

А. К. Воробьёв, аспирант, **Е. А. Зуев**, аспирант
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва; ООО «Надёжность ТМ», г. Москва.
Тел./Факс: +7 (999) 9875731; E-mail: VorobyevAK93@gmail.com, ZuevEuA@gmail.com

ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЙ ГЛАВНЫХ ЦИЛИНДРОВ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ ДЛЯ ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

В статье описаны причины возникновения и развития трещин в галтелях днищ гидроцилиндров мощных гидравлических прессов. Приведены результаты расчета напряженно деформированного состояния в программе для конечно элементного анализа. Проведена теоретическая оценка снижения напряжений в области галтели, по средству создания поднутрения, с целью получения более плавного перехода, между стенками и днищем. Выдвинуто предположение об обнаружении нового, влияющего на зарождение трещин, фактора, связанного с гидроударом в момент напыления цилиндра.

Ключевые слова: гидравлический цилиндр, галтель днища, усталостное разрушение, зарождение трещин, напряженно-деформированное состояние.

A.K. Vorobyev, E.A. Zuev

REASONS FOR DESTRUCTION OF HYDRAULIC PRESS CYLINDERS AND TECHNICAL DECISIONS TAKEN TO RESOLVE THIS PROBLEM

The article describes the causes of the occurrence and development of cracks in the fillet bottoms of the hydraulic cylinders of powerful hydraulic presses. The results of calculating the stress-strain state in a program for finite element analysis are presented. A theoretical assessment of the reduction of stresses in the fillet region was carried out, by means of creating an undercut, in order to obtain a smoother transition between the walls and the bottom. An assumption has been put forward that a new factor affecting the initiation of cracks is discovered that is associated with water hammer at the time of spraying of the cylinder.

Keywords: hydraulic cylinder, bottom fillet, fatigue failure, crack nucleation, stress-strain state.

1. Введение.

Текущий опыт эксплуатации показывает, что наибольшее число отказов мощных гидравлических прессов с наиболее тяжелыми последствиями связано с разрушениями и повреждениями базовых деталей. С увеличением времени эксплуатации число отказов увеличивается, поэтому для осуществления возрастающих производственных требований необходимо существенно увеличить прочность базовых деталей. В настоящей статье будут рассмотрены причины разрушения главных цилиндров гидравлических прессов, а также некоторые способы для их предотвращения.

2. Характерные случаи разрушений главных цилиндров.

Появление и рост усталостных трещин в галтелях днищ цилиндров является одной из основных причин отказов и разрушения крупных цилиндров мощных гидравлических прессов при воздействии циклической нагрузки. Практика обслуживания и обследования формовочных прессов показала, что цилиндры, изготовленные из стали 35, разрушаются по трещинам в галтели днища так же, как цилиндры, изготовленные из стали 25 ГС, приведенные на рисунке 1. Более подробно, эта тема освещена в публикации материалов конференции «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» [1].

