

*На правах рукописи*

**СЕМИЧЕВ Юрий Станиславович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТАНИН  
ЗАКРЫТОГО ТИПА РАБОЧИХ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена на кафедре «Металлургические и роторные машины» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Раскатов Евгений Юрьевич**

Официальные оппоненты: **Анцупов Виктор Петрович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, профессор кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования;

**Билалов Дамир Харасович**, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», г. Екатеринбург, доцент кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

Защита диссертации состоится 16 мая 2019 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=288665>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук

Раскатов Евгений Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Большая часть прокатных станов, работающих на металлургических заводах России, находится в эксплуатации 30 – 50 и более лет. При столь длительных сроках службы оборудование, устаревая морально и физически, перестает соответствовать современным технологическим запросам и требованиям по предупреждению аварийных ситуаций, связанных с его разрушением. Замена всего парка прокатных станов с длительными сроками службы является трудновыполнимой задачей и не может быть осуществлена в короткие сроки. В то же время, современный технологический уровень прокатных станов обеспечивает модернизация систем привода, управления и механизации (20% массы и стоимости оборудования) и сохранение для дальнейшей эксплуатации базовых деталей, составляющих до 80% массы и стоимости оборудования.

Наиболее металлоемкими и трудоемкими базовыми деталями прокатных станов по условиям изготовления, транспортировки и монтажа являются станины клетей, которые воспринимают силу давления металла на валки при прокатке. Практика эксплуатации показывает, что длительные простои линий производства проката и значительные расходы на ремонт связаны с разрушением станин.

Обеспечение современного технологического уровня прокатных станов, предупреждение экономического ущерба и аварийных ситуаций определяют актуальность работы, направленной на повышение прочности станин клетей действующих прокатных станов.

**Цель работы:** обеспечение прочностной надежности станин клетей действующих прокатных станов при дальнейшей длительной эксплуатации.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать, исследовать и обосновать технические решения, обеспечивающие прочность станин при дальнейшей эксплуатации, как при проектных, так и при увеличенных силах прокатки.

2. Выбрать, развить и обосновать методы исследования напряженного состояния и прочности станин клетей прокатных станов с учетом режимов

нагрузки, реальной геометрии и характеристик усталостной прочности материала станин.

3. Исследовать напряженное состояние и прочность станин действующих прокатных станов металлургических заводов РФ, определить запасы усталостной прочности станин и оценить возможность возникновения аварийных ситуаций.

#### **Научная новизна работы:**

1. Высокие напряжения, приводящие к возникновению усталостных трещин и разрушению станин, возникают в локальной зоне вблизи нейтральной оси верхней поперечины. Эти напряжения не связаны с номинальными напряжениями изгиба верхней поперечины и не могли быть определены на стадии проектирования станин методами сопротивления материалов. Поэтому в действующих прокатных станах максимальные напряжения в станинах превышают предел усталостной прочности, что при длительной эксплуатации приводит к «внезапному» разрушению станин.

2. Повышение прочности станин обеспечивает замена существующей радиусной галтели контактной площадки верхней поперечины на галтель специальной формы с поднутрением стенки вертикального отверстия. Такая галтель, сохраняя существующую конструкцию нажимного устройства, снижает уровень максимальных напряжений примерно в 3 раза и обеспечивает дальнейшую длительную безотказную работу станин.

3. Получены количественные зависимости, связывающие точность расчета методом конечных элементов с плотностью конечно-элементной сетки в зоне конструктивного концентратора напряжений.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

Предложены, разработаны и обоснованы: конструктивные решения, обеспечивающие прочность станин клеток действующих прокатных станов, как при проектных, так и при увеличенных силах прокатки; методы исследования, позволяющие определить запасы усталостной прочности станин действующих прокатных станов.

Экспертиза состояния с определением запасов усталостной прочности проведена для станин клетей прокатных станов 1700 и 2800 ПАО «Северсталь» и для станин клетей прокатных станов 1700 и 2000 ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Новые конструкции мест перехода вертикального отверстия к контактной площадке верхней поперечины станины с гайкой нажимного винта рекомендованы и приняты к реализации в станинах клетей прокатных станов 1700 и 2800 ПАО «Северсталь» и в станинах клетей прокатных станов 1700 и 2000 ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

**Достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций обоснована современными методами исследования напряженного состояния и прочности сложных конструкций и результатами натурных исследований станин действующих прокатных станов. В местах перехода вертикального отверстия к контактной площадке верхней поперечины станины с гайкой нажимного винта, для которых расчетный запас усталостной прочности составил  $n < 1$ , были обнаружены усталостные трещины.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ; в том числе 5 статей в журналах из списка ВАК; 1 патент РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и библиографического списка. Работа изложена на 115 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 11 таблиц. Библиографический список содержит 47 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** дано краткое обоснование актуальности темы диссертации, поставлена цель работы и сформулированы задачи, решение которых необходимо для ее достижения.

В **первой** главе проведен анализ напряженно-деформированного состояния станин прокатных станов и выбор метода исследования. Наиболее металлоемкими

и трудоемкими элементами прокатных станов по условиям изготовления, транспортировки и монтажа являются станины клетей, которые воспринимают давление металла на валки при прокатке. Практика эксплуатации показывает, что в ряде случаев длительные простои линий производства проката и значительные расходы на ремонт связаны с внезапным разрушением станин. Именно к таким случаям относятся разрушения верхних поперечин станин, вызванные возникновением и развитием усталостных трещин в радиусной галтели перехода вертикального отверстия под гайку нажимного винта к контактной площадке (далее галтель контактной площадки) (рис. 1). Галтель контактной площадки недоступна для прямого наблюдения, поэтому длительный процесс роста усталостной трещины, оставаясь незамеченным, приводит к «внезапному» разрушению станины.

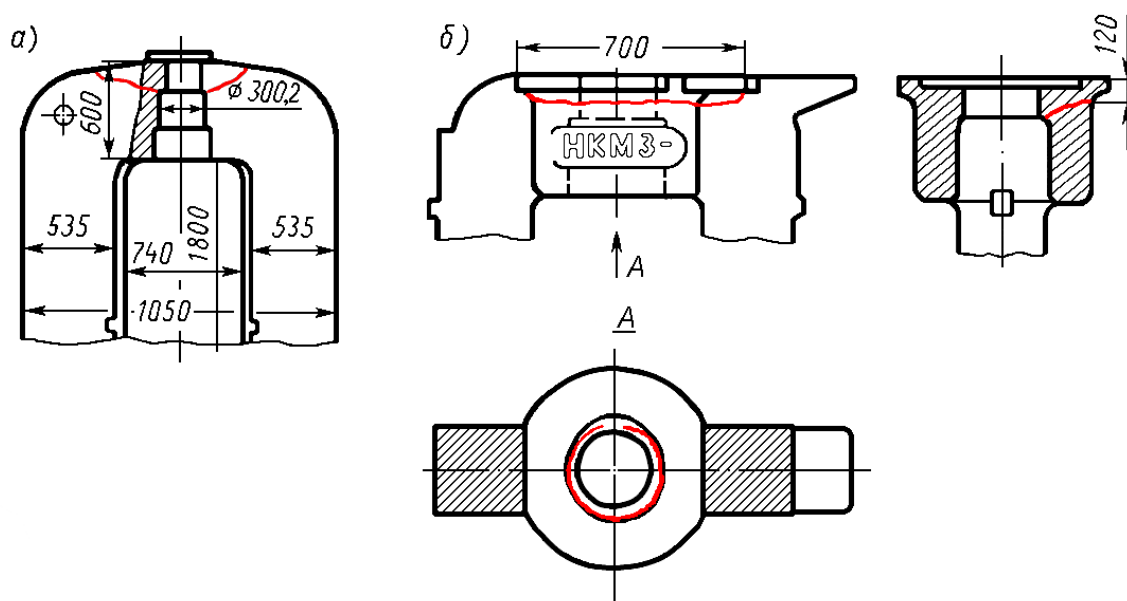


Рисунок 1 – Разрушения станин прокатных станов, вызванные возникновением и развитием усталостных трещин в галтели контактной площадки верхней поперечины:  
а - станина непрерывного стана 400, б - станина стана кварто 305

