоящей диссертации упрочнённые призматические тела являются по сути балочными элементами металлоконструкций, которые по своему определению оказывают преимущественное сопротивление изгибным нагрузкам, в качестве силового воздействия рассматривалась расчётная схема трёхточечного изгиба для гладкого образца (рис. 4.5,а) и образца с надрезом (рис. 4.5,б). Нагружение осуществлялось равномерно распределённой нагрузкой $q = 90$ Н/мм, действующей вертикально вверх со стороны нижней грани в центральной плоскости $KLMN$ поперечного сечения (см. рис. 4.5). Изучение такой схемы силового нагружения поверхностно упрочнённых призматических тел примечательно тем, что действующая поперечная сила q приводит к интен-

сивному снижению сжимающих ОН в верхнем упрочнённом слое за счёт возникновения в этой области наибольших растягивающих напряжений вследствие изгиба. Появление такого рода напряжений в конструкциях считается сугубо опасным фактором при эксплуатации любых изделий, поэтому оценка НДС для рассматриваемой схемы нагружения имеет и научно-практический интерес, что подчёркивалось, например, при исследовании влияния ОН на характеристики многоциклового усталости при переменном трёхточечном изгибе балки [154, 155].

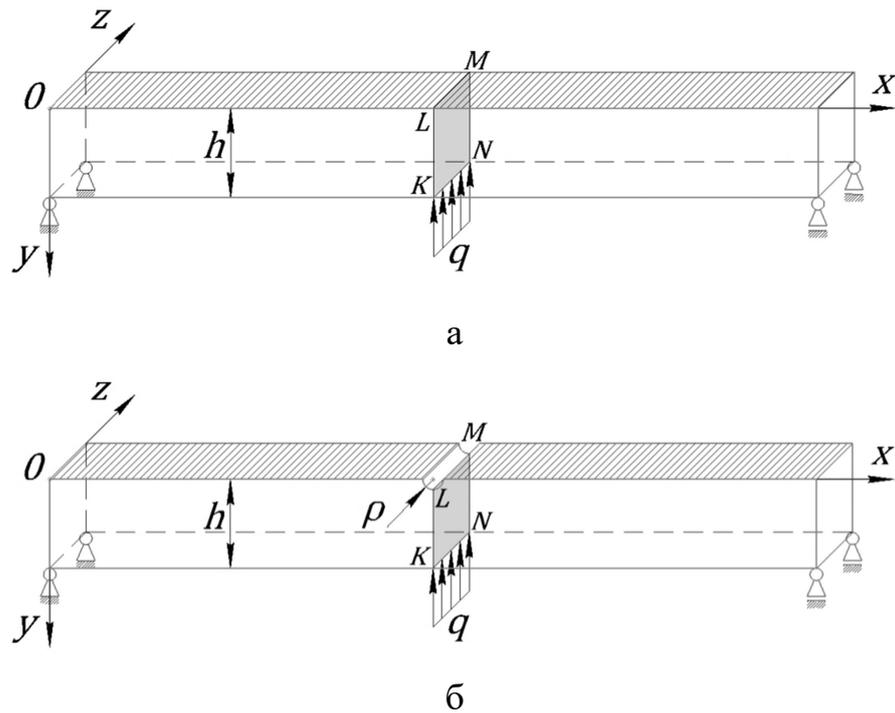


Рис. 4.5. Расчётная схема трёхточечного изгиба упрочнённой гладкого образца (а) и упрочнённого образца с полукруглым надрезом (б)

При численном решении задачи релаксации ОН в гладком образце и образце с полукруглым надрезом радиусом ρ , находящихся в условиях температурно-силового воздействия, было уделено особое внимание способу приложения равномерно распределённой нагрузки q . Нагружение задавалось в виде системы сосредоточенных сил в узлах элементов КЭ-модели, расположенных на отрезке KN (см. рис. 4.5). Для этого в срединных узлах (в положительном направлении координатной оси Oy) прикладывалась сосредоточенная нагрузка величиной

$$F = \frac{qs}{n},$$

а в крайних узлах (расположенных в точках K и N) – значение силы в два раза меньше, т.е. $0,5F$. Здесь $s = 10$ мм – ширина образца, $n = 30$ – количество элементов, расположенных по ширине образца в направлении оси Oz (рис. 4.5).

Графическое построение расчётных результатов кинетики ОН, полученных при температурно-силовом нагружении, осуществлялось подобно расчётному случаю при термоэкспозиции для обоих типов моделей образцов (см. рис. 4.5) и при тех же значениях температурной выдержки (см. рис. 4.6, 4.7). Исходное НДС в момент времени $t = 0$, в отличие от приведённых на рис. 4.3 данных, фиксировалось после предварительного поверхностного упрочнения балок (без нагрузки) с последующим «мгновенным» нагружением распределённой силой $q = 90$ Н/мм. Дальнейшее исследование кинетики напряжений выполнялось по истечению 100 часов температурной выдержки при ползучести. Значения финишных результатов ОН по компоненте $\sigma_x = \sigma_x(y)$ в зависимости от радиуса надреза $\rho = \{0,1; 0,3\}$ мм приведены отдельно на рис. 4.7,а и 4.7,б. Для расчётных упругого и упругопластического случаев без учёта силовой и температурной разгрузки в конечный момент времени $t = 100$ ч распределение ОН соответствует кривым 2 и 3. Мгновенная температурная разгрузка с температуры $T = T_1 = 650$ °С до $T = T_0 = 20$ °С (рис. 4.7, кривая 4) и последующая мгновенная силовая разгрузка (рис. 4.7, кривая 5) проводились только для решения фиктивной термоупругой задачи. Результат распределения ОН после температурной и силовой разгрузки для случая гладкого образца показан на рис. 4.7 соответствующими маркерами 6 и 7.

Следует отметить, что натурные испытания упрочнённых образцов призматического профиля для отмеченной схемы нагружения (трёхточечный изгиб шарнирно опёртого образца) с концентраторами напряжений в научной практике не проводились.

