



УДК 621.774

Ю.С. Семичев  
ОАО «Корпорация ВСМПО – АВИСМА»  
г. Верхняя Салда, Россия  
E-mail: Semichev@vsmpro.ru  
Дата поступления 28.10.2015

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СТАНИН КЛЕТЕЙ ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

### Аннотация

Основной причиной разрушения станин клетей прокатных станов является возникновение и развитие трещин усталости в радиусной галтели контактной площадки верхней поперечины. Предложена и обоснована методика исследования напряженного состояния и прочности зон максимальных напряжений станин прокатных станов. Разработана, исследована и обоснована конструкция галтели контактной площадки верхней поперечины с поднутрением стенки отверстия под нажимную гайку. Новая конструкция галтели обеспечивает неограниченную долговечность станин при сохранении существующих конструкции и компоновки деталей нажимного устройства.

**Ключевые слова:** станина прокатного стана, прочность, методы исследования напряженного состояния и прочности, галтель контактной площадки с поднутрением стенки отверстия под нажимную гайку, неограниченная долговечность.

### Введение

По определению академика А.И. Целикова [1] прокатным станом называется машина, которая служит для обработки материалов давлением между вращающимися валками. Сила, создаваемая давлением металла на валки, воспринимается станинами клетки, поэтому, как отмечает Б.А. Морозов [2], именно прочность станины лимитирует производительность прокатного стана. В тоже время, практика эксплуатации показывает, что длительные простои линий производства проката, значительные расходы на ремонт и запасные части связаны с разрушением станин клетей прокатных станов. Во многих случаях тяжесть последствий аварийной ситуации усугубляется внезапностью произошедшего разрушения. «Внезапность» объясняется тем, что конструктивные концентраторы, где возникают максимальные напряжения, превышающие предел усталостной прочности материала, расположены в недоступных для прямого наблюдения местах. В работе [2] отмеча-

ется, что к таким концентраторам напряжений относится радиусная галтель верхней поперечины станины в месте перехода вертикального отверстия к контактной площадке гайки нажимного винта (рисунок 1).

Для предупреждения разрушений, в том числе «внезапных», необходимо дать прогноз надежности станины с установлением запасов усталостной прочности в зонах конструктивных концентраторов. Первым этапом такого прогноза является определение максимальных напряжений с учетом реальной геометрии и условий нагружения станины.

### Основная часть

На основании результатов анализа возможностей различных экспериментальных и теоретических методов исследования напряженного состояния для решения поставленных выше задач был выбран расчет методом конечных элементов (МКЭ), реализованный в программном комплексе ANSYS.

