

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИМСС УрО РАН

академик РАН

В.П. Матвеенко
2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРАЛЬСКОГО
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» — ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ЦЕНТРА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
("ИМСС УРО РАН")

о диссертационной работе Шишкина Дмитрия Михайловича
«Методы расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых
призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях
реологического деформирования», представленной на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности
1.1.8 – механика деформируемого твердого тела

1. Актуальность проблемы.

Прогнозирование живучести деталей авиационных двигателей с учетом возможного возникновения поверхностных повреждений посторонними предметами в ходе эксплуатации является актуальной задачей, решение которой необходимо для проектирования изделий с заданными показателями усталостного ресурса. Целью работы являлось создание метода расчета остаточных напряжений призматического образца с концентраторами напряжений различной формы и размера, моделирующими повреждения, с учетом поверхностного слоя пластических деформаций для возможности назначения его необходимой глубины, при которой повреждения полностью не снимают сжимающих остаточных напряжений в области концентратора. В методе также учитывается перераспределение необратимых деформаций в образце и релаксация поверхностных остаточных напряжений вследствие высокотемпературной ползучести, имеющей место в горячих ступенях авиационного двигателя.

2. Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 158 наименований и двух приложений, содержит 169 страниц текста с 66 рисунками. По структуре и оформлению диссертация и автореферат диссертации соответствуют установленным требованиям.

Во *введении* сформулированы актуальность проблемы, цель, задачи и методы исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, подтверждение их достоверности и внедрение, апробация и опубликованность, личный вклад соискателя и благодарности.

В *первой главе* дается обзор технологических процессов, создающих поверхностный слой сжимающих остаточных напряжений в деталях машин, расчетно-экспериментальных методов реконструкции напряженно-деформированного состояния в образцах разрушающими методами, методов расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных элементах конструкций в условиях ползучести, методов оценки усталостной прочности деталей с поверхностными остаточными напряжениями. Формулируются задачи, которые необходимо решить в рамках разработки метода расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях реологического деформирования.

Во *второй главе* излагается метод внедрения в конечноэлементную модель поверхностных остаточных напряжений, который последовательно применяется к призматическому телу с гладкой границей и с нанесенными сквозными поперечными надрезами кругового, квадратного и треугольного профилей. Выполнен параметрический анализ влияния геометрических размеров и формы надрезов, их количества и величины зоны поверхностного упрочнения на характер напряженно-деформированного состояния в области концентрации напряжений, на основе которого сформулированы рекомендации о необходимой глубине и ширине упрочненной зоны в зависимости от формы и размеров надреза. Во всех случаях речь идет о концентрации сжимающих остаточных напряжений вдоль длины образца, не представляющей опасности с точки зрения трещинообразования, но необходимой в качестве начальных условий задачи релаксации остаточных напряжений вследствие высокотемпературной ползучести.

В *третий главе* задачи, исследованные в предыдущей главе, рассматриваются в упругопластической постановке, которая описывает более адекватные результаты в случаях, когда напряжения в окрестности концентратора превышают предел текучести. Использован закон пластического течения, ассоциированный с функцией текучести Мизеса и степенной закон изотропного деформационного упрочнения. В данной постановке исследована зависимость распределения остаточных напряжений от угла при вершине треугольного выреза, а также концентрация напряжений вблизи несквозных вырезов.

В *четвертой главе* численно исследуется релаксация остаточных напряжений в призматическом образце с концентратором вследствие ползучести в течение термосилового нагружения и последующей разгрузки. В расчете использован обобщенный закон Нортона для описания установившейся ползучести и учтена зависимость модуля Юнга от температуры, приводящая к изменению остаточных напряжений. Учитываются суммарные пластические деформации как вследствие поверхностной обработки, так и вследствие остаточных напряжений вблизи концентратора. Выполнен параметрический анализ влияния глубины и формы одиночного надреза на релаксацию остаточных напряжений.

В *заключении* сформулированы основные выводы и научные результаты работы.

Приложения содержат акты внедрения результатов исследования в расчетную практику ПАО «Кузнецов» (г. Самара) и учебный процесс Самарского государственного технического университета.

3. Теоретические результаты диссертации и их научная новизна.

Разработан новый метод расчёта остаточных напряжений в призматических деталях с концентраторами напряжений в виде надрезов, нанесенных на поверхность, обработанную пластическим деформированием, а также релаксации остаточных напряжений в подобных деталях вследствие высокотемпературной ползучести. Разработанный метод реализован в пакете прикладных программ ANSYS, в результате чего 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.

4. Практическая значимость результатов диссертации.