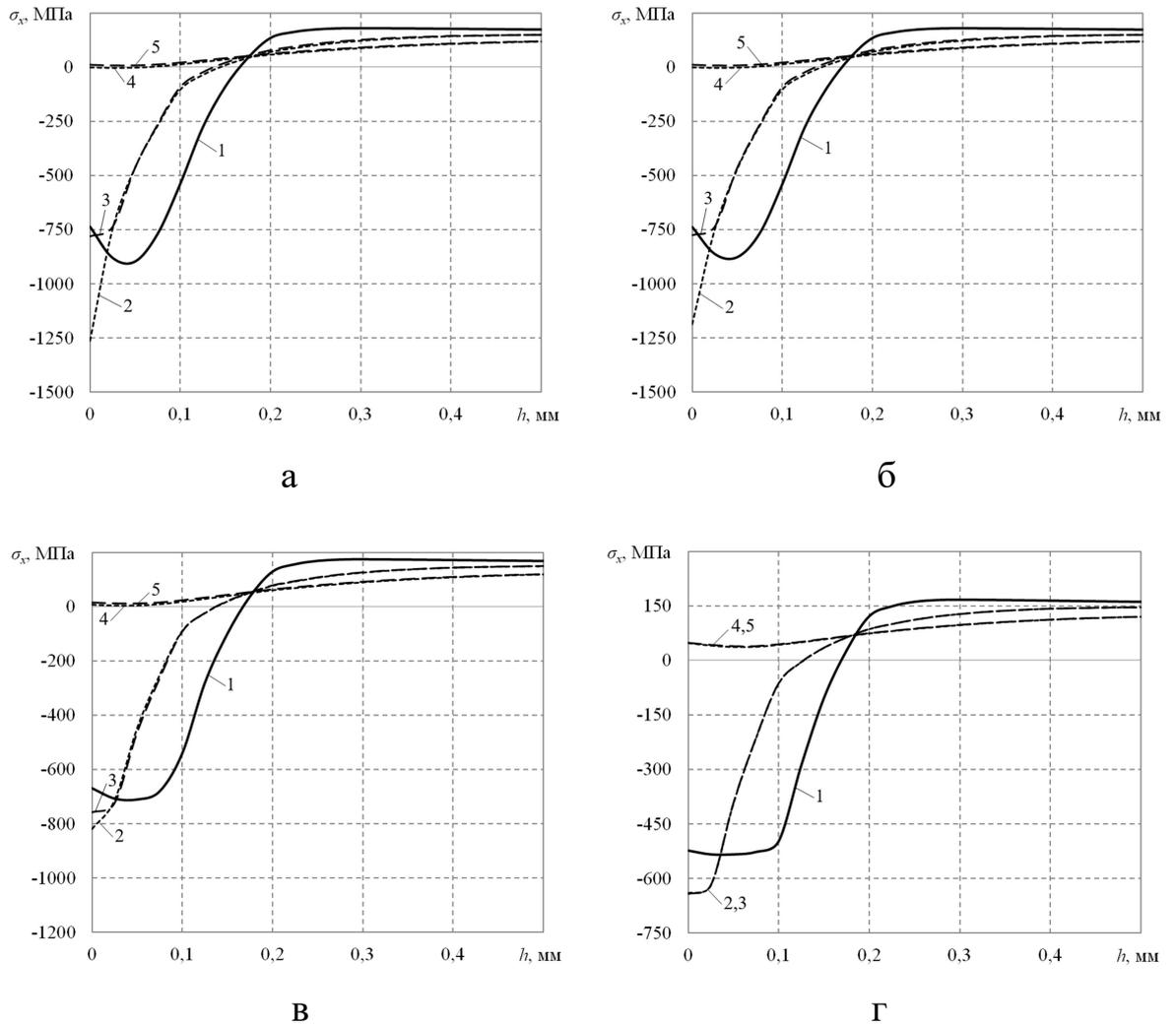


Рис. 4.6. Кинетика остаточных напряжений $\sigma_x(y)$ по глубине h в условиях температурно-силового воздействия при $T = 650$ °С и $q = 90$ Н/мм в различные моменты времени: а – $t = 0$, б – $t = 0,02$ ч, в – $t = 1$ ч, г – $t = 50$ ч. Маркеры: 1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение при $\rho = 0,1$ мм, 3 – упругопластическое решение при $\rho = 0,1$ мм, 4 – упругое решение при $\rho = 0,3$ мм, 5 – упругопластическое решение при $\rho = 0,3$ мм

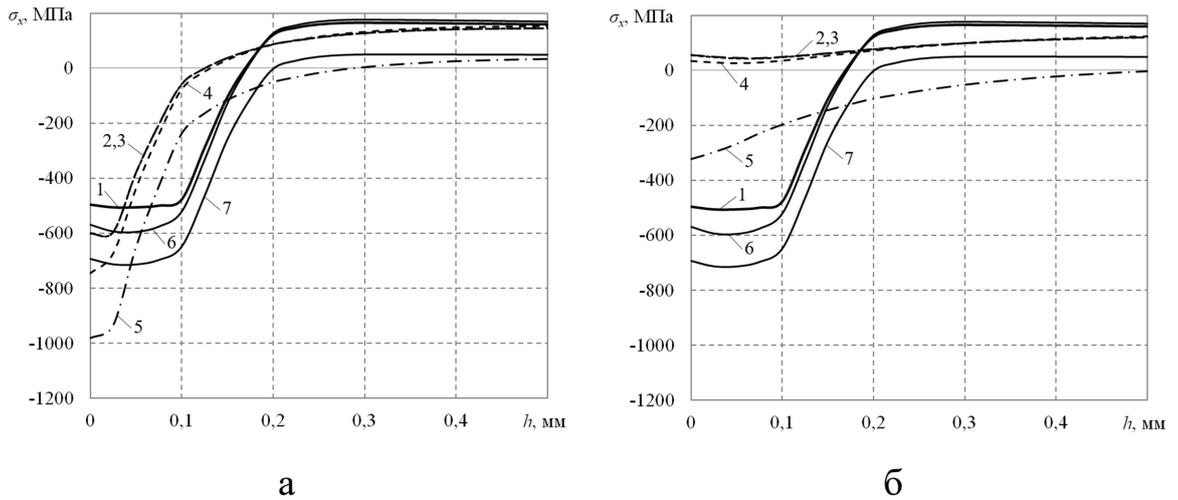


Рис. 4.7. Результат кинетики компоненты $\sigma_x(y)$ по глубине h в условиях температурно-силового воздействия при $T = 650$ °С и $q = 90$ Н/мм в момент времени $t = 100$ ч для образца с надрезом $\rho = 0,1$ мм (а) и $\rho = 0,3$ мм (б).

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

Как и в условиях термоэкспозиции, для температурно-силового нагружения поверхностно упрочнённого образца различие между результатами решения задачи в исходной упругой и упругопластической постановках обосновано наличием малой зоны пластичности глубиной 20–25 мкм от дна надреза. При этом указанная разница справедлива лишь в пределах первого часа ползучести, по истечении которого наблюдается асимптотическое сближение результатов распределения компонент ОН. Примечательно также, что эффективность этой зоны заметно снижается, если линейный размер концентратора напряжений превышает толщину упрочнённого слоя 0,15–0,2 мм.

Из анализа результатов кинетики ОН $\sigma_x = \sigma_x(y)$, приведённых на рис. 4.6 и 4.7, следует, что для рассмотренной расчётной схемы образца с полукруглым надрезом $\rho = 0,3$ мм приложенная равномерно распределённая нагрузка q приво-

дит не только к полному исчезновению в упрочнённом слое наведённых по технологии ОППД остаточных сжимающих напряжений на начальном этапе температурно-силового нагружения, но и способствует последующему появлению напряжений растяжения в этом месте при ползучести. Применительно к расчётному случаю для образца с надрезом $\rho = 0,1$ мм указанная схема нагружения не приводит к вышеописанному явлению, однако за 100 ч температурно-силовой выдержки без температурной и силовой разгрузки (кривые 2 и 3 на рис. 4.7,а) уровень сжимающих ОН для $\sigma_x = \sigma_x(y)$, замеренный в пределах 100 мкм от дна надреза, в соответствии с (2.8) снижается на 73,98% в сопоставлении с исходным НДС при $t = 0$ для упругого решения задачи (кривая 2 на рис. 4.6,а) и снижается на 26,24% для аналогичного решения в упругопластической постановке (кривая 3 на рис. 4.6,а). Для сравнения, в случае такой же оценки результатов кинетики ОН для температурно-силового нагружения гладкого образца по установленному критерию наблюдается снижение исходных остаточных сжимающих напряжений на 68,08%.

Отдельно проводился сравнительный анализ результатов для всех расчётных случаев упрочнённого образца с надрезом по компоненте $\sigma_x = \sigma_x(y)$ между финишными результатами распределения ОН ($t = 100$ ч) в момент мгновенной температурной и силовой разгрузки (с $T_1 = 650$ °С до $T_0 = 20$ °С, $q = 0$) при упругом решении задачи (рис. 4.7) и исходными значениями полей ОН, полученных в упругой и упругопластической постановках в соответствии с технологией ОППД после процедуры упрочнения в начальный момент времени $t = 0$, без силовой нагрузки (рис. 4.3,а). Полученные по вышеописанной схеме исследования результаты релаксации напряжений в пределах 50 мкм от дна концентратора напряжений упрочнённого образца для случая полукруглого надреза радиусом $\rho = 0,1$ мм демонстрируют снижение уровня ОН при упругой постановке задачи на 42%, при упругопластической постановке – на 8,87%. Для расчётного случая образца с надрезом $\rho = 0,3$ мм упругое решение соответствует снижению ОН на 13,18%, упругопластическое – на 9,75%.

Из сопоставления полученных данных распределения ОН по компоненте $\sigma_x = \sigma_x(y)$ для случая температурной разгрузки при термоэкспозиции и для случая полной разгрузки при температурно-силовом нагружении установлено, что в условиях релаксации напряжений за 100 ч ползучести предварительное силовое нагружение упрочнённого гладкого образца и образца с надрезом $\rho = \{0,1; 0,3\}$ мм равномерно распределённой нагрузкой $q = 90$ Н/мм с последующей мгновенной температурно-силовой разгрузкой эффективнее сказывается на значениях финишных ОН, чем без приложения нагрузки (см. рис. 4.8). Наибольшая эффективность отмеченного явления соответствует расчётному случаю упрочнённого образца с полукруглым надрезом $\rho = 0,1$ мм, причём полученные в пределах 50 мкм по глубине от дна концентратора при температурно-силовой разгрузке финишные результаты ОН на 14,77% больше, чем при температурной разгрузке. При этом для случая образца с полукруглым надрезом $\rho = 0,3$ мм указанная разница практически не заметна и составляет 5,48%. В случае гладкого образца сравнение результатов в пределах 100 мкм по глубине от верхней упрочнённой поверхности демонстрирует эффективность на 9,8%.