Расчет напряженного состояния станин действующих прокатных станов проводился методами сопротивления материалов (рис. 2) и давал возможность определить номинальные напряжения по сечениям станины. В верхней поперечине максимальные номинальные растягивающие напряжения, по которым оценивалась прочность станины при проектировании, действуют по верхней поверхности (рис. 2, в). Но напряжения выше предела выносливости материала

станины возникают на локальной поверхности радиусной галтели контактной площадки в точке  $C$  (рис. 2, в), где номинальные напряжения изгиба имеют нулевые или весьма небольшие значения. Эти местные напряжения, не связанные с номинальными напряжениями изгиба верхней поперечины, не могли быть учтены при проектировании, поэтому галтели контактных площадок верхних поперечин конструировались из условия минимума механической обработки с минимальным радиусом закругления. Практика эксплуатации показала, что малый радиус перехода вертикального отверстия к контактной площадке верхней поперечины станины с гайкой нажимного винта является причиной возникновения усталостных трещин, разрушающих станину.

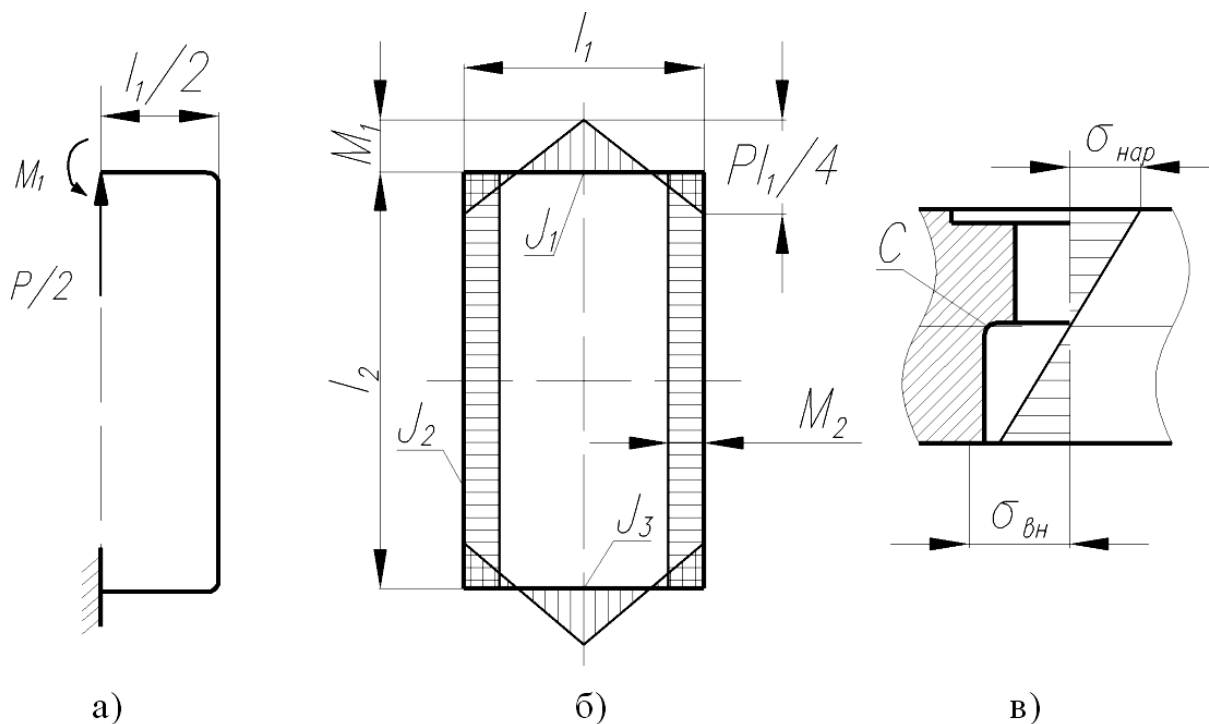


Рисунок 2 – Расчетные схемы станины клетки прокатного стана при центральном нагружении силой прокатки  $P$ : а – схема нагружения станины; б – эпюра изгибающих моментов в стойках и поперечинах; в – номинальные напряжения изгиба в центральной части верхней поперечины;  $C$  – место возникновения максимальных напряжений в радиусной галтели

Экспериментальное исследование методом фотоупругости напряженного состояния угловых соединений, проведенное В.В. Васильевым, показало, что для уменьшения напряжений в угловом переходе необходимо увеличение базы галтели. Для верхних поперечин станин действующих станов результаты этого исследования не могут быть использованы, так как база галтели в поперечине

задана конструкцией деталей существующего нажимного устройства.

Исследование напряжений в галтели контактной площадки и разработка конструктивных решений, направленных на увеличение базы и повышение прочности перехода, были проведены Б.А. Морозовым. Результаты исследований на плоских моделях методом фотоупругости показали, что радиусная галтель, поднутряющая несущую стенку, вызывает увеличение напряжений в месте перехода. Конструктивные решения, направленные на увеличение прочности перехода, не были использованы для станин действующих прокатных станов, так как требовали значительного изменения конструкции существующих нажимных устройств.

Представленный выше анализ литературы показал, что в действующих прокатных станах даже при номинальных силах прокатки максимальные напряжения в станинах значительно выше предела усталостной прочности материала. При длительнейшей эксплуатации длительный процесс возникновения и развития усталостной трещины заканчивается «внезапным» разрушением станин.

Первым этапом работ по увеличению прочности станин действующих прокатных станов является экспертиза состояния станин с установлением запасов усталостной прочности в зонах конструктивных концентраторов. Для выполнения этих работ необходимо исследовать, развить и обосновать методы расчета напряжённого состояния и оценки усталостной прочности верхних поперечин станин прокатных станов.

Во **второй** главе представлено исследование влияния плотности разбиения конструктивного концентратора на точность расчёта напряжений методом конечных элементов. Базовые детали металлургических машин, в том числе станины прокатных станов, имеют сложную геометрию. Расчет таких деталей на усталостную прочность требует высокой точности определения максимальных напряжений в зонах конструктивных концентраторов. В работах последних лет для исследования напряженного состояния деталей металлургических машин широко используется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программном комплексе ANSYS. В публикациях, рассматривающих напряженное



состояние сложных деталей, отмечается, что для обеспечения точности расчета сетка разбиения на элементы в зоне конструктивного концентратора должна быть более плотной, чем на гладких участках контура детали или внутри объема материала. Однако отсутствие количественных оценок, связывающих размер конечного элемента с геометрией концентратора напряжений, может приводить к занижению максимальных напряжений, завышению коэффициентов запаса усталостной прочности и ошибкам при выборе технических решений. В настоящей работе оценка влияния плотности разбиения на точность расчета МКЭ дана сопоставлением с результатами аналитических решений для пластин с круговыми и эллиптическими отверстиями.