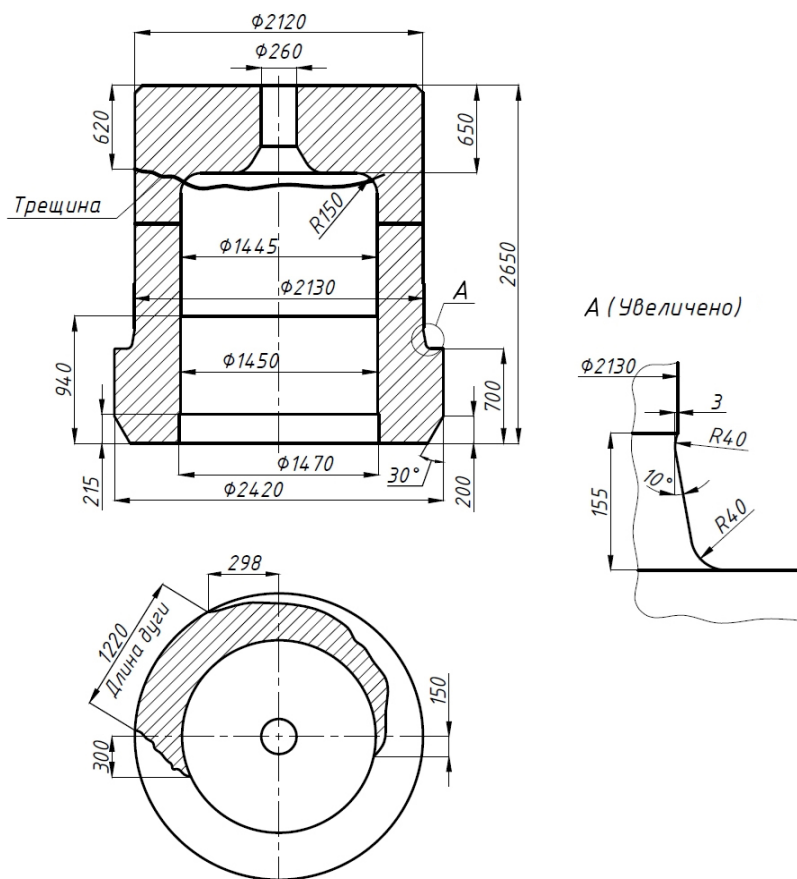


Рисунок 1 Схемы разрушения цилиндра силой 50 МН по трещине в галтели дна

Конструкционная качественная углеродистая сталь 35 используется для изготовления продукции невысокой прочности, работающей с небольшими напряжениями – цилиндры, колонны прессов, оси, коленчатые валы, тяги, траверсы, другие детали. Сталь 35 имеет предел текучести $\sigma_T=315 \text{ МПа}$.

Сталь 25 ГС конструкционная низколегированная используется для сварных конструкций. Предел текучести $\sigma_T=275 \text{ МПа}$. Свойства стали 25ГС зависят от вида термообработки, температуры отпуска и сечения. Важным отличием стали 25ГС от стали 35 является хорошая свариваемость. Сварку можно проводить без предварительного нагревания, любыми методами, без термообработки швов. Таким образом, применение стали 25 ГС является экономически более целесообразным.

Отдельно следует отметить, что обследование ряда прессов после ремонта, в ходе которого трещины в гидроцилиндрах устраняются сваркой и сварочный материал имеет предел текучести 450 МПа, наблюдается разрушение гидроцилиндров в области галтели непосредственно по сварному шву.

Для определения причин разрушения цилиндров проведен их расчет МКЭ [1]. Напряженное состояние главных цилиндров формовочных прессов силой 35 МН и 50 МН представлено на рис. 2, максимальные главные напряжения σ_{1v} в галтелях дна цилиндров равны, соответственно 140,1 МПа и 130,5 МПа.

В гидроцилиндрах, произведённых из разных сталей, усталостные трещины всегда появляются в одной и той же зоне, с равной величиной максимальных эквивалентных напряжений. Это значит, что причину появления трещин усталости и

разрушения днищ цилиндров определяет материал, а вероятно, технология изготовления днищ, которая была одинаковой для различных марок стали.

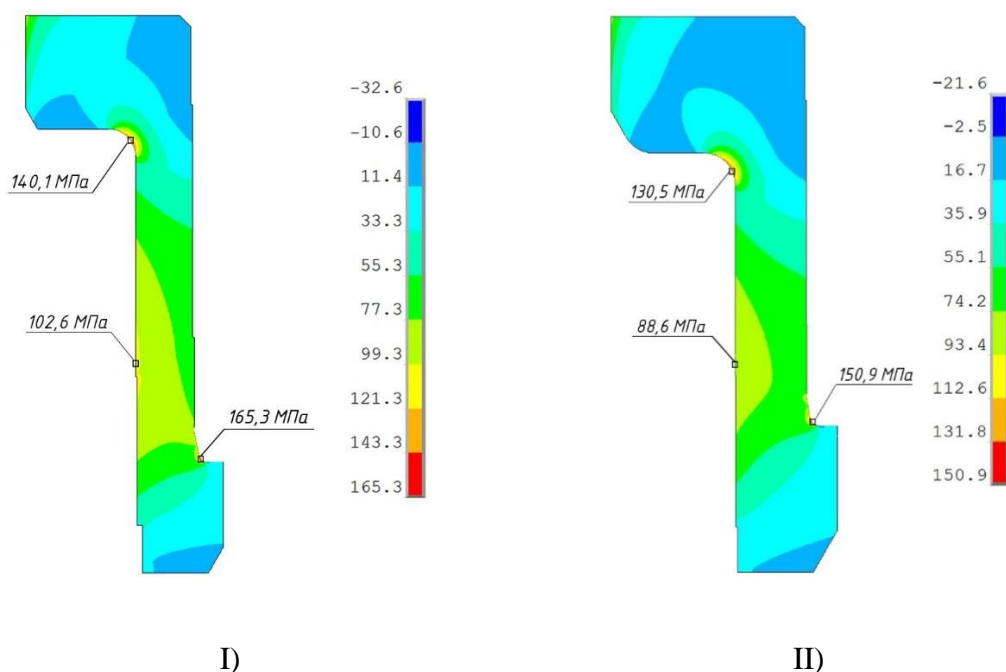


Рисунок 2. Напряженное состояние цилиндров усилием 35 МН и 50 МН, изготовленных из стали 35: I – гидроцилиндр усилием 35 МН; II – гидроцилиндр усилием 50 МН