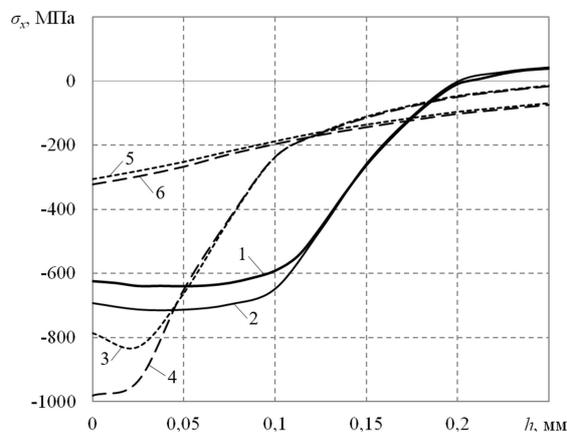


Рис. 4.8. Распределение финишных результатов компоненты $\sigma_x(y)$ после 100 ч ползучести. Маркеры: 1 – разгрузка гладкого образца при термоэкспозиции, 2 – температурно-силовая разгрузка гладкого образца, 3 – разгрузка образца с надрезом $\rho = 0,1$ мм при термоэкспозиции, 4 – температурно-силовая разгрузка образца с надрезом $\rho = 0,1$ мм, 5 – разгрузка образца с надрезом $\rho = 0,3$ мм при термоэкспозиции, 6 – температурно-силовая разгрузка образца с надрезом $\rho = 0,3$ мм

В завершение данного раздела проводилась оценка применимости и проверка адекватности разработанного метода расчёта кинетики ОН в условиях температурно-силового нагружения на примере поверхностно упрочнённого призматического образца $100 \times 10 \times 10$ мм при наличии сквозного поверхностного надреза V-образного профиля (рис. 4.9). Исследование выполнялось для случая надреза глубиной $b = \{0,1; 0,3\}$ мм с начальным углом раскрытия $\varphi = 30^\circ$ и радиусом при вершине $\rho_0 = 0,007$ мм. Величина приложенной равномерно распределённой нагрузки соответствовала $q = 90$ Н/мм.

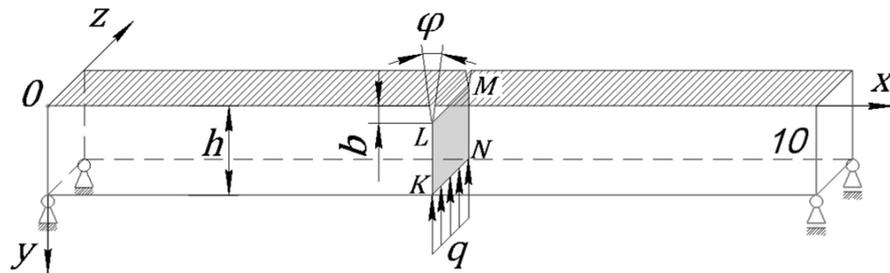


Рис. 4.9. Расчётная схема трёхточечного изгиба упрочнённого образца с V-образным надрезом

Численное решение данной задачи аналогично рассмотренному ранее случаю решения задачи кинетики ОН при температурно-силовом нагружении образца с профильным полукруглым концентратором напряжений, поэтому перейдём к сравнительному анализу полученных результатов. На рис. 4.10 и 4.11 приведены результаты кинетики ОН в различные моменты времени $t = \{0; 0,02; 1; 50; 100\}$ ч. Как и в предыдущем случае, в качестве начальных условий в начальный момент времени $t = 0$ независимо друг от друга задавалось распределение полей ОН для упругой и упругопластической постановок задачи.

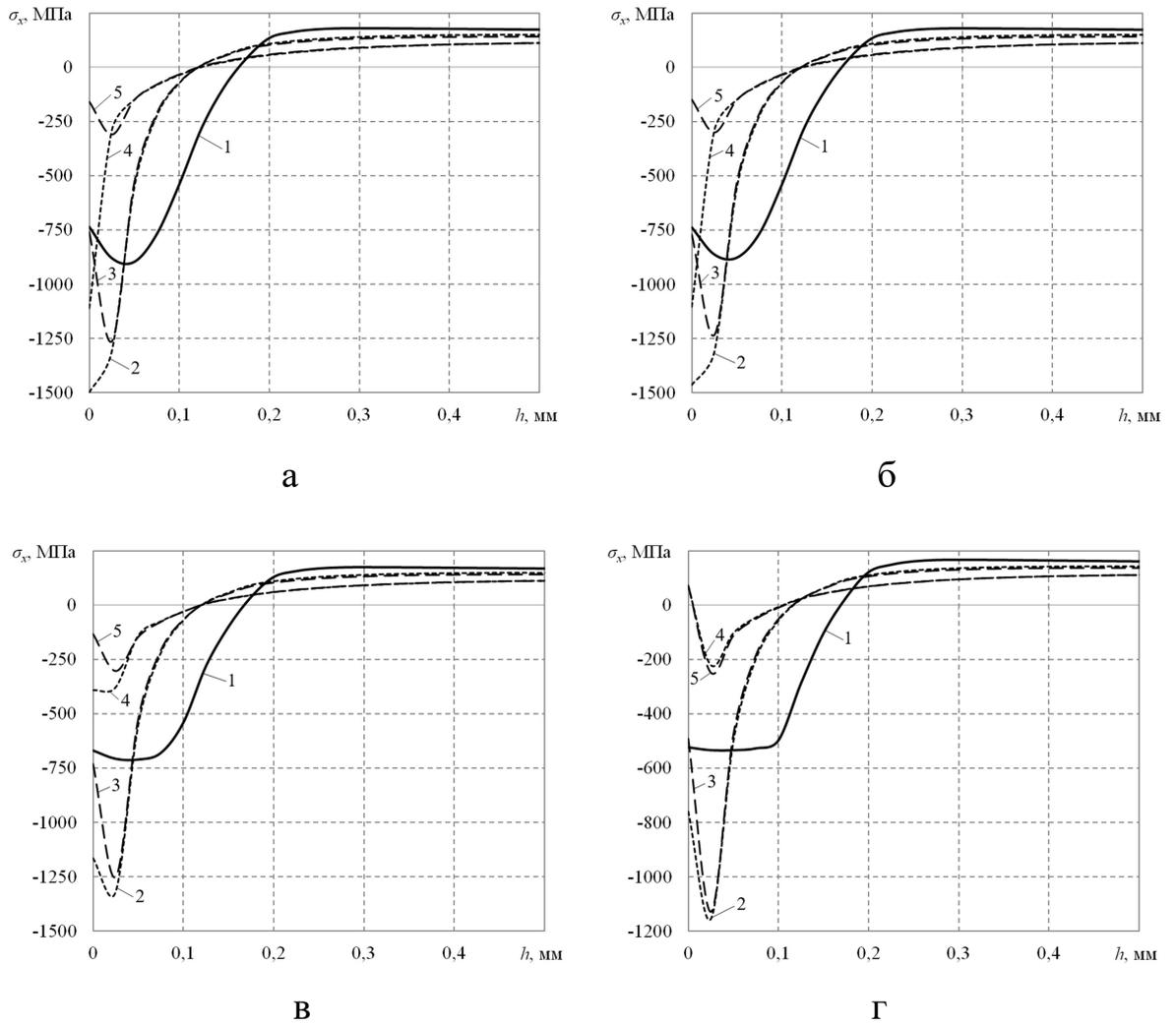


Рис. 4.10. Кинетика компоненты $\sigma_x(y)$ в условиях температурно-силового воздействия при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $q = 90\text{ Н/мм}$ в различные моменты времени: а – $t = 0$, б – $t = 0,02\text{ ч}$, в – $t = 1\text{ ч}$, г – $t = 50\text{ ч}$. Маркеры: 1 – решение для гладкого образца, 2 – упругое решение при $b = 0,1\text{ мм}$, 3 – упругопластическое решение при $b = 0,1\text{ мм}$, 4 – упругое решение при $b = 0,3\text{ мм}$, 5 – упругопластическое решение при $b = 0,3\text{ мм}$