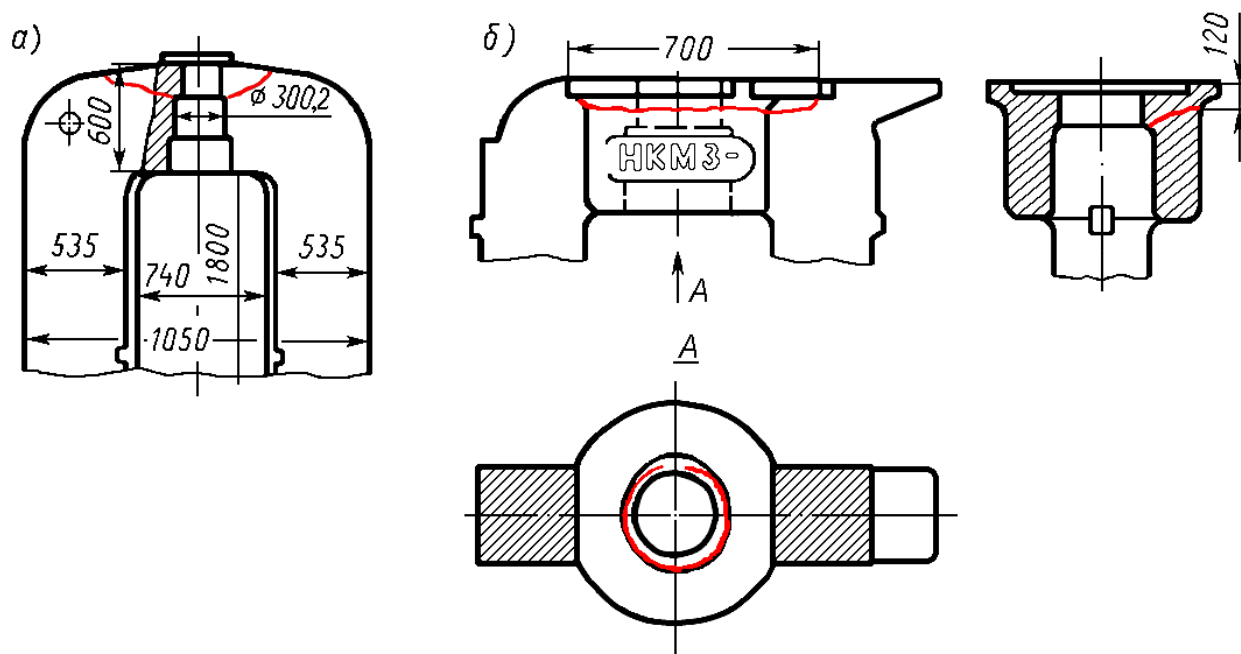


Рисунок 1. Разрушения станин прокатных станов, вызванные возникновением и развитием усталостных трещин в галтели контактной площадки верхней поперечины:  
а - станина непрерывного стана 400; б - станина стана кварто 305

На рисунке 2 показана модель станины клетки №2 стана 1700 ОАО «Северсталь», построенная для проведения расчета на прочность МКЭ. Станина имеет 2 плоскости симметрии, что позволяет представить её модель в виде 1/4 части станины. Нагрузка прикладывается в виде равномерно распределенного давления на нижнюю поверхность гайки нажимного винта (на виде А рисунок 2 гайка нажимного винта не показана) и на контактную поверхность нижней поперечины станины с подушкой нижнего опорного вала. Граничные условия на перемещения накладываются по плоскостям симметрии. Станина клетки выполнена из литой стали 25Л, поэтому для расчета были приняты модуль упругости  $E=2,1 \times 10^5$  МПа и коэффициент Пуассона  $\mu=0,27$ . Сила, приложенная к модели, соответствует максимальной силе прокатки 20 МН, что дает распределенную нагрузку, приложенную к нижнему торцу нажимной гайки  $p = 49,05$  МПа, а в зоне контакта с подушкой нижнего опорного вала  $p = 16,34$  МПа.

Геометрической особенностью станин, которую необходимо специально учитывать при расчетах МКЭ, является весьма значительное различие в размерах зон конструктивных концентраторов. Так радиус

внутренних галтелей сопряжения стоек с верхней и нижней поперечинами  $R_{ст} = 160$  мм, радиус галтели в верхней поперечине станины  $R_{в.поп} = 3$  мм, т.е. радиусы галтелей стоек и в верхней поперечине различаются более чем в 50 раз. Столь существенная разница в размерах концентраторов сделала необходимым проведение специального исследования для установления зависимости точности расчета от плотности конечно-элементной сетки [3]. Результаты исследования показали, что недостаточно обоснованный подход к выбору плотности разбиения конечно-элементной сетки вызывает не только количественное занижение результатов расчета, но, в ряде случаев, приводит к ошибочной оценке технических решений при выборе конструктивных вариантов деталей. Предложенный в работе [3] способ разбиения связывает размер конечных элементов с градиентами напряжений внутри и на поверхности зоны галтели, что дает отклонение 1 - 1.5 % по сравнению с точными аналитическими решениями.

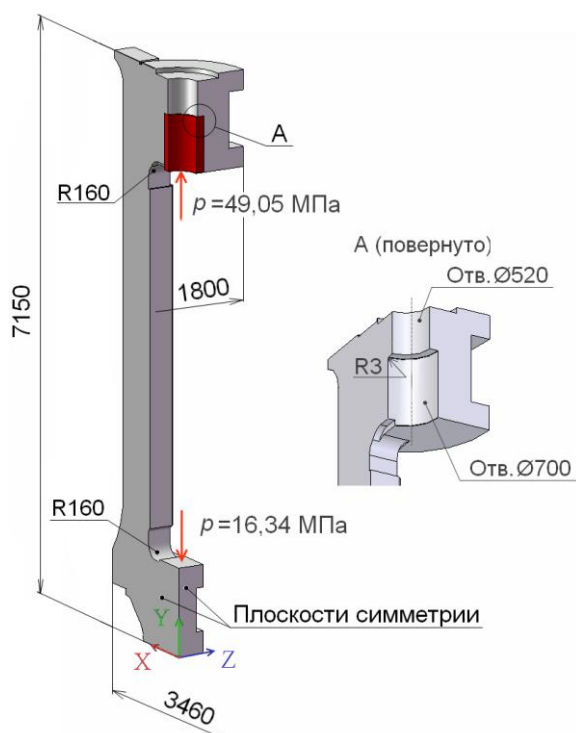


Рисунок 2. Модель станины клетки стана 1700 ОАО «Северсталь»: галтели R3, R160 – места возникновения максимальных напряжений