В соответствии с аналитическим решением Г. Кирша для кругового отверстия в бесконечной пластине, растянутой распределенной силой  $p$ , максимальные напряжения на контуре отверстия  $\sigma_{\max} = 3p$  (рис. 3), коэффициент концентрации напряжений  $\alpha = \sigma_{\max}/p = 3$ .

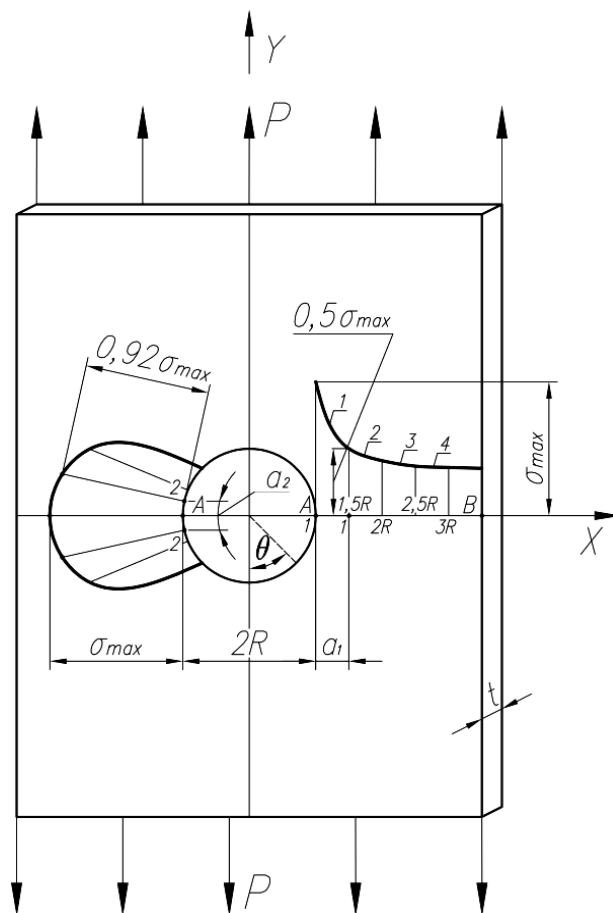


Рисунок 3 – Напряженное состояние пластины бесконечной ширины с круглым отверстием при одноосном растяжении

По оси  $X$  на протяжении участка  $a_1 = 0,5R$  растягивающие напряжения  $\sigma_1$  уменьшаются от  $\sigma_{\max}$  до  $0,5\sigma_{\max}$ . На контуре отверстия по длине дуги  $a_2 = a_1 = 0,5R$  напряжения уменьшаются от  $\sigma_{\max}$  до  $0,92\sigma_{\max}$ , т.е. остаются практически постоянными. Падение напряжений по нормали к контуру отверстия происходит более резко, чем вдоль контура, поэтому необходимую точность расчета определяет плотность разбиения на элементы объема материала пластины в направлении  $AB$  (рис. 3).

Эпюру напряжений  $\sigma_1$  в направлении  $AB$  с достаточной для инженерных расчетов точностью можно разделить на 4 участка. На участке 1 от  $R$  до  $1,5R$  происходит резкое падение концентрации напряжений от  $\alpha = 3$  до  $\alpha = 1,5$ , на участке 2, также длиной  $0,5R$ , концентрация напряжений уменьшается в 1,15 раза от  $\alpha = 1,5$  до  $\alpha = 1,3$ . На участках 3, 4 с началом на расстояниях  $R$  и  $1,5R$  от контура отверстия напряжения плавно снижаются до номинальной величины  $\sigma_{\text{ном}} = p$ .

На каждом участке принимаем равномерное разбиение. На участке 1 располагаем  $n_1$  элементов, участок 2 разделяем на  $n_2 = n_1/2$  элементов, на участке 3 размещаем  $n_3 = n_2/2$  элементов и т.д. Для различного числа элементов  $n_1$  при соотношении сторон конечных элементов в окружном и радиальном направлениях от 1:4 до 1:1 проведено сопоставление результатов точных аналитических решений и расчета методом конечных элементов.

Результаты исследования показали, что на участке 1 минимальное число элементов и достаточную для инженерных расчетов точность обеспечивает число элементов  $n_1 = 4$  при соотношении сторон конечных элементов в радиальном  $r$  и окружном  $a$  направлениях равном 1:1. Погрешность расчета для конструктивных элементов даже с весьма высокой концентрацией напряжений (эллиптические отверстия с соотношением осей 1:2 и 1:3) находится в пределах +1,3% (таблица 1).

Обоснованная выше схема разбиения на элементы зон конструктивных концентраторов напряжений применена при построении конечно-элементных моделей станин прокатных станов.

Таблица 1. Точность расчета методом конечных элементов максимальных напряжений на контурах отверстий различной геометрии в растянутых, растянуто-сжатых пластинах

№	Тип отверстия	Соотношение сторон элемента	Концентрация напряжений – точное решение	Концентрация напряжений – МКЭ	Погрешность, %
1	Окружность (растяжение)	1:1	3	3,037	+1,23
2	Окружность (растяжение-сжатие)	1:1	4	4,035	+0,88
3	Эллипс с соотношением осей 1:2 (растяжение)	1:1	5	5,050	+1,00
4	Эллипс с соотношением осей 1:3 (растяжение)	1:1	7	7,026	+0,37

Детали машин обработки материалов давлением, нагруженные высокими технологическими силами, имеют различные, в том числе, весьма большие, размеры и сложную конструкцию. Критерием подобия усталостного разрушения таких деталей является эффективная площадь  $S$  напряженной поверхности конструктивного концентратора. Количественно, в соответствии с положениями В.П. Когаева, эффективную площадь  $S$  определяет поверхность концентратора, в пределах которой напряжения изменяются от  $\sigma_{\max}$  до  $0,94 \sigma_{\max}$ . Так для отверстия в растянутой пластине  $S = 2 \cdot t \cdot b$ , где  $b = 0,435 R$  – длина окружности, в пределах которой напряжения изменяются от  $\sigma_{\max}$  до  $0,94 \sigma_{\max}$ . Натура и модель, значительно различающиеся по конструкции и размерам поперечных сечений, но в зонах максимальных напряжений имеющие равные критерии  $S$  усталостного разрушения, имеют одинаковые пределы выносливости.

По материалам литературных источников известны зависимости, связывающие медианные пределы выносливости  $\bar{\sigma}_0$  образцов при пульсирующем растяжении с эффективной площадью  $S$  напряженной поверхности образца. Марки и механические свойства сталей испытанных образцов, показаны в таблице 2.