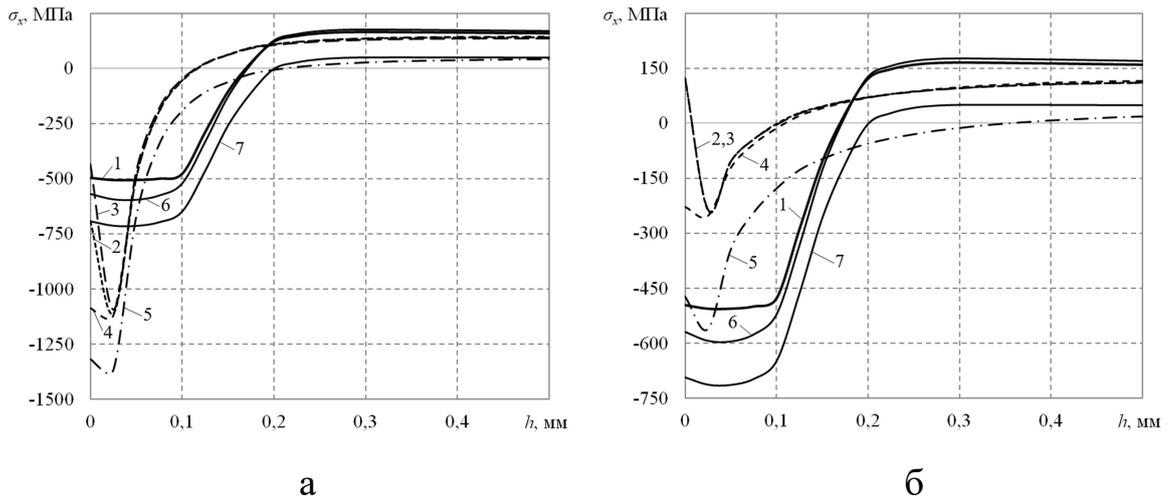


Рис. 4.11. Результат кинетики $\sigma_x(y)$ по глубине h в условиях температурно-силового воздействия при $T = 650$ °С и $q = 90$ Н/мм в момент времени $t = 100$ ч для образца с надрезом $b = 0,1$ мм (а) и $b = 0,3$ мм (б).

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

Из анализа результатов ОН по времени температурно-силовой выдержки при ползучести были получены следующие сведения о релаксации напряжений для рассматриваемого упрочнённого образца с V-образным надрезом в зависимости от конкретно рассматриваемого случая. Если после процедуры поверхностного упрочнения в начальный момент времени $t = 0$ приложена «мгновенная» силовая нагрузка $q = 90$ Н/мм, то за 100 ч выдержки при ползучести без какой-либо разгрузки релаксация изначально наведённых ОН сопровождается их снижением на 59% для упругой постановки задачи и на 29,54% для упругопластического решения в случае надреза $b = 0,1$ мм. Для аналогичного случая образца с V-образным надрезом $b = 0,3$ мм уровень ОН снижается на 426,36% при упругом и на 103,66% при упругопластическом решении задачи. Такие сравнительно

большие значения снижения уровня ОН характеризуются особой чувствительностью призматического образца с V-образным надрезом $b = 0,3$ мм к температурно-силовому воздействию как для упругого, так и для упругопластического расчётных случаев.

Важно также отметить, что в отличие от образца с полукруглым надрезом ρ ожидаемое асимптотическое приближение результатов распределения напряжений между упругим и упругопластическим решениями для образца с V-образным концентратором напряжений наблюдается лишь за время температурно-силовой выдержки при ползучести $t = 50$ ч (см. рис. 4.10,г) и только в случае глубины концентратора $b = 0,3$ мм. Применительно к расчётному случаю для образца с глубиной концентратора $b = 0,1$ мм асимптотического сближения результатов между результатами в указанных постановках задачи (в пределах 25 мкм от дна надреза по глубине) не наблюдается даже за время выдержки $t = 100$ ч при отсутствии температурно-силовой разгрузки (на рис. 4.11,а показаны в виде кривых 2 и 3 для упругого и упругопластического решений соответственно). Оценка расхождения между этими результатами составляет $\Delta_x^\sigma = 22\%$.

4.4. Выводы по главе 4

1. Разработана численная методика и впервые решены задачи расчёта остаточных напряжений в призматическом образце с поперечными одиночными сквозными надрезами полукруглого и V-образного профилей на основе метода конечных элементов и начального напряжённо-деформированного состояния после опережающего поверхностного пластического деформирования в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении по схеме трёхточечного изгиба.
2. Выполнена проверка адекватности численной методики расчёта релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести при термоэкспозиции экспериментальным данным в частном случае гладкого образца из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С и осуществлено сравнение данных расчёта по разработанной КЭ-модели с данными расчёта по методу сеток из независимых публикаций. Наблюдается соответствие расчётных и экспериментальных данных.
3. Исследовано влияние начального напряжённо-деформированного состояния после упрочнения, рассчитанного в упругой и упругопластической постановках, на последующую релаксацию остаточных напряжений вследствие ползучести в области полукруглого и V-образного надрезов при чистой термоэкспозиции и температурно-силовом нагружении для призматического образца из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С. Показано, что учёт пластических деформаций для начального напряжённо-деформированного состояния сказывается на скорости релаксации остаточных напряжений в узкой зоне от 20 до 50 мкм от дна концентратора напряжений и при малых временах ползучести, а затем решения с упругим и упругопластическим начальным напряжённо-деформированным состоянием становятся близкими.
4. Выполнен детальный параметрический анализ влияния глубины и формы одиночного надреза на релаксацию остаточных напряжений в условиях ползучести для призматического образца с учётом температурно-силовой нагрузки и его последующей разгрузки. Приведённые количественные оценки отклонений решений, построенных с учётом упругого и упругопластического состояния после процедуры упрочнения.

Заключение

Сформулируем основные выводы и научные результаты, полученные в рамках настоящей диссертационной работы.

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, базирующийся на конечно-элементном моделировании и известном начальном напряжённо-деформированном состоянии для гладкого упрочнённого призматического образца. Выполнена проверка адекватности численного метода расчёта остаточных напряжений экспериментальным данным в частном случае гладкого поверхностно упрочнённого образца из сплава ЭП742, наблюдается соответствие расчётных и экспериментальных данных.
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 в случае, когда концентратор находится полностью или частично в упрочнённом слое. Установлено, что если глубина поперечного надреза рассмотренных типов не превышает толщины упрочнённого слоя (области сжатия материала), то величина продольной компоненты тензора остаточных напряжений 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 остаточные напряжения в наименьшем сечении детали (по модулю) меньше, чем в гладком образце.

3. Для гладких образцов и образцов с надрезами установлены оптимальные области локального упрочнения поверхности, за границами которых напряжённо-деформированное состояние практически стабилизируется, что даёт инструмент для оптимизации процесса упрочнения поверхности плоской детали при нанесении на неё надрезов технологического назначения.
4. Разработан и реализован метод исследования формирования остаточных напряжений в призматической детали с периодической системой концентраторов напряжений после опережающего поверхностного пластического деформирования.
5. Впервые выполнено исследование влияния угла раскрытия сквозного трещиноподобного дефекта в поверхностно упрочнённом призматическом образце на формирование остаточных напряжений для упругопластической постановки задачи.
6. Разработан не имеющий аналогов численный метод реконструкции остаточных напряжений в призматическом образце с несквозной поперечной трещиной после опережающего поверхностного пластического деформирования.
7. Разработана численная методика и впервые решены задачи расчёта релаксации остаточных напряжений в призматическом образце с поперечными одиночными сквозными надрезами полукруглого и V-образного профилей на основе метода конечных элементов и начального напряжённо-деформированного состояния после опережающего поверхностного пластического деформирования в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении по схеме трёхточечного изгиба. Выполнена проверка адекватности методики расчёта релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести при термоэкспозиции экспериментальным данным в частном случае гладкого образца из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С и осуществлено сравнение данных расчёта по разработанной конечно-элементной модели с

данными расчёта по методу сеток из независимых публикаций. Наблюдается соответствие расчётных и экспериментальных данных.

8. Исследовано влияние начального напряжённо-деформированного состояния после упрочнения, рассчитанного в упругой и упругопластической постановках, на последующую релаксацию остаточных напряжений вследствие ползучести в области полукруглого и V-образного надрезов при чистой термоэкспозиции и температурно-силовом нагружении для призматического образца из сплава ЭП742 при $T = 650$ °С. Показано, что учёт пластических деформаций для начального напряжённо-деформированного состояния сказывается на скорости релаксации остаточных напряжений в узкой зоне от 20 до 50 мкм от дна концентратора напряжений и при малых временах ползучести, а затем решения с упругим и упругопластическим начальным напряжённо-деформированным состоянием становятся близкими.
9. Даны рекомендации по использованию полученных теоретических результатов и данных расчётов в прикладных задачах механики упрочнённых конструкций.

