

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры «Теории упругости»
Завойчинской Элеоноры Борисовны
на диссертационную работу Зуева Евгения Александровича
«Исследование напряженно-деформированного состояния и механизмов разрушения
объектов тяжелого машиностроения», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Актуальность темы. В настоящей диссертации рассмотрена актуальная научная проблема усталостной прочности базовых несущих элементов гидравлических прессов и разработан метод оценки их технического состояния на основе численного моделирования и метода электротензометрии. Проведены расчеты и экспертизы и даны заключения о возможностях дальнейшей безопасной эксплуатации ряда технологических машин и агрегатов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Целью данной работы является развитие современных методов определения трехмерного неоднородного напряженно-деформированного состояния элементов технологических машин с оценкой фактической нагруженности на основе метода электротензометрии и контролем зарождения и развития дефектов методами неразрушающего контроля. В работе сформулированы требования для расчетных комплексов, предложены расчетные схемы. Создан, обоснован и проверен на практике метод определения напряженного состояния и контроля предварительной затяжки колонн с помощью метода электротензометрии.

Достоверность и научная новизна материалов работы. Достоверность большинства полученных автором научных и практических результатов и сделанным по ним выводам обеспечивается применением фундаментальных положений математики и механики, обоснованных методов экспериментальных исследований и хорошим соответствием теоретическим результатам, полученным при помощи современных технических решений.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«16» 05 2022

Научная новизна заключается в возможности объединения экспериментальных и расчетных данных в одной системе непрерывной диагностики

и контроля напряженного состояния базовых деталей в эксплуатации, способной отслеживать рост усталостных трещин и контролировать рабочие режимы тяжелых машин.

Теоретическая и практическая ценность и значимость результатов исследований, предложенных методик, а также выводов и рекомендаций заключается в комплексном подходе к определению напряженно-деформированного состояния, предложению вариантов модернизации для обеспечения дальнейшей эксплуатации.

Оценка содержания диссертации, её целостность и завершенность.

Методологически диссертационная работа построена логично, написана грамотным научным языком, аккуратно оформлена в соответствии с ГОСТ.

Диссертация состоит из четырех глав, в которых рассмотрен ряд задач по определению линейно-упругого неоднородного напряженно-деформированного состояния в рассмотренных элементах технологических машин в детерминированной постановке. В этих элементах в процессе эксплуатации (порядка 50-60 лет и более) возникает сложное (непропорциональное) напряженное состояние в области многоциклового усталости (в среднем, порядка 10^6 циклов). В этой работе анализ усталостной прочности элементов проводится сравнением полученных максимальных значений главных напряжений с пределом выносливости материала (сталей 17Г1С, 22К, 30Л, 35, 49, 50 и др.) при пульсирующем цикле (максимальном напряжении цикла) на базе, в среднем $2 \cdot 10^6$ циклов. Отношением этих величин определяется коэффициент запаса усталостной прочности. Обсуждены принципы применяемых в этих элементах методов выявления усталостных трещин: капиллярной, вихретоковой и ультразвуковой дефектоскопии.

В первой главе автором представлены объекты исследований: рабочие цилиндры, конструкции поперечин сложной формы с наличие различных технологических отверстий, колонны, станины клеток металлургических станков. Проведен анализ известных методов теоретического определения напряженно-деформированного состояния этих объектов в эксплуатации и экспериментальных исследований методами электротензометрии, фотоупругости и др.

На основе анализа представительного ряда отказов получено, что одними из основных причин разрушения является зарождение и развитие усталостных трещин в местах концентрации напряжений, во внутренних технологических отверстиях, в галтелях днищ, в радиусных переходах стенок (например, в исследованных основаниях прессы 10 000 *тс* АО «Ступинская Metallургическая Компания», пресса 5 500 *тс* АО «Волжский трубный завод», пресса 6 000 *тс* Самарского металлургического завода и др.), в том числе в отремонтированных элементах (например, в галтелях фланцев цилиндров прессы П-961 усилием 16 000 *тс* и ПО 753 усилием 20 000 *тс*), во впадинах наружных витков резьбы колонн (рассмотрена колонн прессы Schloemann P-350). Обсуждены некоторые известные подходы к определению коэффициента запаса усталостной прочности элемента.