Таблица 2. Марки и механические свойства сталей образцов, испытанных на усталость

Параметр	Марка стали					
	22К	35	40	50	35Л	25Л
$\sigma_B$ , МПа	455	510	541	683	594	490
$\sigma_{0,2}$ , МПа	248	244	279	352	308	310

Для кованных сталей 22К, 35, 40 и 50 испытаны образцы с отверстиями диаметрами 5 мм и 10 мм и гладкие образцы сечением 10x31 мм, для литой стали 35Л испытывались только гладкие образцы сечением 10x31 мм. При установлении аналитических зависимостей  $\sigma_0 - \lg S$  использовали результаты испытаний образцов с отверстиями диаметром 5 мм ( $\lg S = 1,34$ ) и гладких образцов без отверстия ( $\lg S = 4,33$ ), результаты для образцов с отверстием диаметром 10 мм ( $\lg S = 1,64$ ) служили в качестве контрольных (рис. 4). Для сталей 22К, 35, 40 и 50 графики зависимостей  $\sigma_0 - \lg S$  эквидистантны, что свидетельствует об одинаковом характере влияния эффективной площади на предел выносливости для рассматриваемых сталей.

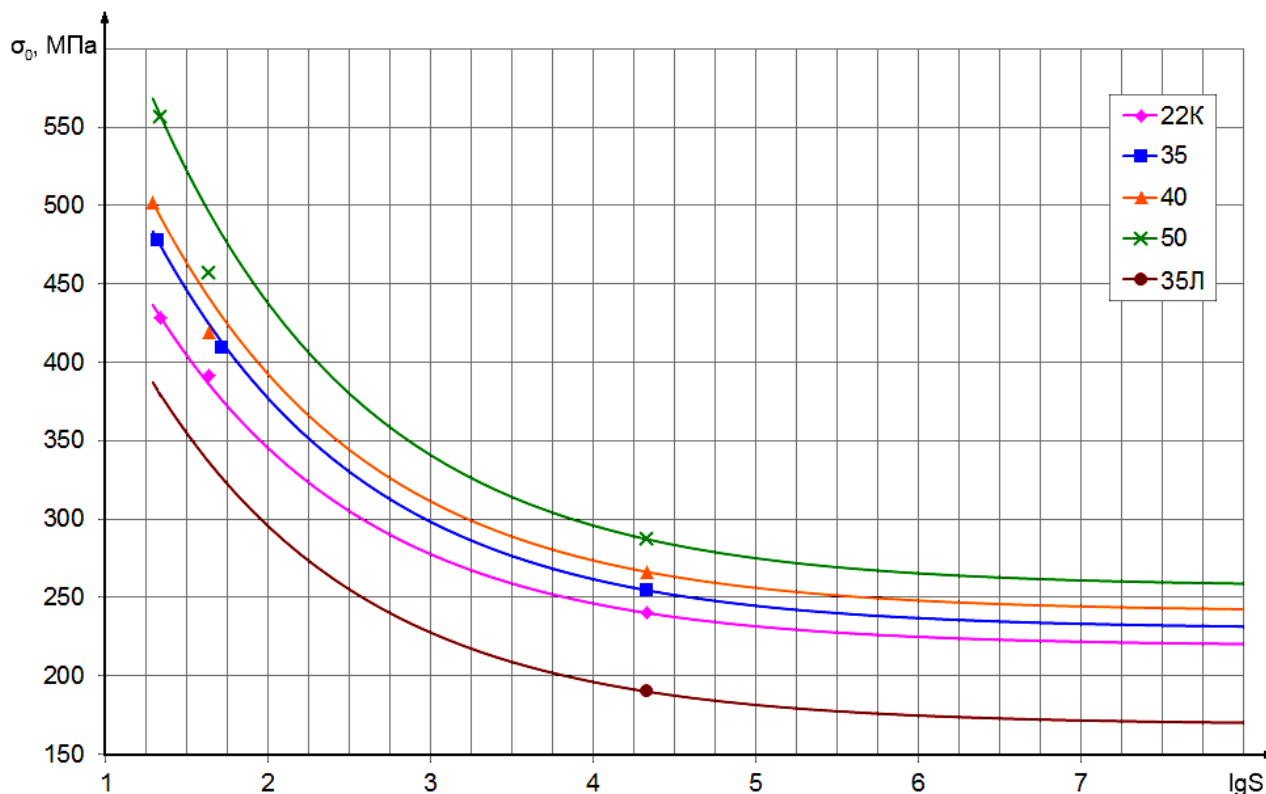


Рисунок 4 – Зависимости пределов выносливости сталей 22К, 35, 40, 50, 35Л от эффективной площади  $S$  испытанных образцов

Для определения предела выносливости деталей с концентраторами напряжений из литой стали 35Л полученных данных недостаточно, так как для стали 35Л испытывались только гладкие образцы и получена только одна точка  $\sigma_0 = 190$  МПа при  $\lg S = 4,33$ . Но по данным Таблицы 2 для сталей 22К, 35, 40 и 50, дающих эквидистантные зависимости  $\sigma_0 - \lg S$ , пределы прочности различаются в 1,5 раза, а пределы текучести в 1,44. Предел прочности стали 35Л отличается от среднего предела прочности испытанных сталей на 8,5 %, а предел текучести отличается от среднего предела текучести на 9,7 %, т.е. механические характеристики стали 35Л попадают в диапазон механические характеристик сталей 22К, 35, 40 и 50. Это позволяет и для стали 35Л представить зависимость  $\sigma_0 - \lg S$  в виде кривой эквидистантной кривым  $\sigma_0 - \lg S$  для сталей 22К, 35, 40 и 50. В качестве основной берется точка с координатами  $\sigma_0 = 190$  МПа,  $\lg S = 4,33$ .

Станины действующих прокатных станов изготовлены из стали 35Л, 25Л. Пределы текучести  $\sigma_{0,2}$  сталей 35Л и 25Л совпадают (Табл. 2), а пределы прочности  $\sigma_b$  различаются на 17 %. Это позволяет для расчетов пределов выносливости деталей из стали 25Л использовать зависимость  $\sigma_0 - \lg S$ , полученную для стали 35Л (рис. 4).

Материалы, представленные во второй главе, дают возможность провести экспертизу станин прокатных станов по критерию прочностной надежности для оценки их фактического состояния после длительной эксплуатации.

В **третьей** главе проведена разработка, исследование и обоснование метода расчета на усталостную прочность станины прокатного стана. Объектами исследования в настоящей работе являются станины клетей действующих прокатных станов 1700 и 2000 ОАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА» и прокатных станов 1700 и 2800 ОАО «Северсталь». Методику работ по экспертизе и оценке состояния станин после длительной эксплуатации покажем на примере станины стана 1700 ОАО «Северсталь».

Станины стана 1700 ОАО «Северсталь» спроектированы НКМЗ (Украина) в 1988 году. Математическая модель и основные результаты расчета станины клетки № 2 стана 1700 представлены на рис. 5. Номинальная сила прокатки на клеть

составляет 20 МН, соответственно сила, воспринимаемая одной станиной равна 10 МН. Станина имеет 2 плоскости симметрии, нагрузка также симметрична. Это позволяет представить математическую расчетную модель в виде ¼ части станины. Нагрузка прикладывается в виде равномерно распределенного давления на нижнюю поверхность гайки нажимного винта и на контактную поверхность нижней поперечины станины с подушкой нижнего валка. Ограничения на перемещения накладываются по плоскостям симметрии станины. Распределенная нагрузка, приложенная к нижнему торцу гайки нажимного винта, составляет  $p = 49,05$  МПа, в зоне контакта с подушкой нижнего валка  $p = 16,34$  МПа.