Список литературы

1. Акуличев А. Г., Трофимов В. В. Остаточные напряжения в нитроцементованной стали 20Х3МВФ-ш // ИВД. 2010. №4. С. 163–169.
2. Белова О. Н., Степанова Л. В., Броников С. А. Атомистическое моделирование роста трещины в условиях смешанного нагружения // Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твёрдого тела. 2017. Т. 1. С. 73–76.
3. Биргер И. А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
4. Букатый А. С. Конечно-элементное моделирование и исследование остаточных напряжений и деформаций после дробеструйного упрочнения // Вестн. машиностроения. 2016. № 6. С. 52–57.
5. Буркин С. П., Шимов Г. В., Андрюкова Е. А. Остаточные напряжения в металлопродукции. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015. 248 с.
6. Вакулюк В. С. Исследование влияния толщины упрочнённого слоя на остаточные напряжения во впадине концентратора методом первоначальных деформаций // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2010. № 1 (20). С. 222–225.
7. Вакулюк В. С. Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочнённого слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник СГАУ. 2012. № 3 (34). С. 172–176.
8. Вакулюк В. С., Сазанов В. П., Шадрин В. К. и др. Применение метода термоупругости при конечно-элементном моделировании остаточного напряжённого состояния в поверхностно упрочнённых деталях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. С. 168–174.
9. Васильев Б. Е., Киселёв И. А., Жуков Н. А., Селиванов А. Н. Учёт остаточных напряжений при расчётах прочности элементов замковых соединений. Часть 2. Влияние остаточных напряжений на напряженно-деформированное

- состояние хвостовика лопатки турбины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 12. С. 58–67.
10. Ватульян А. О. К формулировке интегральных уравнений в проблеме идентификации предварительно напряженного состояния // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2006. № 2. С. 23–25.
 11. Ватульян А. О. Обратные задачи в механике деформируемого твердого тела. М.: Физматлит, 2007. 223 с.
 12. Ватульян А. О., Дударев В. В. О некоторых проблемах реконструкции неоднородного предварительно напряженного состояния в упругих телах // Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Математика. Механика. Информатика. 2009. Т. 9. Вып. 4. Ч. 2. С. 25–32.
 13. Вишняков Я. Д., Пискарев В. Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Metallurgy, 1989. 254 с.
 14. Годерзиан К. К. Внутренние напряжения в металлах и сплавах, методы их измерения и устранения. М.: ЦИИНЦМ, 1962. 95 с.
 15. Гринченко И. Г. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1971. 120 с.
 16. Деревянка Е. Е., Радченко В. П., Цветков В. В. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом цилиндре в условиях ползучести при жёстких ограничениях на линейные и угловые деформации // Известия РАН. МТТ. 2021. № 3. С. 118–127.
 17. Добровольский И. В. Влияние концентрации напряжений на сопротивление малоциклового разрушению // Проблемы прочности. 1978. № 9. С. 24–27.
 18. Дояр И. А., Пошивалов В. П. Вариант вероятностной оценки времени до разрушения при ползучести // Техн. механика. 2013. № 2. С. 99–108.
 19. Иванов С. И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. № 53. Куйбышев: КуАИ, 1971. С. 32–42.

20. Иванов С. И. Определение остаточных напряжений в пластинах методом полосок // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. № 48. Куйбышев: КуАИ, 1971. С. 139–152.
21. Иванов С. И., Павлов В. Ф., Минин Б. В. и др. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2015. 170 с.
22. Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев: КуАИ. 1974. № 1. С. 88–95.
23. Каратушин С. И., Спиридонов Д. В., Плешанова Ю. А. Сравнительный анализ расчётных методов определения остаточных напряжений // Металлообработка. 2016. №4 (94). С. 51–56.
24. Келлер И. Э., Трофимов В. Н., Владыкин А. В. и др. К вопросу о реконструкции остаточных напряжений и деформаций пластины после дробеструйной обработки // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2018. Т. 22, № 1. С. 40–64.
25. Киселёв И. А., Жуков Н. А., Васильев Б. Е., Селиванов А. Н. Учёт остаточных напряжений при расчётах прочности элементов замковых соединений. Часть 1. Моделирование дробеструйной обработки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 11. С. 49–59.
26. Колотникова О. В. Эффективность упрочнения методами поверхностного пластического деформирования деталей, работающих при повышенных температурах // Проблемы прочности. 1983. № 2. С. 112–114.
27. Коновалов Д. А., Вичужанин Д. И., Смирнов С. В. Оценка остаточных напряжений методом внедрения индентора // Матем. моделирование и краев. задачи. 2005. № 1. С. 155–157.
28. Королёв А. В., Мазина А. А., Яковишин А. С., Шалунов А. В. Технологические причины возникновения остаточных напряжений // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 5 (8). С. 116–120.

29. Кравченко Б. А., Круцило В. Г., Гутман Г. Н. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин. Самара: СамГТУ, 2000. 216 с.
30. Кравчук В. А. Остаточные сварочные напряжения и деформации при изготовлении металлических конструкций // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Т. 1, № 1. С. 114–119.
31. Кудрявцев И. В. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1969. 100 с.
32. Кудрявцев П. И., Чудновский А. Д. О применении метода поверхностного упрочнения к деталям, работающим в условиях малоцикловых нагрузений // Вестник машиностроения. 1970. № 1. С. 23–27.
33. Куликов Д. В., Мекалова Н. В., Закирничная М. М. Физическая природа разрушения. Уфа: Уфим. гос. нефтяной ун-т, 1999. 395 с.
34. Лебедев В. А., Чумак И. В. Кинетическая модель упрочнения поверхностного слоя деталей виброударными методами ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 7. С. 3–8.
35. Лиманова Л. В. Расчёт тепловых и механических полей при термопластическом упрочнении пластины с двумя цилиндрическими отверстиями с учётом зависимости свойств материала от температуры // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 1999. № 7. С. 63–70.
36. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев: Техника, 1971. 143 с.
37. Матлин М. М., Мосейко В. О., Мосейко В. В. Механика силового контактного взаимодействия дроби с поверхностью упрочняемой детали // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 10. С. 45–52.
38. Махутов Н. А., Гринь Е. А., Саркисян В. А. Кинетика развития трещин в энергомашиностроительных сталях при высокотемпературной ползучести //

- Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, № 11. С. 44–52.
39. Морозов А. П. Исследование характеристик поверхностного слоя алюминия В95 и Д16Т после пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции // Сборник тезисов XIX международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов. 2015. С. 227.
40. Ножницкий Ю. А., Фишгойт А. В., Ткаченко Р. И., Теплова С. В. Разработка и применение новых методов упрочнения деталей ГТД, основанных на пластическом деформировании поверхностных слоёв // Вестн. двигателестроения. 2006. № 2. С. 8–16.
41. Носова Е. А. Исследование влияния деформации и термической обработки на уровень остаточных макронапряжений и физического уширения линий интерференции рентгеновских лучей в листовых сплавах АМг5, АМг6, АМг10 и Д16 // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2017. № 3 (55). С. 168–178.
42. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
43. Павлов В. Ф., Букатый А. С., Семёнова О. Ю. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений // Вестн. машиностроения. 2019. № 1. С. 3–7.
44. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Вакулук В. С. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых образцов с концентраторами напряжений. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королёва, 2011. 125 с.
45. Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Вакулук В. С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. Самара: СНЦ РАН, 2012. 125 с.
46. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. Самара: Изд-во СНЦ, 2008. 64 с.

47. Павлов В. Ф., Сазанов В. П., Вакулюк В. С., Шадрин В. К. Применение первоначальных деформаций в исследованиях остаточного напряжённо-деформированного состояния упрочненных деталей // Насосы. Турбины. Системы. 2019. № 1 (30). С. 76–81.
48. Павлов В. Ф., Столяров А. К., Вакулюк В. С., Кирпичёв В. А. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. Самара: СНЦ РАН, 2008. 124 с.
49. Пат. 2310183 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/00. Способ определения остаточных напряжений / Бякова А. В., Мильман Ю. В., Власов А. А. и др.; заявитель и патентообладатель Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича Нац. акад. наук Украины, № 2005139811/28; заявл. 21.12.2005; опубл. 10.11.2007. 3 с.
50. Пашков Ю. И., Иванов М. А., Губайдулин Р. Г. Остаточные сварочные напряжения и пути снижения стресс-коррозионных разрушений магистральных газопроводов // Вестник ЮУрГУ. 2012. № 15. С. 28–30.
51. Плихунов В. В. Численное моделирование осесимметричной задачи одиночного удара дробинки с учетом физико-механических свойств поведения металлов // Авиационная промышленность. 2008. № 4. С. 24–28.
52. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
53. Радаев Ю. Н. О влиянии удалённой пластической зоны на раскрытие трещины нормального отрыва // Проблемы механики деформируемых тел и горных пород, посв. 70-летию проф. Л. В. Ершова. 2001. С. 251–262.
54. Радаев Ю. Н., Степанова Л. В., О влиянии удаленной локализованной пластической зоны на раскрытие трещины нормального отрыва // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 1999. № 7. С. 70–85.
55. Радченко В. П., Афанасьева О. С., Глебов В. Е. Влияние технологии поверхностного пластического упрочнения, остаточных напряжений и граничных условий на выпучивание балки // Вестн. Перм. нац. иссл. политехн. ун-та. Механика. 2020. № 1. С. 87–98.