Отчёт о влиянии причин разрушения днищ цилиндров с принятой технологией проковки заготовок доказывают результаты проведённых усталостных испытаний. Вес заготовки слитка около 79 тонн в полтора раза больше веса слитка днища, равного 57 тоннам, значит при одних и тех же условияхковки интенсивность проработки и предел выносливости материала днища должны быть больше, чем материала обечайки. Но предел выносливости днища в зоне галтели составляет $\sigma_{0\text{дн}} \leq 130\text{МПа}$, а обечайки $\sigma_{0\text{рад}} = 235\text{-}250\text{МПа}$.

Предложенная, более интенсивная технология проковки заготовки днища цилиндра, существенно увеличивает предел выносливости галтельной зоны. Однако, максимальные напряжения в галтели будут выше, чем максимальные напряжения на внутреннем контуре обечайки. Так для гидроцилиндра усилием 35МН и 50МН максимальные эквивалентные напряжения на контуре галтели днища в полтора раза больше, чем аналогичные напряжения на внутреннем контуре обечайки (рисунок 2). Это, в общем случае, сильно снижает запас прочности цилиндра по усталости и при коррозионном воздействии рабочей жидкости, или за счет случайных повреждений поверхности галтели, приводит к возникновению трещин усталости и разрушению цилиндра.

Значительное снижение максимальных напряжений в галтели достигается её заглублением в днище гидроцилиндра с увеличением радиуса галтели [3]. Максимальные напряжения в галтели уменьшаются в 1.4 раза, со 140.1 до 103.4 МПа для гидроцилиндра усилием 35 МН и со 130.5 МПа до 95.2 МПа для гидроцилиндра усилием 50МН (рисунок 3). Эти значения максимальных напряжений практически совпадают с напряжениями, действующими на внутреннем контуре обечайки, и обеспечивают неограниченную долговечность внутренней поверхности цилиндра даже при

использовании воды в качестве рабочей жидкости [4]. Однако перевод на другую рабочую жидкость, может отрицательно сказаться на других узлах работы гидравлического оборудования.

Гидроцилиндры, днища которых произведены с применением приведенных выше предложенных конструктивно–технологических решений, функционируют в гидравлических прессах на линии производства железнодорожных колес на Выксунском Metallургическом Заводе с 2005 года. Эта линия выпускает порядка 820 тысяч железнодорожных колес в год, что является мировым рекордом производительности для мощных гидравлических прессов. За пятнадцать лет эксплуатации, возникновения трещин в галтелях днищ цилиндров не зафиксировано.

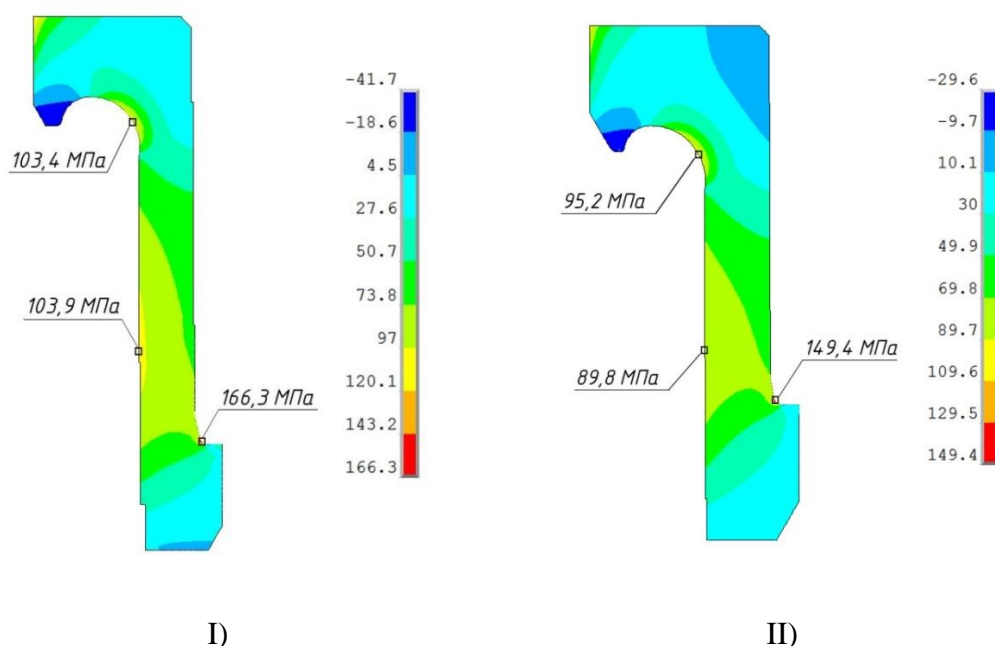


Рисунок 3 Напряженное состояние внутренней поверхности гидроцилиндров усилием 35МН и 50МН при предложенной конструкции галтелей днища:

I – гидроцилиндр усилием 35МН; II – гидроцилиндр усилием 50МН

3. Теоретическая оценка влияния динамического давления жидкости.

Еще одним фактором, влияющим на появление и развитие трещин в галтелях, является не равномерное распределение давления при заполнении гидроцилиндра. При подаче давления, в рабочем объеме цилиндра происходит гидроудар, в результате которого давление на стенках возле поверхности плунжера, оказывается выше, чем давление в галтели днища, особенно в случаях, когда траверса находится в нижнем положении (лежит на заготовке) и между днищем и плунжером расстояние больше внутреннего диаметра цилиндра, что подтверждается моделированием (рис. 4).

Из сосуда высокого давления в цилиндр с атмосферным давлением подается несжимаемая жидкость (вода) с максимальным давлением равным 320 МПа. В момент открытия клапана наполнения, расход на входе в цилиндр, достигает 400 литров в секунду.

Постановка задачи по моделированию распределения потока воды в рабочей области, а также алгоритм проведения исследования в среде «SOLIDWORKS Flow Simulation» включают в себя определение граничных условий на входе в гидроцилиндр,

задание свойств жидкости, начальной скорости и температуры [5]. Выбирается нестационарный тип задачи, а в качестве цели исследования, при которой программа завершает расчет, задается установившееся среднее давление на стенках и днище цилиндра.

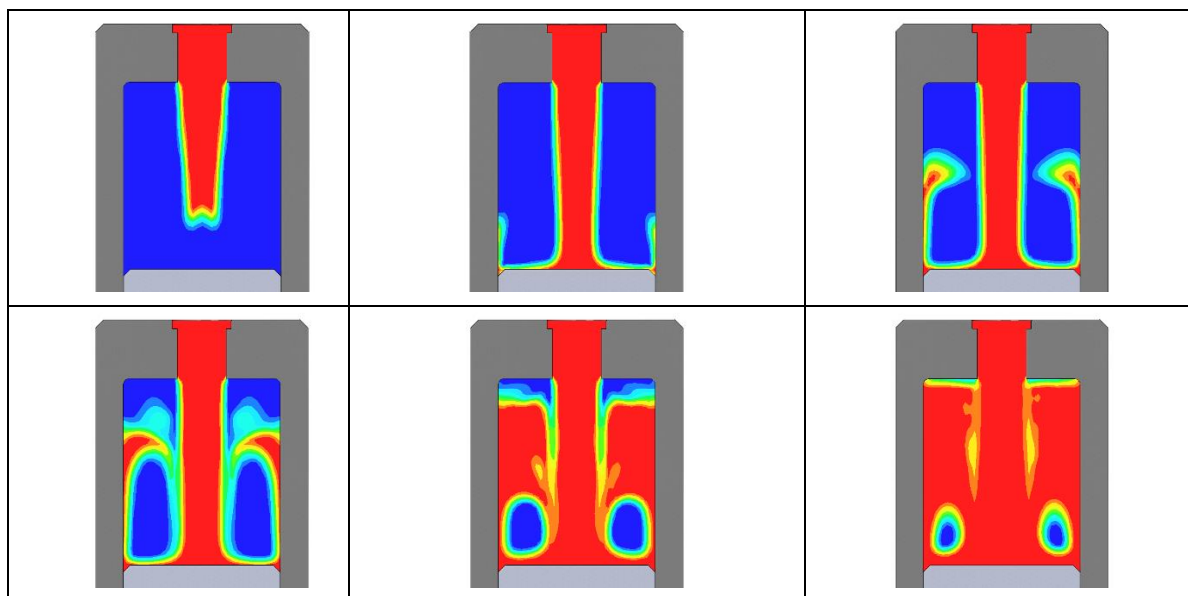


Рисунок 4. Динамическое давление жидкости при наполнении, МПа

На рисунке 4 показано распределение динамического давления в зависимости от времени, из которого видно, что давление имеет иной характер распределения, который влияет на напряженно-деформированное состояние, стенок и днища цилиндра.