Метод расчета высокотемпературной релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических деталях с концентраторами напряжений имеет большую практическую значимость для конструирования авиационных двигателей и турбин с высокими требованиями по прочности и внедрен в расчетную практику в профильных подразделениях ПАО «Кузнецова». В частности, он позволяет прогнозировать живучесть деталей авиационного двигателя, получивших повреждения в виде забоин от ударов посторонними предметами в процессе эксплуатации, в зависимости от глубины поверхностной упрочняющей обработки.

5. Достоверность результатов диссертации.

Достоверность результатов расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненных призматических образцах с различной геометрией выреза обеспечивалась корректной постановкой задач механики деформируемого твердого тела и их численным решением, использованием упруго-пластической постановки задач при расчете остаточных напряжений, сравнением с экспериментально подтвержденными результатами для упрочненного призматического образца без концентратора.

6. Апробация работы. Основные положения диссертационной работы Д.М. Шишкина опубликованы в четырех научных журналах, реферируемых международными научными базами Web of Science и Scopus и входящих в перечень ВАК, и докладывалась на десяти международных и всероссийских конференциях по профилю механики деформируемого твердого тела. Полностью работа докладывалась на научных семинарах Самарского государственного технического университета, Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева и Института механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь). Работа выполнялась в рамках проекта РФФИ, результаты которого проходят полноценную научную экспертизу.

7. Замечания и вопросы по содержанию работы.

1. На с.20 несовместные деформации названы неравновесными. На с.22 упущены деформации, сопровождающие фазовый переход, в качестве источника остаточных напряжений при сварке. На с.23-24 соискатель цитирует: «пластическая деформация вызывает уменьшение плотности металла, что обуславливает рост удельного объема на глубину

проникновения этой деформации» — дилатационный механизм возникновения остаточных напряжений, хотя далее работает совсем другой механизм, математически описанный в разделе 2.2.

2. Вызывают вопросы некоторые детали введения остаточных напряжений в расчет, описанные в разделе 2.2. В чем целесообразность решения задачи теплопроводности? Чем не подходит задание однородного стационарного распределения температуры (немного большей отсчетной) в расчетной области? На каком основании в задаче термоупругости (по сути — упругости с предписанными собственными деформациями) задавался произвольный коэффициент Пуассона для слабосжимаемого тела (упругие деформации металлов являются сжимаемыми)?

3. По сути, в расчет вводится несовместное несжимаемое поле собственных деформаций (2.5)-(2.6), которое порождает равновесное поле остаточных напряжений в упругом теле. Хотя последнее не совпадает с полем (2.6), которое а) не равновесно (моменты на концах бруса не равны нулю) и б) связано с деформациями (2.5) грубой версией гипотезы плоских сечений, запрещающей поворот сечений, рассчитанное поле остаточных напряжений получается равновесным и отвечающим локализованному профилю собственных деформаций (и независящим от совместного слагаемого с σ_0 в (2.6)!). В таком случае сравнение распределения (2.6) с рассчитанным полем остаточных напряжений некорректно, поскольку данные поля отвечают схемам с запретом поворотов концов бруса и бруса со свободными концами.

4. Напряжения вблизи вершины клиновидного выреза согласно упругопластического расчета превышают предел прочности стали ЭП742, что нереалистично.

5. В разделе 3.3 не дано объяснение немонотонной зависимости максимального напряжения вблизи вершины клиновидного выреза от величины угла.

6. В разделе 4.2 не дано объяснение выполаживания остаточных напряжений на глубинах от 0 до 0.1 мм в процессе ползучести, следующего из результатов расчета.

Указанные замечания не затрагивают положений, выносимых на защиту. Замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертационной работы.

8. Заключение по диссертации.

Диссертация представляет собой самостоятельную завершенную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной задачи, имеющей существенное значение для машиностроения при проектировании авиационных турбореактивных двигателей с поверхностью упрочненными деталями высокотемпературных контуров с учетом требований прочности. Диссертационная работа Шишкина Дмитрия Михайловича на тему «Методы расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых призматических деталях с концентраторами напряжений в условиях реологического деформирования», выполнена на высоком научно-методическом уровне и отвечает всем требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.03.2013 года (в редакции от 28.08.2017 года), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Диссертационная работа докладывалась на научном семинаре ИМСС УрО РАН 17.11.2021.

Отзыв подготовил:

заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) — филиала ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
доктор физико-математических наук (01.02.04), доцент

 Келлер Илья Эрнстович

Служебный телефон: +7(3

E-mail: kie@icmm.ru

Служебный адрес: 614018

ул. Акад. Королёва, д.1, ИМСС УрО РАН

Подпись И.Э. Келлера заверяю

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН,
кандидат физико-математических наук
18 ноября 2021 года

Юрлова Н.А.