56. Радченко В. П., Афанасьева О. С., Глебов В. Е. Исследование влияния остаточных напряжений на геометрические параметры поверхностно упрочнённого бруса // Изв. Саратов. ун-та. Нов. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2019. Т. 19, № 4. С. 464–478.
57. 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.
58. Радченко В. П., Бочкова Т. И., Цветков В. В. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом полупространстве в условиях ползучести // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2015. Т. 19, № 3. С. 504–522.
59. Радченко В. П., Еремин Ю. А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. М.: Машиностроение-1, 2004. 265 с.
60. Радченко В. П., Кирпичёв В. А., Лунин В. А. Влияние пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на остаточные напряжения и предел выносливости образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки, 2011. № 3 (24). С. 181–184.
61. Радченко В. П., Кирпичёв В. А., Лунин В. А. Влияние термоэкспозиции на остаточные напряжения образцов из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения // Вест. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2012. № 3 (35). С. 147–154.
62. Радченко В. П., Кирпичёв В. А., Лунин В. В. Влияние обкатки роликом на остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов из стали 40ХН // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. 2013. № 1. С. 142–150.
63. Радченко В. П., Кочеров Е. П., Саушкин М. Н., Смыслов В. А., Экспериментальное и теоретическое исследование влияния растягивающей нагрузки на

- релаксацию остаточных напряжений в упрочнённом цилиндрическом образце в условиях ползучести // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 1. С. 169–177.
64. Радченко В. П., Куров А. Ю. Влияние анизотропии поверхностного пластического упрочнения на формирование остаточных напряжений в цилиндрических деталях с надрезами полукруглого профиля // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2016. Т. 20, № 4. С. 675–690.
65. Радченко В. П., Либерман А. Е., Рузов А. В. Исследование влияния пространственно-временной неоднородности деформации ползучести на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно-упрочнённом полом цилиндра из сплава Д16Т // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2018. № 1 (57). С. 149–163.
66. Радченко В. П., Морозов А. П. Экспериментальное исследование влияния пневмодробеструйной обработки, температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний на физико-механическое состояние упрочнённого слоя цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2010. № 5 (21). С. 222–228.
67. Радченко В. П., Морозов А. П., Саушкин М. Н. Стохастическая модель для расчета остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом цилиндре в условиях ползучести // Вестник ПНИПУ. Механика. 2017. № 1. С. 181–207.
68. Радченко В. П., Павлов В. Ф., Саушкин М. Н. Исследование влияния анизотропии поверхностного пластического упрочнения на распределение остаточных напряжений в полых и сплошных цилиндрических образцах // Вестн. ПНИПУ. Механика. 2015. № 1. С. 130–147.
69. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Математические модели восстановления и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических элементов конструкций при ползучести // Извест. вузов. Машиностроение. 2004. № 11. С. 3–17.

70. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях. М.: Машиностроение-1, 2005. 226 с.
71. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Прямой метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочненном изделии цилиндрической формы при ползучести // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 6. С. 90–99.
72. Радченко В. П., Саушкин М. Н., Бербасова Т. И. Кинетика напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненных призматических образцах в условиях ползучести // Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела. 2017. Т. 2. С. 173–176.
73. Радченко В. П., Саушкин М. Н., Бочкова Т. И. Математическое моделирование и экспериментальное исследование формирования и релаксации остаточных напряжений в плоских образцах из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения в условиях высокотемпературной ползучести // Вестн. Перм. нац. иссл. политехн. ун-та. Механика. 2016. № 1. С. 93–112.
74. Радченко В. П., Цветков В. В. Кинетика напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочненном цилиндрическом образце при сложном напряженном состоянии в условиях ползучести // Вестник Сам. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2014. № 1 (34). С. 93–108.
75. Радченко В. П., Цветков В. В. Напряжённо-деформированное состояние цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения и кручения при ползучести // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2013. № 3 (32). С. 77–86.
76. Радченко В. П., Цветков В. В., Саушкин М. Н. Релаксация остаточных напряжений в упрочненном цилиндре в условиях ползучести при нагружении осевой силой, крутящим моментом и внутренним давлением // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 4. С. 96–107.
77. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Влияние надреза полукруглого профиля на напряжённо-деформированное состояние поверхностно-упрочнённой балки

// Математическое моделирование в естественных науках. Пермь: ПНИПУ, 2020. С. 100.

78. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Влияние размеров области поверхностного упрочнения на напряженно-деформированное состояние балки с надрезом полукруглого профиля // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2020. Т. 24, № 4. С. 663–676.
79. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Метод расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённой балке с надрезами в упругой и упругопластической постановках // XXII Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2021. С. 268.
80. 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.
81. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Методика реконструкции остаточных напряжений в надрезах балочных элементов после опережающего поверхностного пластического упрочнения // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике. Новосибирск: Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, 2020. С. 219.
82. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Параметрический анализ влияния геометрических характеристик концентратора напряжений на напряжённo-деформированное состояние в поверхностно упрочнённой призматической балке // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Т. 2. Самара: Самарский университет, 2021. С. 348–349.
83. Радченко В. П., Шишкин Д. М. Повышение прочности призматического образца с надрезами профильной формы после процедуры опережающего поверхностного пластического деформирования // Тезисы докладов XII областной научно-практической конференции молодых специалистов, студен-

- тов и школьников «Будущее города – в профессионализме молодых». Самара: «Вектор», 2021. С. 83–84.
84. 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, № 3.
85. Радченко В. П., Шишкин Д. М., Глушков С. В. Влияние периодически повторяющихся концентраторов напряжений на величину остаточных напряжений в поверхностном упрочнённом слое балки // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. 2021. С. 1031–1037.
86. Рожков И. И., Мыльников В. В. Расчёт внутренних остаточных напряжений, возникающих в закалённых деталях машин после химико-термической обработки // Международный журнал экспериментального образования. 2014. № 1. С. 114–118.
87. Сазанов В. П. Исследование закономерностей остановки усталостной трещины в цилиндрическом образце с надрезом // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 160–169.
88. Сазанов В. П., Кирпичёв В. А., Вакулюк В. С., Павлов В. Ф. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN // Вестн. УГАТУ. 2015. Т. 19, № 2. С. 35–40.
89. Сазанов В. П., Павлов В. Ф., Семёнова О. Ю., Прохоров А. А. Оценка эффективности упрочняющей обработки цилиндрических деталей из конструкционных сталей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 164–173.
90. Сараев Ю. Н., Голиков Н. И., Сидоров М. М. и др. Влияние энергетических параметров режимов сварки на распределение остаточных напряжений в

- зоне неразъёмного соединения // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5, № 3. С. 30–35.
91. Саушкин М. Н., Кирпичёв В. А., Афанасьева О. С., Иванов Д. В. Расчётно-экспериментальное исследование устойчивости остаточных напряжений в упрочнённом слое цилиндрического изделия к температурным нагрузкам // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2009. №1 (18). С. 101–113.
92. Саушкин М. Н., Куров А. Ю. Анализ напряженного состояния в надрезах полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования сплошных цилиндрических образцов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2012. № 1 (26). С. 133–140.
93. Серебряков В. И. Формирование остаточных напряжений при единичном ударе // Проблемы повышения качества, надёжности и долговечности деталей машин и инструментов. Брянск: Брянск. ин-т трансп. машиностр., 1992. С. 68–72.
94. Соколов И. А., Уральский В. И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Металлургия, 1981. 96 с.
95. Степанова Л. В. Влияние высших приближений в асимптотическом разложении М. Уильямса на описание поля напряжений в окрестности вершины трещины в изотропном линейно упругом материале // Материалы X Всероссийской конференции по механике деформируемого твёрдого тела. 2017. Т. 2. С. 222–225.
96. Сулима А. М., Шувалов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
97. Сургутанов Н. А. Исследование влияния глубины трещины на коэффициент интенсивности напряжений в надрезанных и гладких пластинах // Вестник Самарского университета. Серия: Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 1. С. 176–185.