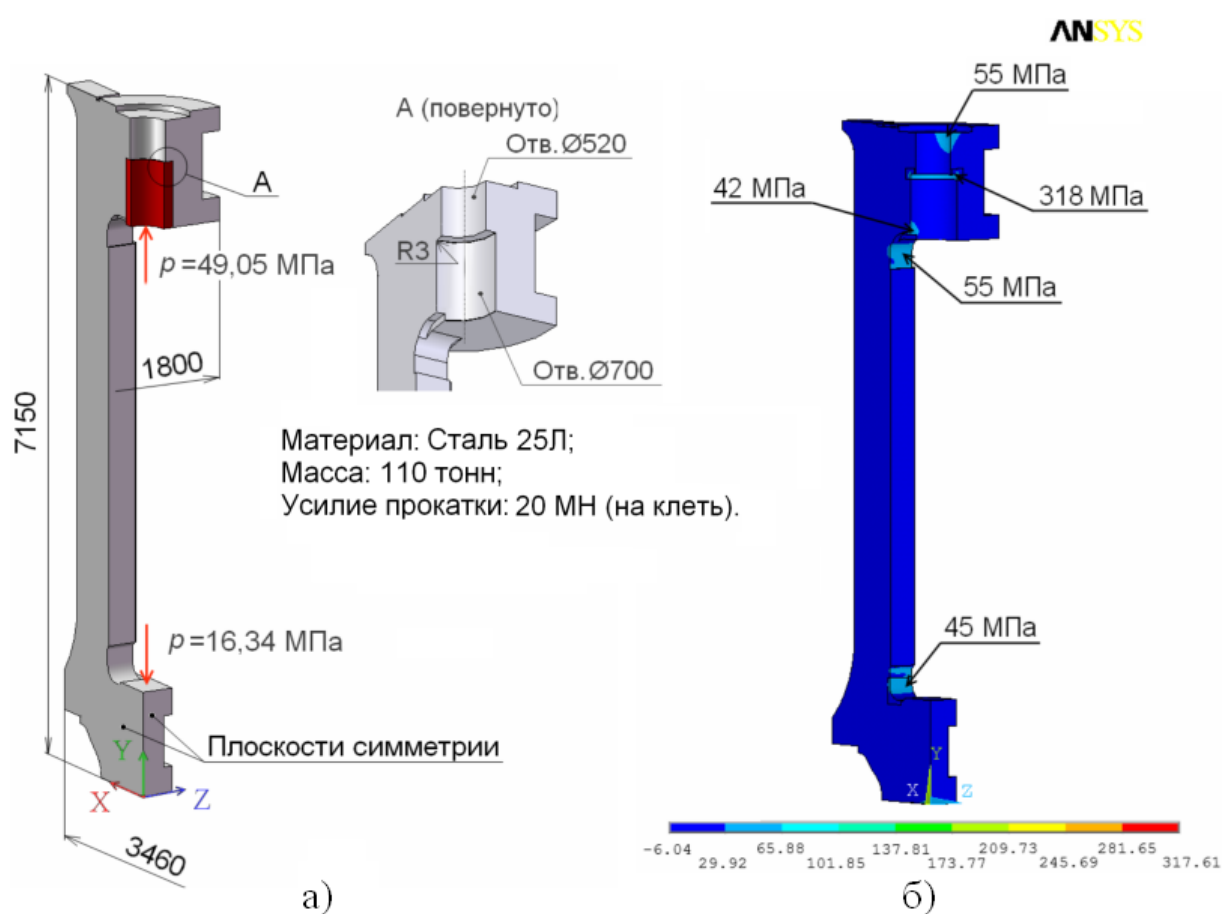


Рисунок 5 –Исследование напряженного состояния станины клетки № 2 стана 1700 ОАО «Северсталь»:

а – расчетная модель станины и схема ее нагружения;

б – основные результаты расчета станины

Результаты расчета показали, что в радиусной галтели контактной площадки верхней поперечины станины максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_1 = 318$  МПа, что превышает пределы текучести литых сталей, из которых изготавливают станины. В остальных конструктивных концентраторах

максимальные растягивающие напряжения не превышают 60 МПа, что не представляет опасности для прочности станины.

Представленные на рис. 5 достаточно полные результаты расчета станины клетки №2 стана 1700 показывают, что примененная методика может быть использована для расчета напряженного состояния и оптимизации конструкции станин клеток прокатных станов. Но в соответствии с практикой экспертизы состояния базовых деталей действующих тяжелых машин обработки материалов давлением методика их расчета должна быть подтверждена результатами производственного эксперимента. В данном случае эксперимент должен обосновать правильность выбранных расчетных схем и подобие условий нагружения модели и натуре.

Сопоставление результатов расчета и эксперимента проводилось по вертикальным деформациям средней части стоек станины. В процессе реальной производственной прокатки замеры проводились методом электротензометрии датчиками с базой 10 мм. Показания датчиков (частота опроса 50 Гц) отображались в реальном времени на дисплее компьютера и записывались на жесткий диск. Одновременно с записью деформаций стоек производилась фиксация силы прокатки, измеряемая месдозами клетки.

В условиях эксперимента деформации стоек измерялись при различных силах прокатки, определяемых режимами технологического процесса, расчет дает деформации стоек при номинальной силе прокатки. Для получения сопоставимых результатов показания датчиков, записанные при различных силах прокатки, приводятся к номинальной силе прокатки.

Экспериментальное исследование деформаций стоек станин и силы прокатки проведено для станин клетки № 2 стана 1700 ОАО «Северсталь». В таблице 3. показаны результаты расчета и экспериментальные замеры деформаций средней части стоек, приведенные к номинальной силе прокатки 10 МН на станину.

Расхождение расчетных и экспериментальных результатов для станин клетки № 2 стана 1700 не превышает 10 %, что является вполне удовлетворительным для инженерных расчетов.

Таблица 3. Деформации стоек станины клетки стана 1700 по результатам расчета и эксперимента для номинальной силы прокатки 10 МН на станину

№ датчика (стойки)	Деформация, расчет, $10^{-5}$	Деформация, Эксперимент, $10^{-5}$
1	6,83	5,92
2	6,83	5,68
3	6,83	6,76
4	6,83	4,83

Результаты расчета, представленные на рис. 5 показывают, что максимальные напряжения, определяющие прочность станины, возникают только в верхней поперечине на поверхности радиусной галтели перехода вертикального отверстия к контактной площадке гайки нажимного винта. Это позволяет для сокращения объема подготовительных и вычислительных работ при поиске и обосновании оптимальных технических решений, обеспечивающих прочность станины, ограничиться рассмотрением только верхней поперечины.

Локальная расчетная модель станины представляет собой шарнирно опертую по линии 1 – 1 верхнюю поперечину (рис. 6). Нагружение по гайке нажимного винта осуществляется распределенной нагрузкой  $p = 49,05$  МПа так же, как и в полной модели станины.