Результаты расчета математической модели, представленной на рисунке 2, показали, что максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_1$  в галтелях R160 сопряжения стоек с нижней и верхней поперечинами составляют, соответственно, 45 МПа и 55 МПа. В галтели R3 верхней поперечины максимальные напряжения  $\sigma_1 = 318$  МПа. Эта галтель расположена в средней по высоте зоне верхней поперечины вблизи нейтральной линии. В этой зоне изгибающие номинальные напряжения имеют нулевые значения, что позволяет, во-первых, не учитывать влияние изгиба стоек станины на величину напряжений в галтели R3. Во-вторых, значительно сократить объем подготовительных и вычислительных работ, применив для определения напряжений в галтелях верхней поперечины, локальные математические модели верхних поперечин, а не полные модели станин [2].

Проверка обоснованности использования локальных математических моделей проведена по результатам расчета полной модели станины стана 1700 (рисунок 2) и локальной (рисунок 3) модели верхней по-

перечины. Граничные условия на перемещение в математической локальной модели накладываются по плоскостям симметрии верхней поперечины. На узлы, принадлежащие линии 1-1 (проходит через центр масс сечения стойки), наложены ограничения на перемещение вдоль оси Y. Сила, приложенная к локальной модели, соответствует номинальной силе прокатки 20 МН, что дает распределенную нагрузку 49,05 МПа, приложенную к нижнему торцу нажимной гайки (на рисунке 3 не показана). Модуль упругости и коэффициент Пуассона материала станины, задаваемые при расчете математической локальной модели, такие же, как для математической модели полной станины.

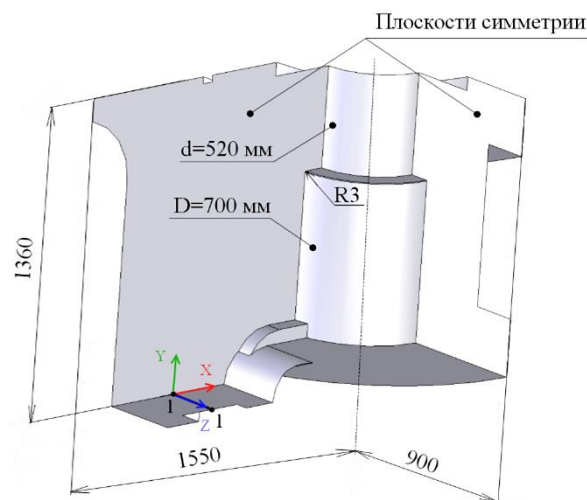


Рисунок 3. Локальная модель верхней поперечины станины стана 1700 ОАО «Северсталь»

На рисунке 4 показаны максимальные напряжения  $\sigma_1$  на поверхности галтели R3 для полной модели станины (а) и локальной модели верхней поперечины станины (б) стана 1700 ОАО «Северсталь» при максимальной силе прокатки 20 МН. Сопоставление результатов показывает, что величины максимальных напряжений в галтели R3 обеих моделей дают практически одинаковые результаты ( $\sigma_1 \approx 320$  МПа). Это обосновывает возможность определения величин максимальных напряжений в верхних поперечинах станин прокатных станков и расчет коэффициентов запаса усталостной прочности на локальных математических моделях верхних поперечин.