98. Цейтлин В. И., Колотникова О. В. Релаксация остаточных напряжений в деталях турбин ГТД в процессе эксплуатации // Проблемы прочности. 1980. №3. С. 6–11.
99. Шишкин Д. М. Влияние пластического течения вблизи концентратора напряжений в поверхностно упрочнённой призматической балке на величину остаточных напряжений при высокотемпературной ползучести // Молодёжная наука: вызовы и перспективы. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. 2021
100. Шишкин Д. М. Исследование напряжённо-деформированного состояния упрочнённой балки с периодически повторяющимися концентраторами // Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Прикладная математика и информатика. 2020. С. 180–182.
101. Шульженко Н. Г., Панасенко С. И. Оценка роста трещины при ползучести пластинчатых элементов по параметрам рассеянных повреждений // Пробл. машиностроения. 2012. Т. 15, № 2. С. 23–31.
102. Aurrekoetxea M., Lacalle L., Llanos I. Machining Stresses and Initial Geometry on Bulk Residual Stresses Characterization by On-Machine Layer Removal // Materials. 2020. Vol. 13. Pp. 1445–1459.
103. Bag A., Lévesque M., Brochu M. Effect of shot peening on short crack propagation in 300M steel // International Journal of Fatigue. 2019. Vol. 131. Pp. 105346-1–105346-9.
104. Benedetti M., Fontanari V., Allahkarami M. et al. Modelling the Residual Stress Field Ahead of the Notch Root in Shot Peened V-Notched Samples // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. 2016. Vol. 9. Pp. 249–261.
105. Bijak-Zochowski M. Investigation of the distribution of residual stress inside the material by penetration method // Proceedings of Fifth International Congress on Experimental Mechanics. 1984. Pp. 63–70.

106. Brockman R., Braisted W., Olson S. et al. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening // *Intern. J. Fatigue*. 2012. Vol. 36, no. 1. Pp. 96–108.
107. Buchanan D. J., John R. Relaxation of shot – peened residual stresses under creep loading // *Scripta Materialia*. 2008. No 3. Pp. 286–289.
108. Chen H., Wang S., Lu S. et al. Simulation and experimental validation of residual stress and surface roughness of high manganese steel after shot peening // *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 71. Pp. 227–231.
109. Dai K., Shaw L. Analysis of fatigue resistance improvements via surface severe plastic deformation // *Intern. J. Fatigue*. 2008. Vol. 30, no. 8. Pp. 1398–1408.
110. Davis J., Ramulu M. A study of the residual stress induced by shot peening for an isotropic material based on Prager's yield criterion for combined stresses // *Meccanica*. 2015. Vol. 50, no 6. Pp. 1593–1604.
111. Doremus L., Cormier J., Villechaise P. et al. Influence of residual stresses on the fatigue crack growth from surface anomalies in a nickel-based superalloy // *Mater. Sci. Eng. A*. 2015. Vol. 644. Pp. 234–246.
112. Estrada Rodas E. A., Neu R. W. Crystal viscoplasticity model for the creep-fatigue interactions in single-crystal Ni-base superalloy CMSX-8 // *International Journal of Plasticity*. 2018. Vol. 100. Pp. 14–33.
113. Fleury R. M. N., Nowell D. Evaluating the influence of residual stresses and surface damage on fatigue life of nickel superalloys // *Intern. J. Fatigue*. 2017. Vol. 105. Pp. 27–33.
114. Foss B. J., Gray S., Hardy M. C. et al. Analysis of shot-peening and residual stress relaxation in the nickel-based superalloy RR1000 // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61, no. 7. Pp. 2548–2559.
115. Franchim A., de Campos V., Travessa D., de Moura Neto C. Analytical modeling for residual stresses produced by shot peening // *Materials and Design*. 2009. Vol. 30, no. 5. Pp. 1556–1560.

116. Gallitelli D., Boyer V., Gelineau M. et al. Simulation of shot peening: From process parameters to residual stress fields in a structure // *Comptes Rendus Mécanique*. 2016. Vol. 344, no. 4–5. Pp. 355–374.
117. Gourdin S., Cormier J., Henaff G. et al. Assessment of specific contribution of residual stress generated near surface anomalies in the high temperature fatigue life of a Rene 65 superalloy // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2016. Vol. 40, no. 1. Pp. 69–80.
118. Hadadian A., Sedaghati R. Investigation on thermal relaxation of residual stresses induced in deep cold rolling of Ti–6Al–4V alloy // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 100 (1). Pp. 877–893.
119. Han J., Sohn D., Woo W., Kim, D. Molecular dynamics study of fracture toughness and trans-intergranular transition in bi-crystalline grapheme // *Computational Materials Science*. 2017. Vol. 129. Pp. 323–331.
120. HCF 2015 Annual Report https://www.uat2.hcf.com.au/pdf/about-us/HCF_annualReport.pdf
121. Hello G., Tahar M., Roelandt J. Analytical determination of coefficients in crack-tip stress expansions for a finite in an infinite plane medium // *International Journal of Solids and Structures*. 2012. Vol. 49, no. 3–4. Pp. 556–566.
122. Henriksen E. K. Residual Stresses in Machined Surfaces // *American Society of Mechanical Engineers*. 1951. Vol. 73, no. 1. Pp. 69–76.
123. Hoffmann J., Scholtes B., Vohringer O. et al. Thermal relaxation of shot peening residual stresses in the differently heat treated plain carbon steel Ck 45 // *Shot Peening: Sci., Technol., Appl.: Pap. 3 Int. Conf. – Oberwisel et al.* 1987. Pp. 360–367.
124. Isa M. R., Sulaiman S., Zaroog O. S. Experimental and Simulation Method of Introducing Compressive Residual Stress in ASTM A516 Grade 70 Steel // *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 803. Pp. 27–31.
125. James M. N., Hughes D. J., Chen Z. et al. Residual stresses and fatigue performance // *Eng. Fail. Analysis*. 2007. Vol. 14, no. 2. Pp. 384–395.

126. Jebahi M., Gakwaya A., Levesque J. et al. Robust methodology to simulate real shot peening process using discrete-continuum coupling method // *Int. J. Mech. Sci.* 2016. Vol. 107. P. 21–33.
127. Kadirgama K., Mohamad B., Mustafizur M., Abu R. Modeling of Residual Stresses // *Finite Element Analysis – From Biomedical Applications to Industrial Developments*. 2012. Pp. 369–378.
128. Khadraoui M., Cao W., Castex L., Gu'edou J. Y. Experimental investigations and modelling of relaxation behaviour of shot peening residual stresses at high temperature for nickel base superalloys // *Mater. Sci. Technol.* 1997. Vol. 13, no. 4. Pp. 360–367.
129. Kim J.-C., Cheong S.-K., Noguchi H. Proposed fatigue damage measurement parameter for shot-peened carbon steel based on fatigue crack growth behavior // *International Journal of Fatigue*. 2015. Vol. 74. Pp. 97–106.
130. Klotz T., Delbergue D., Bocher P. et al. Surface characteristics and fatigue behavior of shot peened Inconel 718 // *International Journal of Fatigue*. 2018. Vol. 110. Pp. 10–21.
131. Li J., Wang S. Distortion caused by residual stresses in machining aeronautical aluminum alloy parts: recent advances // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 89. Pp. 997–1012.
132. Liu C. R., Barash M. M. Variables Governing Patterns of Mechanical Residual Stress in a Machined Surface // *Journal of Engineering for Industry*. 1982. Vol. 104, no. 3. Pp. 257–264.
133. Liu X., Liu J., Zuo Z., Zhang H. Effects of Shot Peening on Fretting Fatigue Crack Initiation Behavior // *Materials*. 2019. Vol. 12, no. 5. Pp. 743-1–743-16.
134. Majzoobi G. H., Azadikhah K., Nemati J. The effects of deep rolling an shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6 // *Mater. Sci. Eng. A*. 2009. Vol. 516, no 1–2. Pp. 235–247.
135. Maleki E., Farrahi G. H., Reza Kashyzadeh K. et al. Effects of Conventional and Severe Shot Peening on Residual Stress and Fatigue Strength of Steel AISI 1060