Возникает вопрос, насколько влияет кратковременное распределение давления на значение напряжений в галтели. Для ответа на этот вопрос, предлагается провести замеры напряженно-деформированного состояния стенок цилиндра по всей длине, при помощи электротензометрического исследования [6]. Анализ состояния конструкции и прогнозирование количества циклов до отказа, на основании электротензометрии, можно провести на основе докторской диссертации Суркова А.И. [7].

Для проведения исследования напряженно-деформированного состояния на действующем оборудовании, необходимо определить точки установки датчиков, где анализ методом конечных элементов показывает характерное изменение НДС, а так же расположение таких мест позволяет без проблем для производства, смонтировать исследовательское оборудование и проводить замеры в течении нескольких полных циклов штамповки заготовок.

4. Заключение

Максимальные эквивалентные напряжения, определяющие технологическую функцию гидроцилиндров, обычно не более 130 МПа. Такой уровень напряжений может обеспечивать практически неограниченную долговечность цилиндров и работу всей гидравлической системы в целом, при соблюдении общих рекомендаций к работе на производстве. Разрушения гидравлических цилиндров, случившиеся вследствие развития трещин усталости в галтели днища, обусловлены конструктивно-технологическими ошибками, допущенными при создании или даже при проектировании цилиндров. Однако, не менее значительное влияние на распределение давления в момент за-

полнения гидроцилиндра рабочей жидкостью, может оказывать гидроудар. Таким образом характер нагружения цилиндра имеет более сложный вид распределения давления, чем в установившемся режиме. Такие кратковременные скачки напряжений, могут вызвать зарождение или срагивание трещин.

Поэтому, при проведении плановых ремонтов, рекомендуется контролировать гидроцилиндры методами неразрушающего контроля. Что позволит значительно уменьшить риск аварийной остановки оборудования и избежать значительных финансовых затрат. Технология обследования подобных гидроцилиндров методом УК более подробно изложена в статье [8].

Методы обследования, расчёта и прогнозирования надёжности машиностроительного оборудования, упомянутые в этой статье, внедрены и используются в компании «Надёжность Тяжёлых Машин», специализирующейся на экспертизе, ремонте и контролю механических и гидравлических прессов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Воробьёв, А. К. Характерные случаи разрушений главных цилиндров, причины разрушений и технические решения, принятые для их предупреждения / А.К. Воробьёв, А.М. Грибков, И.А. Зюбин // XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропнеумоагрегаты» (Москва, 4 декабря 2019 г.). Материалы конференции – М.: Мир науки, 2019. – С. 114-118.

2. Волков, А. Ю. Выбор метода расчёта напряженно-деформированного состояния гидравлических прессов / А. Ю. Волков, А. К. Воробьёв, Е. А. Зуев // Научный журнал. – 2018. – № 9 (32). – 30-33 с.

3. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин / И. А. Биргер, Г. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1977. – 230 с.

4. Кубачек, В. В. Совершенствование технологии изготовления гидроцилиндров прессов для колесопрокатных цехов. Гидропрессовое оборудование, выпускаемое «ПО «УКРАЛМАШ» и проблемы его создания / В. В. Кубачек, Р. С. Фазильяхметов, Н. Н. Александрова, П. П. Карпов. – Свердловск. – 1988. – С. 52 - 59.

5. Соловьева, А. А. Моделирование распределения водного потока в программном комплексе «SOLIDWORKS Flow Simulation», Материалы I международной научно-практической конференции «Научный потенциал молодежи и технический прогресс» 2018. – С. 21 – 23.

6. Зуев, Е. А. Определение напряженно-деформированного состояния колонн гидравлических прессов методом электротензометрии / Е. А. Зуев, М. Н. Зуева // Справочник. Инженерный журнал. – Издательский дом «Спектр», 2019. – №08(269) август 2019. – С. 27 - 30.

7. Сурков, А. И. Разработка теории прогнозирования и конструктивное обеспечение надёжности базовых деталей уникальных гидравлических штамповочных прессов: дис. ... докт. техн. наук. / А. И. Сурков. – Москва: Библиотека МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1985. – 420 с.

8. Капускин, Ю. И. Контроль методом ультразвуковой дефектоскопии рабочих цилиндров мощных гидравлических прессов / Ю.И. Капускин, А. П. Моисеев, И. А. Сурков, И.В. Тимохин // В мире НК. – 2009. – № 3. – С. 22-24.

Поступила в редколлегию 31.01.2020 г.