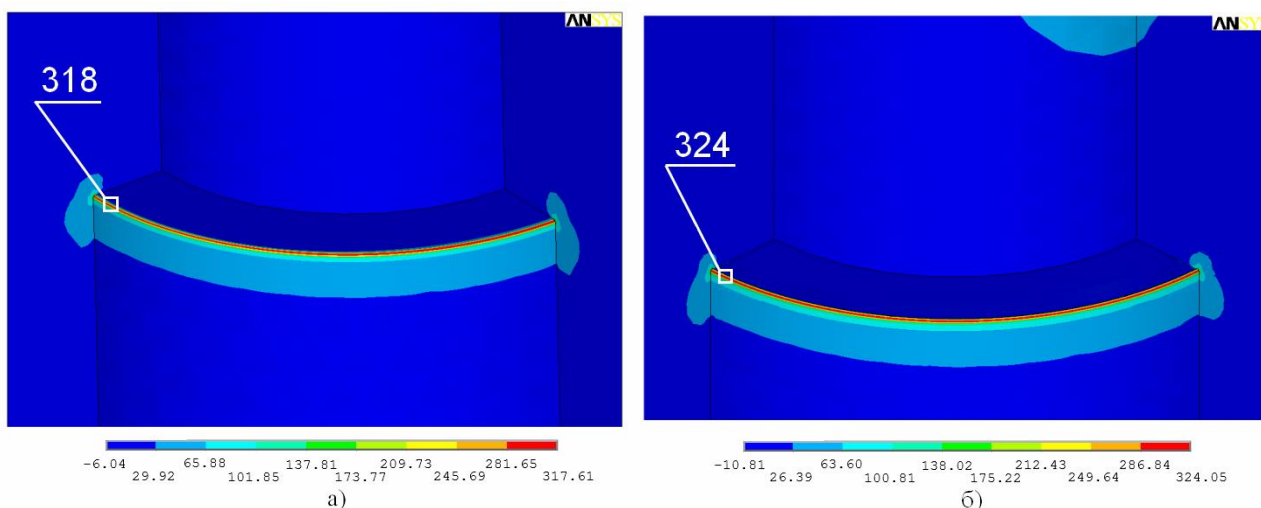


Рисунок 4. Напряженное состояние  $\sigma_1$  (МПа) поверхности галтели R3 в верхней поперечине станины клетки стана 1700: а - полная модель станины; б - локальная модель верхней поперечины

Вторым этапом прогнозирования прочностной надежности станин является определение пределов выносливости материала в зонах возникновения максимальных напряжений.

При оценке усталостной прочности в зонах конструктивных концентраторов, (в нашем случае галтель R3 верхней поперечины) используются эффективные и теоретические коэффициенты концентрации напряжений по отношению к номинальным напряжениям [4]. Но галтель R3 расположена в средней по высоте зоне верхней поперечины вблизи нейтральной линии, где номинальные изгибающие напряжения имеют нулевые значения. Это означает, что теоретические и эффективные коэффициенты концентрации не могут быть определены, и, следовательно, не могут быть применены обычно используемые методы расчета усталостной прочности.

В соответствии с положениями работы [4] сопротивление детали усталостному разрушению определяет эффективная площадь  $S$  поверхности детали, в пределах которой напряжения изменяются от  $\sigma_{\text{макс}}$

до  $0,94 \cdot \sigma_{\text{макс}}$ . В работе [5] получены зависимости, связывающие медианные пределы выносливости при пульсирующем цикле  $\sigma_0$  с эффективной площадью  $S$  детали для кованных сталей 22К, 35, 40, 50 (рисунок 5). Для литой стали 35 получена только одна точка  $\sigma_0 = 190$  МПа при  $\lg S = 4,33$ .

Механические характеристики испытанных сталей и стали 25Л представлены в таблице 1. 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 кованных сталей на 8,5 %, а предел текучести отличается от среднего предела текучести на 9,7 %, т.е. механические характеристики стали 35Л попадают в диапазон механических характеристик кованных 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 исходной берется точка с координатами  $\sigma_0 = 190$  МПа,  $\lg S = 4,33$  (см. рисунок 5).

Таблица 1

Механические характеристики сталей для изготовления крупногабаритных отливок и поковок