Сопоставление результатов расчета локальной и полной математических моделей показало, что обе модели дают одинаковые распределения напряжений на поверхности радиусной галтели контактной площадки, а максимальные напряжения практически равны (318 МПа и 324 МПа). Совпадение результатов расчета обосновывает возможность использования локальных математических моделей станин для исследования напряженного состояния радиусной галтели контактной площадки.

Максимальные напряжения в радиусной галтели контактной площадки верхней поперечины станины клетки №2 стана 1700  $\sigma_{\text{макс}} = 324$  МПа, эффективная площадь напряженной поверхности  $S = 2767$  мм<sup>2</sup>,  $\lg S = 3,44$ . По графикам рис. 4 для стали 35Л при  $\lg S = 3,44$  предел выносливости при пульсирующем цикле нагружения  $\sigma_0 = 210$  МПа. Запас усталостной прочности



$n = \sigma_0 / \sigma_{\max} = 210 / 324 = 0,65 < 1$ , поэтому образование трещины в галтели R3 верхней поперечины является закономерным.

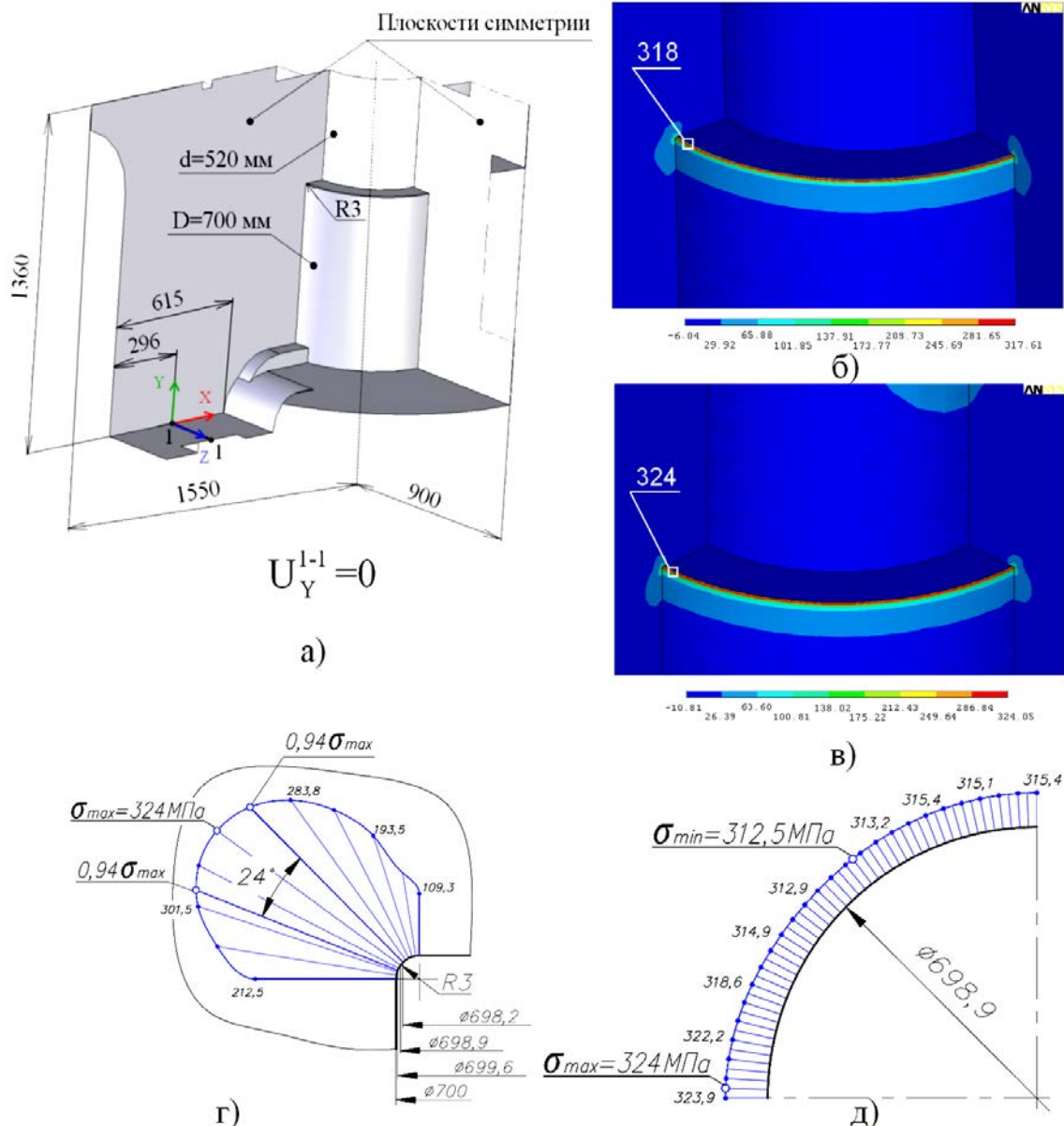


Рисунок 6 – Локальная модель станины клетки №2 стана 1700 и напряженное состояние поверхности радиусной галтели: а – локальная модель станины; б – результат расчета зоны галтели на полной модели станины; в – результат расчета зоны галтели на локальной модели станины; г, д – геометрические параметры напряженного состояния для расчета эффективной площади  $S$

Прогноз прочностной надежности верхней поперечины станины стана 1700 подтвержден результатом натурного исследования зон с высоким уровнем напряжений методами неразрушающего контроля. Усталостная трещина значительной протяженности и глубины обнаружена в радиусной галтели контактной площадки верхней поперечины одной из станин клетки (рис. 7).