Во второй главе приведены результаты моделирования трехмерного неоднородного напряженного состояния основания гидравлического прессы SPR-R 9000 в эксплуатации в рамках линейно-упругой задачи в программном комплексе ANSYS. Выбрана геометрическая модель элемента, рассмотрен узел «основание–подштамповый набор» (с нулевыми вертикальными перемещения посередине колонны), подробно описаны выбранные типы узловых элементов: 10-узловые тетраэдрические элементы 2 порядка для элементов сложной формы и 8-узловые гексаэдрические элементы 1 порядка для остальных элементов конструкции, в области технологических отверстий выбрана конечноэлементная сетка на дуге 90 градусов - 6-8 элементов. Выполнены необходимые тестовые задачи, позволяющие определить минимальное число необходимых элементов для обеспечения точности. Между сопряженными деталями узла контактные взаимодействия заданы элементами CONTA173 и TARGE170. Смоделированы силовые воздействия (рабочее усилие 9000 *тс* создается передающимся давлением величины 89.9 МПа на штамподержатель через цилиндрическую плиту и давлением величины 115 МПа на верхнюю подштамповую плиту через цилиндр, воспринимаемым нижней оправкой и ее центрователем). Предел выносливости материала элемента – стали 17Г1С при пульсирующем цикле принят равным 255 МПа. Допустимое значение коэффициента запаса усталостной прочности выбрано равным 1.2. В результате расчетов определено напряженно-деформированное состояние базовых деталей узлов «основание-штамповый набор». Для верхней плиты получено, что максимальное

значение главного напряжения на контуре №1 отверстия под выталкиватели равно 152 МПа, коэффициент запаса усталостной прочности составляет 1.68. Для опорной плиты определена величина коэффициента запаса 2.02.

Для экспериментального определения компонент тензора деформаций использовался метод электротензометрии, который подробно описан автором. Автором предложен метод и программа постоянного контроля в эксплуатации силы затяжки колонн в поперечинах с использованием электротензометрии. (Суть метода состоит в том, что если стык между колонной проставкой и поперечинами прессы закрыт, то изменение растягивающих напряжений происходит синхронно с графиком силы прессования, если имеет место раскрытие стыка, то растягивающие напряжения принимают некоторое значение и остаются неизменными при увеличении рабочей нагрузки). Также описаны применяемые для исследуемых объектов известные методы дефектоскопии: капиллярный, вихретоковый и ультразвуковой.

В третьей главе рассмотрены задачи об определении неоднородного напряженно-деформированного состояния главных гидроцилиндров усилием 3500 *тс* и 5 000 *тс* соответственно. Получено, что максимальные значения главных напряжений в галтелях днищ этих цилиндров соответственно равны 140.1 МПа и 130.5 МПа. Показано, что с увеличением радиуса галтели эти напряжения существенно уменьшаются (по представленным расчетам в 1.4 раза).

С целью изучения влияния кратковременного неравномерного распределения давления на напряженное состояние в галтели проведено моделирование нестационарного потока воды в рабочей области цилиндра в среде SOLIDWORKS Flow Simulation до момента, когда на стенках и днище цилиндра устанавливается среднее давление. Выбраны соответствующие граничные условия (из сосуда высокого давления в рассматриваемый цилиндр с атмосферным давлением подается несжимаемая жидкость (вода) с давлением, равным 320 МПа), свойства жидкости, заданы начальные условия и температура.

Представлены результаты исследований рабочего цилиндра прессы 1500 *тс* АО «Волжский трубный завод». Методом ультразвукового контроля была обнаружена продольная трещина от отверстия для подключения датчика давления жидкости. По результатам проведенных расчетов получено, что максимальное

значение напряжений реализовывалось в зоне этого отверстия, при этом значение коэффициента запаса по пределу текучести (материал – сталь 35 с пределом текучести, равным 244 МПа) составляло 0.71, что ниже допустимого значения. В результате расчетов с заваренным отверстием получен удовлетворительный коэффициент запаса, равный 1.21. Было реализовано предложение Зуева Е.А. по ремонту путем разделки трещины с помощью угольных электродов на толщину стенки цилиндра и проведения сварочных работ (путем наплавки проволоки Sabaros SW).