| Сталь                | 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 |

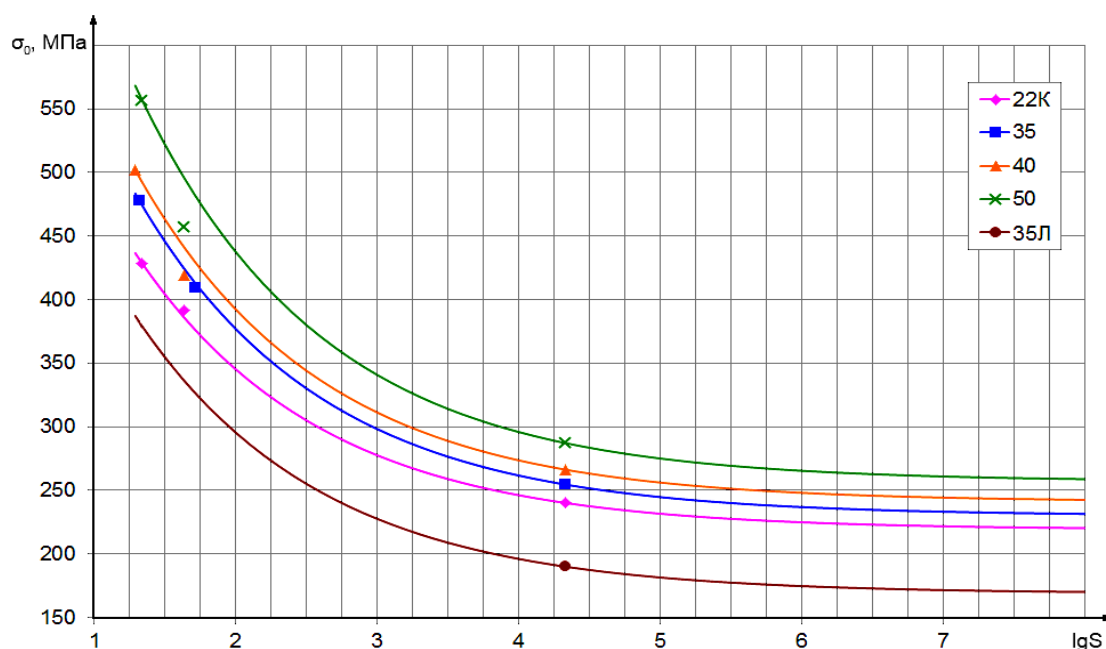


Рисунок 5. Зависимости пределов выносливости сталей 22К; 35; 40; 50; 35Л от эффективной площади  $S$  испытанных образцов

Пределы текучести  $\sigma_{0,2}$  сталей 35Л и 25Л совпадают, а пределы прочности  $\sigma$  различаются на 17 %. Это позволяет для ориентировочных расчетов пределов выносливости стали 25Л в зависимости от площади напряженной поверхности  $S$  использовать зависимость, полученную для стали 35Л.

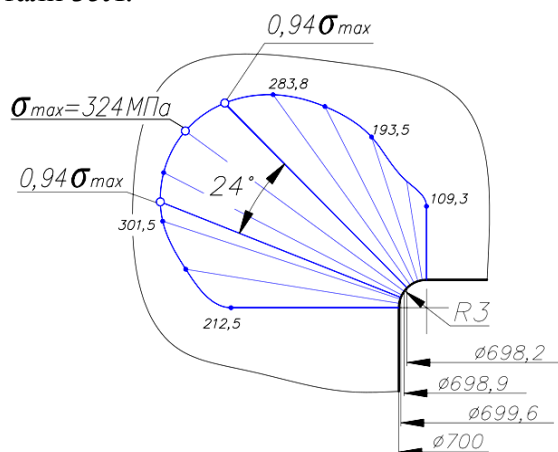


Рисунок 6. Эпюра окружных напряжений по контуру галтели в диаметральном сечении отверстия под гайку нажимного винта

Максимальные напряжения  $\sigma_1$  на поверхности галтели  $R3$  верхней поперечины примерно одинаковы по всей окружности и составляют 324 МПа (см. рисунок 4б). На рисунке 6 показана эпюра окружных напряжений по поверхности галтели в диаметральном сечении отверстия под гайку

нажимного винта. На рисунке 7 приведено распределение максимальных окружных напряжений на поверхности галтели по окружности  $\varnothing 698,9$  мм.