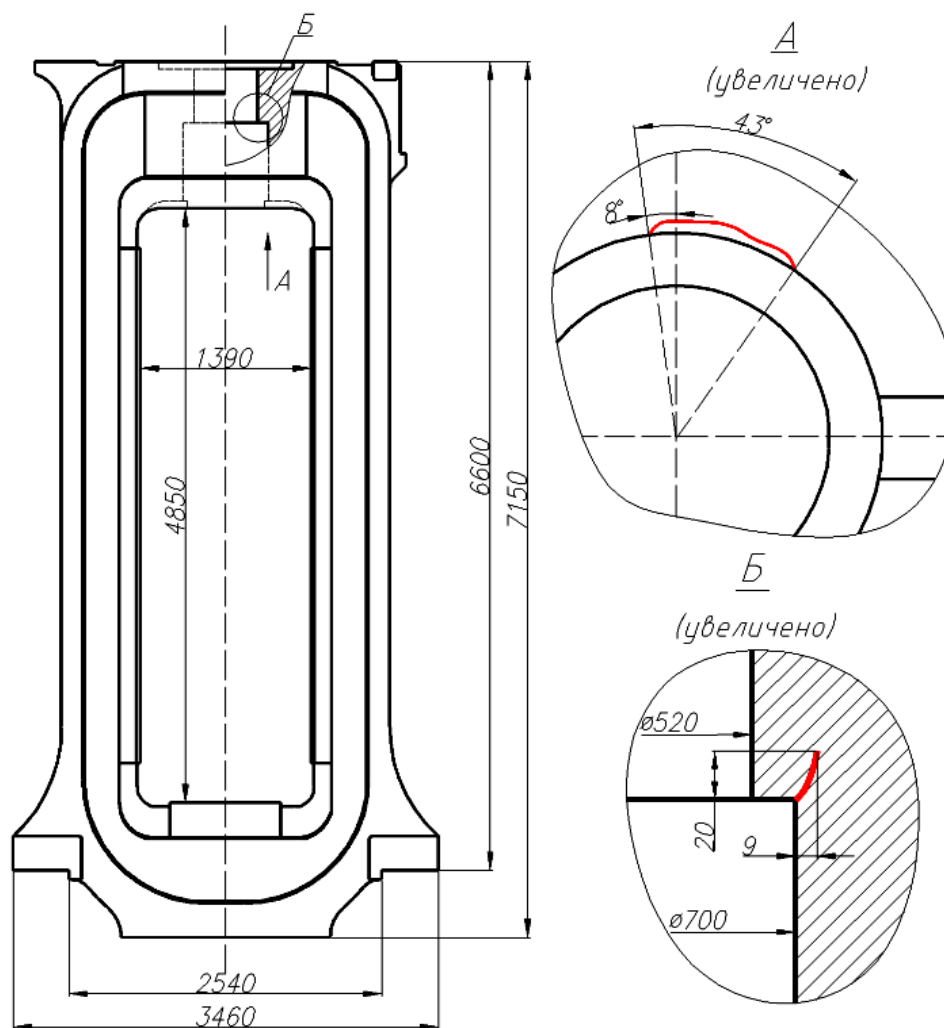


Рисунок 7 – Расположение и размеры трещины в радиусной галтели контактной площадки верхней поперечины станины клетки №2 стана 1700

Расположение и направления роста трещины, показанной на рис. 7, соответствуют местам возникновения и направлениям роста трещин, разрушивших верхние поперечины станин прокатных станов, показанных на рис. 1. Это подтверждает положение о закономерности возникновения трещин в галтелях контактных площадок верхних поперечин и делает необходимым проведение работ по прогнозу и обеспечению прочностной надежности станин клетей действующих прокатных станов.

В **четвертой** главе представлены разработка, исследование и обоснование конструкции верхней поперечины, обеспечивающей безотказную работу станин клетей действующих прокатных станов. По предложенной выше методике проведена оценка запасов усталостной прочности станин прокатных станов, работающих в ПАО «Северсталь» и в ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Результаты исследования станин 7 клетей различных прокатных станов показали, что в станинах 6 клетей максимальные напряжения в радиусной галтели контактной площадки верхней поперечины значительно превышают предел усталостной прочности материала, что делает закономерным образование усталостных трещин и разрушение станин.

Проведены поиск и обоснование конструктивных решений верхней поперечины станины, значительно повышающих запас прочности при минимальных затратах на модернизацию действующих станов. Поставленным требованиям отвечает галтель специальной формы с поднутрением стенки вертикального отверстия верхней поперечины станины под гайку нажимного винта (рис. 8).

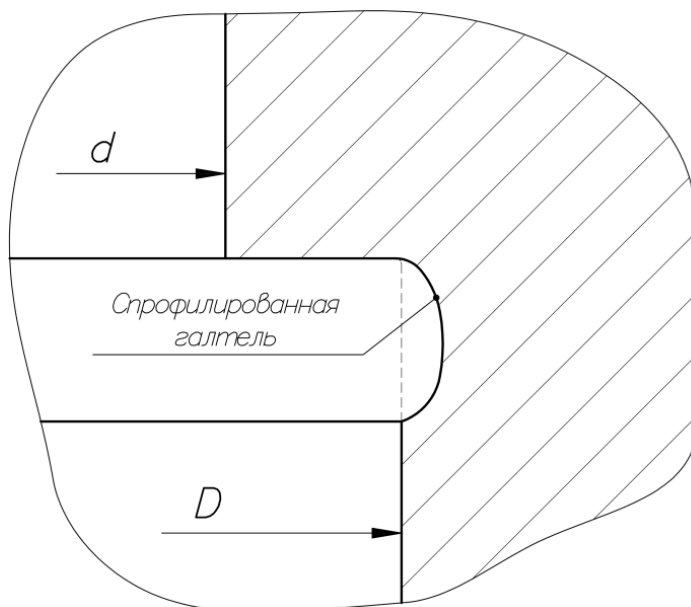


Рисунок 8 – Галтель специальной формы с поднутрением стенки отверстия для установки нажимного устройства

Результаты исследования прочности станин при существующей и предложенной конструкциях галтелей контактных площадок представлены в таблице 4.

Новые конструкции галтелей с поднутрением стенки вертикального отверстия в верхней поперечине снижают уровень максимальных напряжений и повышают запас усталостной прочности станины. Так для станин клетки №2 стана 1700 ПАО «Северсталь» уровень максимальных напряжений снижается с

324 МПа до 110 МПа, а запас усталостной прочности повышается с  $n = 0,65$   $n = 1,77$ .

Таблица 4. Результаты исследования напряженного состояния и прочности станин при существующей и предложенной конструкциях галтелей контактных площадок верхних поперечин станин прокатных станов заводов ПАО «Северсталь» и ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА»

Объект исследования	Макс. сила прокатки $P$ , МН	Существующая конструкция галтели			Новая конструкция галтели		
		$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_{\text{макс}}$ , МПа	Запас прочности, $n$	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_{\text{макс}}$ , МПа	Запас прочности, $n$
ПАО «Северсталь»							
Станины стана 1700	20	210	324	0,65	195	110	1,77
Станины стана 2800	30	200	287	0,70	190	115	1,65
ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА»							
Станины стана 1700 теплой прокатки	30	195	197	0,99	190	83	2,29
Станины стана 2000 холодной прокатки	32	205	349	0,59	190	96	1,98
Станины черновой клетки стана 2000 горячей прокатки	30	195	205	0,95	190	85	2,24
Станины чистовой клетки стана 2000 горячей прокатки	30	195	214	0,91	190	96	1,98
Станины прогладочного стана 2000	10	205	120	1,71	–	–	–

Эти значения максимальных напряжений и запасов усталостной прочности обеспечивают безотказную работу станин без ограничения времени эксплуатации. При увеличении силы прокатки в 1,5 раза максимальные

напряжения и запас усталостной прочности для станин стана 1700 составят  $\sigma_{\text{макс}} = 190 \text{ МПа}$  и  $n = 1,1$ , что также обеспечит длительную безотказную работу станин.