Проведено численное моделирование напряженного состояния во впадинах витков наружной резьбы четырех колонн пресса Schloemann P-350 с использованием программного комплекса ANSYS в осесимметричной постановке; описано контактное взаимодействие, представлена расчетная сетка. При единичном растягивающем усилии, приложенном к торцу колонны, расчетный коэффициент концентрации напряжений составил 10.88. В результате расчета по известным соотношениям получено, что коэффициент запаса усталостной прочности при затянутых гайках равен 1.81. В раскрытых стыках при пульсирующем цикле и максимальном усилии в 500 *тс* (предел усталости при пульсирующем цикле взят равным 244 МПа) коэффициент запаса составил 0.66, что значительно ниже допустимого значения. Произведены расчеты в эксплуатации при силе 1570 *тс*, которые подтверждены в результате исследования контроля затяжек методом электротензометрии. Найдено, что между внешней гайкой №3 и опорными поверхностями основания имеется круговой зазор в 1.5 мм, а стык № 4 раскрыт. Дано заключение, что при восстановлении равномерности нагружения колонн усилия прессования можно увеличить до 2000 *тс*.

В результате тензометрирования колонн пресса 10 000 *тс* АО «Ступинская Металлургическая Компания» обнаружен полностью раскрытый стык на колонне №3 в основании пресса, разрезная гайка повреждена коррозией на 50-60%. Проведены соответствующие расчеты и представлена зависимость коэффициента концентрации напряжений от высоты поврежденной резьбы. Дана рекомендация, что этот процент не должен превышать 20%. (Получено, что при повреждении 40% от высоты резьбы значение коэффициента запаса усталостной прочности равно 1.4, а при 50% – 1.24). Соискателем предложен метод бандажирования гайки. Решена задача неупругого деформирования для бандажных поясов (из стали 35) и выбраны

бандажные кольца необходимых геометрических размеров. После проведенного ремонта вновь произведен расчет и дополнительно тензометрирование, которое подтвердило полученные результаты.

Осуществлен расчет трехмерного неоднородного напряженного состояния подвижной траверсы прошивного устройства станины из стали 35Л (предел выносливости при пульсирующем цикле равен 190 МПа) в линейной постановке в программе SOLIDWORKS Simulation. Максимальные значения эксплуатационных напряжений на контуре технологического отверстия приводят к коэффициенту запаса усталостной прочности, равному 0.74, что ниже допустимого значения. Для прессы 10 000 *тс* АО «Ступинская Металлургическая Компания» было проведено электротензометрирование (расхождения с расчетными данными до 10%) и подтверждены полученные результаты (в технологических окнах вертикальных ребер были обнаружены трещины). На основе проведенных расчетов было предложено провести восстановительный ремонт (вторая модернизация) с заваркой технологических отверстий в вертикальных внутренних ребрах.

Приведены результаты расчета трехмерного неоднородного напряженно-деформированного состояния станины клетей №6 и 7 Стана 2000 предприятия ПАО «Северсталь», г. Череповец (для горячей прокатки листа), определена геометрия элементов, задана проектная нагрузка (3 300 *тс*) и выбраны граничные условия. Во всех расчетных случаях максимальное главное напряжение реализовано в галтели радиуса 10 *мм* в зоне перехода от вертикального цилиндрического отверстия к контактной поверхности станины с гайкой ходового винта, коэффициент запаса усталостной прочности при проектной нагрузке был 0.72 (материал – сталь 30Л с пределом выносливости при пульсирующем цикле 182.3 МПа). Представленный расчет находится в хорошем соответствии фактическим эксплуатационным данным (максимальное расхождение 6%). В целях модернизации рекомендовано увеличение радиуса галтели до 40 *мм*. Найдено, что в этом случае возможно увеличение нагрузки до 4 600 *тс*.

В четвертой главе обобщены результаты предыдущих глав. А именно, на основании проведенных расчетов можно проводить диагностику напряженно-деформированного состояния гидроцилиндров, определять места установления тензорезисторов и специальных датчиков по контролю зарождения и начального

развития усталостных трещин в эксплуатации и предотвращения возможных аварийных ситуаций. Предложены расчетные модели для поперечин, относительно которых в настоящее время практически отсутствует информация о фактическом напряженном состоянии. Произведены расчеты для колонн. Представлены результаты расчетов напряженно-деформированного состояния и зон установки датчиков для архитрава прессы Schloemann P-350, и обсуждена возможность перехода с усилия в 1 500 тс на 2 000 тс. Рассмотрены возможности по установке системы постоянного контроля рабочих режимов для всех рассмотренных базовых элементов. Для обоснования системы выполнено несколько расчётов, подтверждённых выполненными испытаниями..