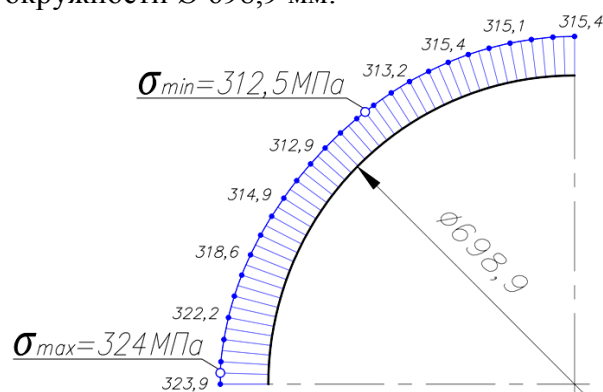


Рисунок 7. Распределение максимальных напряжений на поверхности галтели по окружности  $\varnothing 698,9$  мм

По эпюре (рисунок 6) видно, что в диаметральном сечении изменение напряжений от  $\sigma_{\max}$  до  $0,94 \sigma_{\max}$  происходит на дуге  $24^\circ$ , длина которой равна  $0,42$  радиуса галтели. Из эпюры (рисунок 7) следует, что по окружности  $\varnothing 698,9$  мм максимальные напряжения в галтели изменяются незначительно (от 324 МПа до 313 МПа), поэтому при оценке предела выносливости считаем, что вся окружность галтели находится под воздействием максимальных напряжений  $\sigma_{\max} = 324$  МПа.

Из рисунка 6 видно, что положение точек, в которых напряжение равно  $0,94 \cdot \sigma_{\max}$ , определяется диаметрами  $D_1 = 698,2$  мм и  $D_2 = 699,6$  мм. Тогда площадь эффективной поверхности равна:

$$S = \pi(D_1 + D_2)/2 \cdot (0,42 \cdot R) \quad (1)$$

$S = 3,14 \cdot (698,2 + 699,6)/2 \cdot 0,42 \cdot 3 = 2767 \text{ мм}^2$ ,  $\lg S = 3,44$ . По графику (рисунок 5) для стали 35Л находим, что при  $\lg S = 3,44$  предел выносливости при пульсационном цикле нагружения  $\sigma_0 = 210$  МПа. По рисунку 4,б максимальное напряжение в галтели верхней поперечины  $\sigma_{\max} = 324$  МПа. Так как запас усталостной прочности

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

Для проверки состояния галтели R3 после демонтажа нажимного устройства было проведено обследование галтели методами неразрушающего контроля. Результаты обследования показали, что в галтели R3 верхней поперечины возникла усталостная трещина (рисунок 8). Проекция трещины по вертикали составляет 20 мм, по горизонтали 9 мм. В окружном направлении трещина распространяется на  $43^\circ$ . На поверхности галтели по окружности  $D = 700$  мм трещина проходит по линии действия максимальных напряжений.