- and Residual Stress Relaxation Due to Fatigue Loading: Experimental and Numerical Simulation // *Metals and Materials International*. 2020. Vol. 27. Pp. 2575–2591.
136. Masoudi S., Amini S., Saeidi E., Eslami-Chalander H. Effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 76. Pp. 597–608.
137. Meguid S. A., Maricic L. A. Finite Element Modeling of Shot Peening Residual Stress Relaxation in Turbine Disk Assemblies // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2015. Vol. 137 (3). Pp. 031003-1–031003-8.
138. Musinski W.D., McDowell D.L. On the eigenstrain application of shot peened residual stresses within a crystal plasticity framework: Application to Ni-base superalloy specimens // *Int. J. Mech. Sci.* 2015. Vol. 100. Pp. 195–208.
139. Okushima K., Kakino Y., Residual Stress Produced by Metal Cutting // *CIRP Annals*. 1971. Vol. 20, no. 1. Pp. 13–14.
140. Quang T., Pham, Win K., Butler D. New approach to estimate coverage parameter in 3D FEM shot peening simulation // *Surface Engineering*. 2017. Vol. 33 (9). Pp. 1–9.
141. Radayev Y. N. On the Crack Opening Displacement in a Cracked Sheet After a Loading-Unloading Cycle // *Proc. 3rd International Conference on Nonlinear Mechanics*. 1998. Pp. 347–352.
142. Radayev Y. N., Stepanova L. V. The effect of residual stress field induced by cyclic loading on crack initiation in a cracked sheet // *Fatigue '99: Proceedings of the Seventh International Fatigue Congress*. 1999. Pp. 1231–1239.
143. Sherafatnia K., Farrahi G. H., Mahmoudi A. H., Ghasemi A. Experimental measurement and analytical determination of shot peening residual stresses considering friction and real unloading behavior // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 657, no 7. Pp. 309–321.
144. Soady K. A. Life assessment methodologies incorporating shot peening process effects: mechanistic consideration of residual stresses and strain hardening.

- Part 1 – Effect of shot peening on fatigue resistance // *Mater. Sci. Technol.* 2013. Vol. 29, no 6. Pp. 673–651.
145. Song X. M., Wang G. Z., Xuan F. N., Tu S. T. Investigation of residual stress effects on creep crack initiation and growth using local out-of-plane compression // *Engineering Fracture Mechanics.* 2015. Vol. 149. Pp. 45–57.
146. Soyama H. Comparison between Shot Peening, Cavitation Peening, and Laser Peening by Observation of Crack Initiation and Crack Growth in Stainless Steel // *Metals.* 2019. Vol. 10, no. 1. Pp. 63-1–63-17.
147. Stepanova L. V., Roslyakov P. S. Multi-parameter description of the crack-tip stress field: Analytic determination of coefficients of crack-tip stress expansions in the vicinity of the crack tips of two finite cracks in an infinite plane medium // *International Journal of Solids and Structures.* 2016. Vol. 100-101. Pp. 11–28.
148. Takahashi K., Iwanaka K., Koike H. Increased fatigue strength of partially stabilised zirconia achieved by shot peening // *Materials Science and Technology.* 2016. No. 33(5). Pp. 623–628.
149. Terres M. A., Laalai N., Sidhom H. Effect of nitriding and shot-peening on the fatigue behavior of 42CrMo4 steel: Experimental analysis and predictive approach // *Mater. Design.* 2012. Vol. 35. Pp. 741–748.
150. Vacchieri E., Holdsworth S. R., Poggio, E., Villari, P. Service-like TMF tests for the validation and assessment of a creep-fatigue life procedure developed for GT blades and vanes // *International Journal of Fatigue.* 2016. Vol. 99, no. 12. Pp. 216–224.
151. Wang Y., Yuan L., Zhang S. et al. The influence of combined gradient structure with residual stress on crack-growth behavior in medium carbon steel // *Engineering Fracture Mechanics.* 2019. Vol. 209. Pp. 369–381.
152. Xie L., Wang Ch., Wang L. et al. Numerical analysis and experimental validation on residual stress distribution of titanium matrix composite after shot peening treatment // *Mech. Mat.* 2016. Vol. 99. Pp. 2–8.

153. Yi M., Noh S., Lee D. et al. Direct measurements, numerical predictions and simple formula estimations of welding-induced biaxial residual stresses in a full-scale steel stiffened plate structure // *Structures*. 2021. Vol. 29. Pp. 2094–2105.
154. You C., Achintha M., He B., Reed P. A numerical study of the effects of shot peening on the short crack growth behaviour in notched geometries under bending fatigue tests // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 103. Pp. 99–111.
155. You C., Achintha M., Soady K. A. et al. Low cycle fatigue life prediction in shot-peened components of different geometries-part I: residual stress relaxation // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2016. Vol. 40, no. 5. Pp. 761–775.
156. You C., Achintha M., Soady K., Reed P. Low cycle fatigue life prediction in shot-peened components of different geometries – part II: life prediction // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2016. No. 40 (5). Pp. 749–760.
157. Zhao X., Sun Z., Xu D., Liu Y. Local Fatigue Strength Evaluation of Shot Peened 40Cr Notched Steel // *Metals*. 2018. Vol. 8, no. 9. Pp. 681-1–681-14.
158. Zimmermann M., Klemenz M., Schulze V. Literature review on shot peening simulation // *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*. 2010. Vol. 3, no. 4. Pp. 289–310.

Приложение А

Акт о внедрении результатов работы в учебном процессе

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», д. п. н.
О. В. Юсупова
2021 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Д.М. Шишкина «Методы расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях реологического деформирования», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, в учебном процессе Самарского государственного технического университета.

Комиссия в составе начальника учебного управления университета к.э.н., доцента Е.А. Алонцевой, заведующего кафедрой «Прикладная математика и информатика» д.ф.-м.н., профессора В.П. Радченко и председателя методического совета Института автоматики и информационных технологий к.п.н. Я. Г. Стельмах составила настоящий акт о том, что в учебном процессе Самарского государственного технического университета использованы следующие результаты кандидатской диссертации Д. М. Шишкина «Методы расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях реологического деформирования».

1. Теоретические и экспериментальные результаты, полученные на основе методов реконструкции остаточных напряжений и пластических деформаций в призматических деталях с концентраторами напряжений после опережающего поверхностно пластического деформирования, полученные решением задач в упругой и упругопластической постановках, используются в лекционных курсах для бакалавров 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».

2. Теоретические и экспериментальные результаты, полученные на основе метода решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочненном слое призматических деталей с концентраторами напряжений в условиях неупругого реологического деформирования, используются в лекционных курсах для бакалавров 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».

Начальник УУ СамГТУ
к.э.н., доцент

Зав. кафедрой ПМИИ
д.ф.-м.н., профессор

Председатель МС ИАИТ
к.п.н.

Е. А. Алонцева

В. П. Радченко

Я. Г. Стельмах

Приложение Б

Акт о внедрении результатов работы на предприятии


 УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный конструктор
 ПАО «ОДК Кузнецов»
 кандидат технических наук
 Чупин П.В.
 «20» Октября 2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Шишкина Дмитрия Михайловича «Методы расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях реологического деформирования»

Мы, представители публичного акционерного общества «ОДК Кузнецов» - эксперт Кочеров Е.П. и ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) – заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» Радченко В.П. и начальник управления научных исследований Давыдов А.Н. составили акт о том, что:

1) феноменологические методы реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций для призматических элементов конструкций с концентраторами напряжений в виде сквозных надрезов полукруглого, квадратного, *V*-образного, полуэллиптического сечений и трещиновидных дефектов (царапины) различного угла раскрытия в упругой и упругопластической постановке задачи;

2) методы расчёта релаксации остаточных напряжений в призматических поверхностно упрочнённых деталях с концентраторами напряжений в условиях ползучести при термоэкспозиции и температурно-силовом нагружении;

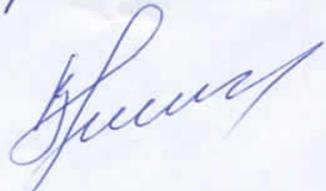
3) результаты теоретических и экспериментальных исследований по влиянию геометрических размеров и формы одиночных и периодически повторяющихся концентраторов, величины зоны упрочнения, угла раскрытия трещиноподобного дефекта на формирование остаточных напряжений в призматических деталях из сплава ЭП 742 после опережающего поверхностного пластического деформирования и их релаксацию в условиях ползучести при $T = 650^{\circ}\text{C}$ при термоэкспозиции и температурно силовом нагружении

внедрены в расчетную практику в отделе прочности ОКБ ПАО «ОДК Кузнецов».

Эксперт ПАО «ОДК Кузнецов»
кандидат технических наук

 Е. П. Кочеров

зав. кафедрой «Прикладная
Математика и информатика»
ФГБОУ ВО СамГТУ,
д.ф.-м.н., профессор

 В. П. Радченко

Начальник управления
Научных исследований
ФГБОУ ВО СамГТУ,
к.т.н., доцент

 А. Н. Давыдов