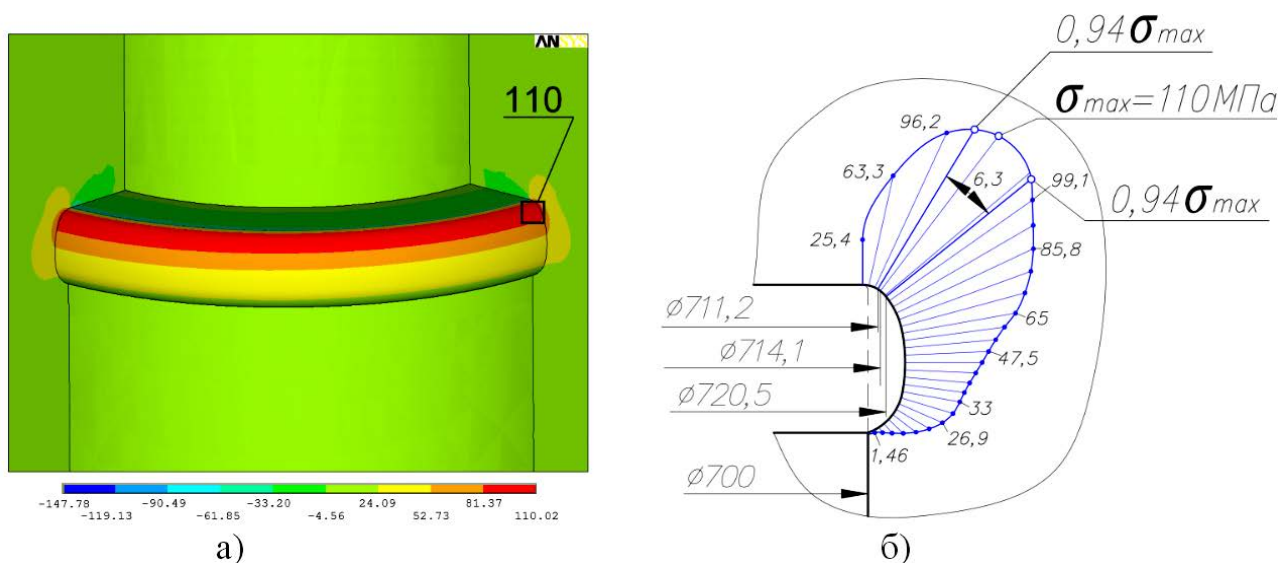


Рисунок 9 – Напряженное состояние поверхности галтели с поднутрением станины клетки №2 стана 1700: а – напряженно деформированное состояние; б – эпюра растягивающих напряжений на поверхности галтели

Изменение геометрии галтели не требует изменения конструкции и первоначальной компоновки деталей нажимного устройства, осуществляется на месте мобильным расточным оборудованием.

Новые конструкции галтелей рекомендованы и приняты к реализации на станинах клеток станков 1700 и 2800 на ПАО «Северсталь» и на станинах клеток станков 1700 и 2000 ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Значительное число разрушений верхних поперечин станин прокатных станков вызвано возникновением и развитием усталостных трещин в радиусных галтелях вертикальных отверстий для нажимных устройств. Это обусловлено тем, что принятые на стадии проектирования методы расчета станин не позволяли определять максимальные напряжения в радиусных галтелях верхних поперечин. Отсутствие таких оценок привело к созданию конструкций, в которых действующие напряжения оказались выше предела усталостной

прочности материала станины.

2. Экспертиза состояния станин действующих прокатных станов, выполнена современными методами исследования напряженного состояния и прочности, развитыми применительно к условиям настоящей задачи. Обоснование расчетных схем, обеспечивающих подобие условий нагружения модели и натуре, проведено сопоставлением результатов расчета с экспериментальными результатами тензометрии стоек станин при реальных процессах прокатки. Расхождение результатов находилось в пределах 10 %, что вполне допустимо при разработке и обосновании технических решений.

3. Результаты экспертизы шести из семи станин клетей прокатных станов ПАО «Северсталь» и ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» дали запасы  $n$  усталостной прочности верхних поперечин в пределах  $n = 0,59 - 0,99$ . В верхней поперечине станины стана 1700 при запасе усталостной прочности  $n = 0,65$  обнаружена усталостная трещина значительной протяженности и глубины. При дальнейшей эксплуатации прогрессивное развитие трещины приведет к «внезапному» разрушению станины.

4. Разработана, исследована и обоснована новая геометрия галтели с поднутрением стенки вертикального отверстия верхней поперечины, обеспечивающая безотказную работу станины, как при проектных, так и при увеличенных в 1,5 раза силах прокатки. Новая галтель контактной площадки верхней поперечины станины сохраняет существующее нажимное устройство, ее выполнение не требует демонтажа-монтажа станины, осуществляется на месте мобильным расточным оборудованием.

5. Новая конструкция галтели контактной площадки верхней поперечины, повышающая прочность станин, рекомендована и принята к реализации на станинах клетей станов 1700 и 2800 ПАО «Северсталь» и на станинах шести клетей прокатных станов ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. Семичев Ю.С. Проведение периодической экспертизы состояния базовых деталей мощных гидравлических прессов – основа обеспечения их длительной безотказной работы / Е.Ю. Раскатов, **Ю.С. Семичев**, И.А. Сурков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2018. – № 9. – С. 37-40; 0,2 п.л./0,1 п.л.
2. Семичев Ю.С. Предупреждение аварий тяжелых металлургических машин, вызванных разрушением их базовых деталей / **Ю.С. Семичев**, И.А. Сурков // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 8. – С. 16-21; 0,3 п.л./0,2 п.л.
3. Семичев Ю.С. О своевременности работ по предупреждению аварий мощных гидравлических прессов, вызванных «внезапным» разрушением базовых деталей / **Ю.С. Семичев**, И.А. Сурков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 10. – С. 29-36; 0,4 п.л./0,3 п.л.
4. Семичев Ю.С. Влияние плотности разбиения на элементы конструктивного концентратора напряжений на точность расчета методом конечных элементов / **Ю.С. Семичев**, И.А. Сурков // Вестник машиностроения. – 2012. – № 11. – С. 39-41; 0,15 п.л./0,1 п.л.
5. Семичев Ю.С. Экспертиза состояния и обеспечение прочностной надежности станин прокатных станов / И.А. Сурков, **Ю.С. Семичев** // Сталь. – 2012. – № 8. – С. 47-49; 0,15 п.л./0,1 п.л.

### **Патенты:**

6. . Пат. 2510298 Российская Федерация, Станина клетки прокатного стана / **Семичев Ю.С.**, Сурков И.А., Тимохин И.В., Бондарь Д.С. Заявл. 20.04.2012, Опубл. 27.03.2014, Бюл. №9.

### **Другие публикации:**

7. Семичев Ю.С. Методика исследования и обеспечение прочности станин клеток действующих прокатных станов /**Ю.С. Семичев** // Механическое

- оборудование металлургических заводов. – 2015. – № 2 (5). – С. 15-22; 0,4 п.л./0,3 п.л.
8. Семичев Ю.С., Сурков И.А. Прогнозирование и обеспечение прочностной надежности станин клетей действующих прокатных станов // Неделя металлов в Москве. Москва. – 2013. – С. 635-647; 0,65 п.л./0,45 п.л.
9. Семичев Ю.С. Прогнозирование и обеспечение прочностной надежности станин клетей действующих прокатных станов / Ю.С. Семичев, И.А. Сурков // Черная металлургия. – 2013. – № 8 (1364). – С. 69-77; 0,5 п.л./0,3 п.л.
10. Семичев Ю.С., Сурков И.А. Прогнозирование и обеспечение прочностной надежности станин клетей действующих прокатных станов // Бюллетень научно-технической и экономической информации Черная металлургия. – 2013. № 8. С. 69-76; 0,4 п.л./0,25 п.л.

Подписано в печать 15.03.2019 г. Формат 60×84 1/16  
Бумага 80 г/м<sup>2</sup>. Цифровая печать.  
Тираж 100 экз. Заказ № 4.

Отпечатано в учебной лаборатории полиграфических машин кафедры  
«Металлургические и роторные машины» ИНМиТ УрФУ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-120