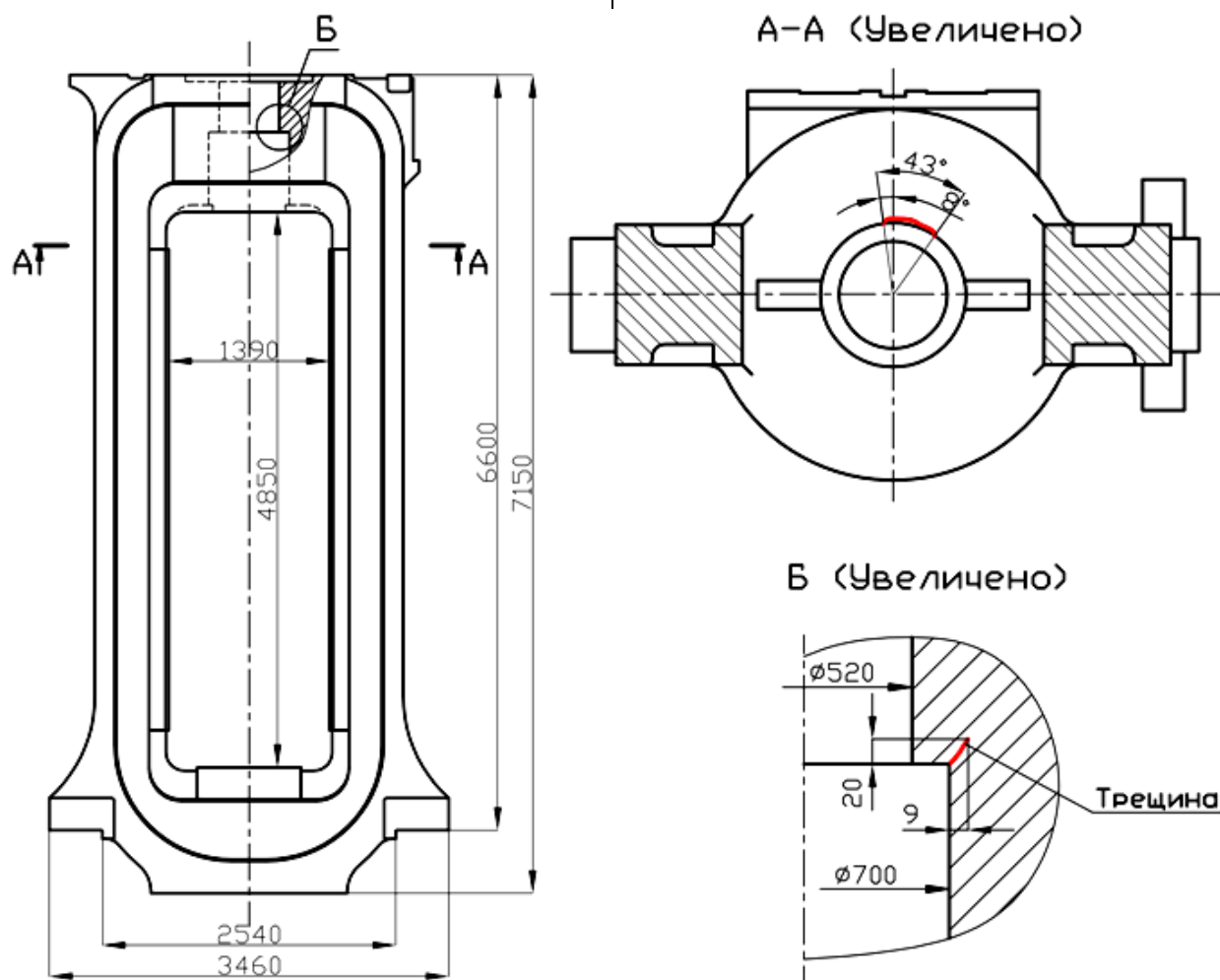


Рисунок 8. Расположение и размеры трещины в галтели R3 верхней поперечины станины клетки №2 стана 1700 ОАО «Северсталь»

Обнаружение усталостной трещины методами неразрушающего контроля подтвердило прогноз о закономерности ее возникновения, сделанный на основании теоретических исследований. Таким образом, представленный выше расчет и его экспериментальное подтверждение показывают, что разработана и обоснована методика прогнозирования прочностной

надежности станин действующих прокатных станов. Это позволяет приступить к систематической экспертизе станин прокатных станов на заводах РФ, находящиеся длительное время в эксплуатации, с целью оценки их фактического состояния.

По представленной выше методике был дан прогноз прочностной надежности станин прокатных станов, работающих на заводах ОАО «Северсталь» и на ОАО «Корпорация ВСППО – АВИСМА». Результаты исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты прогноза прочностной надежности станин клетей прокатных станов металлургических заводов ОАО «Северсталь» и ОАО «Корпорация ВСППО – АВИСМА»

| Объект исследования                                 | Макс. сила прокатки $P$ , МН | Радиус галтели $R$ , мм | $\sigma_{\text{макс}}$ , МПа | $\sigma_0$ , МПа | Запас прочности, $n$ | Возможность образования трещины |
|-----------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------|----------------------|---------------------------------|
| ОАО «Северсталь»                                    |                              |                         |                              |                  |                      |                                 |
| Станины стана 1700                                  | 20                           | 3                       | 324                          | 210              | 0,65                 | Да                              |
| Станины стана 2800                                  | 30                           | 5                       | 287                          | 200              | 0,70                 | Да                              |
| ОАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА»                       |                              |                         |                              |                  |                      |                                 |
| Станины стана 1700 теплой прокатки                  | 30                           | 8                       | 197                          | 195              | 0,99                 | Да                              |
| Станины стана 2000 холодной прокатки                | 32                           | 3                       | 349                          | 205              | 0,59                 | Да                              |
| Станины черновой клетки стана 2000 горячей прокатки | 30                           | 8                       | 205                          | 195              | 0,95                 | Да                              |
| Станины чистовой клетки стана 2000 горячей прокатки | 30                           | 8                       | 214                          | 195              | 0,91                 | Да                              |
| Станины прогладочного стана                         | 10                           | 5                       | 120                          | 205              | 1,71                 | Нет                             |

Результаты, представленные в таблице 2, показывают, что для многих прокатных станов возможны разрушения станин, вызванные возникновением и развитием усталостных трещин в радиусной галтели. Галтель расположена в верхней поперечине станины, в месте перехода вертикального отверстия к контактной площадке станины с гайкой нажимного винта. Поэтому для обеспечения дальнейшей безотказной работы прокатных станов на металлургических заводах РФ необходимо разработать и обосновать технические решения, предупреждающие разрушения станин и обеспечивающие их долговечность без ограничения времени эксплуатации.