Представлен предложенный метод контроля в эксплуатации силы затяжки колонн в поперечинах с использованием электротензометрии.

В заключении описаны результаты работы, перечислены элементы технологических машин, для которых автором были проведены расчеты и экспертизы напряженно-деформированного состояния, и дано экспертное заключение о возможности дальнейшей эксплуатации.

Подтверждение опубликованных основных результатов в научной печати и соответствие автореферата диссертации.

Основные положения диссертации опубликованы в печати в 15 научных работах, из них три статьи в журналах, включенных в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук» ВАК РФ.

Научные положения диссертации, выводы и рекомендации прошли достаточно широкую апробацию на научных конференциях различного уровня.

Работа Зуева Е.А. состоит из 168 страниц машинописного текста, 115 рисунков, 6 таблиц, включает в себя введение, 4 главы, заключение и список публикаций и литературных источников из 68 наименований. Диссертация представляет собой актуальное завершённое научное исследование. По структуре, содержанию и стилю изложения работа соответствует уровню кандидатской диссертации.

Содержание автореферата соответствует предъявляемым требованиям и отражает основные положения и научные результаты диссертации, выносимые на защиту.

По тексту диссертации можно сделать следующие **замечания**:

- 1) В главе 2 вместе с полученными автором результатами рассматриваются известные методы неразрушающего контроля: капиллярный, вихретоковый и ультразвуковой методы. Подробно обсуждается метод электротензометрии. Представляются результаты известных усталостных испытаний сталей (причем для сталей, не рассматриваемых в этой главе). На мой взгляд, это целесообразно было бы обсудить в первой главе. Также из текста не понятно, что в качестве подтверждения полученных результатов автор использовал метод электротензометрии, соответствующие выводы не приводятся. Почему-то в этой же главе рассматривается предложенный метод контроля затяжек колонн, остается не понятным, почему он описывается в этой главе, т.к. результаты экспертизы в ней не приводятся.
- 2) На стр. 80 последний абзац содержит стилистические недочеты – изучается уменьшение максимальных значений напряжений в галтели с увеличением радиуса, потом делается вывод о неограниченной долговечности при использовании в качестве жидкости воды и что перевод на другую рабочую жидкость может отрицательно сказаться на других узлах работы гидравлического оборудования.
- 3) На мой взгляд, было бы целесообразным представить распределения компонент тензора напряжений в различных наиболее нагруженных сечениях рассматриваемых элементов, автор ограничивается обсуждением только максимальных главных напряжений.
- 4) На рис. 64 и рис. 65 не понятно, что отложено по осям и какие размерности величин
- 5) На рис.35 указано рис. 35 в), но такого рисунка нет

Вышеизложенные замечания не отражаются на общем положительном заключении по рассматриваемой квалификационной работе.

Заключение по диссертационной работе. Диссертация Зуева Евгения Александровича на тему «Исследование напряженно-деформированного состояния и механизмов разрушения объектов тяжелого машиностроения» выполнена на высоком научном уровне. Проведенные исследования являются актуальными и представляют научный и практический интерес.

Диссертационная работа Зуева Евгения Александровича по актуальности, новизне и практической значимости, а также объему выполненных исследований соответствует критериям, изложенным в пунктах 9, 10, 11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, которые предъявляются к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Зуев Евгений Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент
профессор кафедры «Теории упругости»
механико-математического факультета
Московского государственного университета
им М.В. Ломоносова

Специальность ВАК, по которой защищена диссертация:
01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»



Завойчинская Элеонора Борисовна

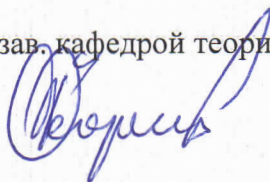
Подпись Завойчинской Элеоноры Борисовны заверяю

Проф. Георгиевский Д.В.
(Ф.И.О.)

зав. кафедрой теории упругости 06 мая 2022 г.
(должность)

(дата)

(подпись)



119991 г. Москва, Ленинские горы, д.1, МГУ
механико-математический факультет
Телефон: +7 (495) 939-55-39

С отзывом ознакомил

16.05.2022г. Зуев Е.А.