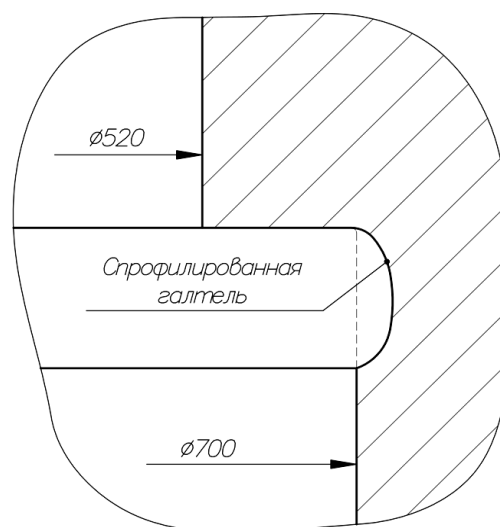


Рисунок 9. Геометрия галтели с поднутрением стенки для верхней поперечины станины клетки №2 стана 1700 ОАО «Северсталь»

Галтель контактной площадки верхней поперечины станины, где возникают максимальные напряжения, расположена в зоне нулевых значений номинальных напряжений от изгиба поперечины. Это дает возможность использовать для уменьшения максимальных напряжений в переходном сечении галтели специальной формы с поднутрением стенки (рисунок 9).

Расчеты показали, что галтель с поднутрением стенки снижает максимальные напряжения в переходном сечении в 2,9 раза с 324 МПа до 110 МПа. Этот уровень напряжений снимает вопрос о прочностной надежности станины и делает возможным ее безотказную работу без ограничения времени эксплуатации. Изменение геометрии галтели не требует демонтажа станины, осуществляется на месте мобильным расточным оборудованием.

Геометрии галтелей с поднутрением стенки рекомендованы для внедрения в станинах действующих прокатных станков заводов ОАО «Северсталь» и ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

### **Заключение**

1. Прокатные станы, работающие на металлургических заводах России, находятся в эксплуатации 30-40 и более лет. С увеличением сроков эксплуатации увеличивается число «внезапных» разрушений станин клеток прокатных станков, которые воспринимают силу прокатки.

2. Для определения причин и предупреждения разрушений станин разработана специальная расчетно-экспериментальная методика исследования напряженного состояния и прогнозирования прочностной надежности станин.

3. Результаты исследований показали, что в радиусной галтели контактной площадки верхней поперечины станины максимальные напряжения превышают предел прочности материала, что делает законо-

мерным возникновение и развитие усталостных трещин. Длительный рост усталостных трещин, оставаясь незамеченным, приводит к «внезапному» разрушению станины и длительному простоя прокатного стана.

4. Разработана, исследована и обоснована новая геометрия галтели верхней поперечины, обеспечивающая повышенную долговечность станин при сохранении существующих конструкции и компоновки деталей нажимного устройства.

5. Выполнение новой геометрии галтели верхней поперечины станины не требует демонтажа-монтажа станины, осуществляется на месте мобильным расточным оборудованием.

### **Библиографический список**

1. Целиков А.И., Смирнов В.В. Прокатные станы. М.: Металлургиздат, 1958. - 432 с.
2. Морозов Б.А. Моделирование и прочность металлургических машин. Машгиз, 1963. - 284 с.
3. Семичев Ю.С., Сурков И.А. Влияние плотности разбиения на элементы конструктивного концентратора напряжений на точность расчета методом конечных элементов // Вестник машиностроения. - 2012. - № 11. - С. 39-41.
4. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. - М.: Машиностроение, 1975. - 488с.
5. Сурков А.И. Вероятностная оценка прочности при переменных нагрузках по медианным пределам выносливости образов различных типоразмеров. // Проблемы прочности. 1982, № 12. С. 42-51.
6. Гохберг П.М., Пылайкин П.А., Юшкевич В.И. Усталостная прочность сталей для прессов // В сб. Производство крупных машин. — М.: Машиностроение, 1971. С. 10-34.