

УДК 621.73.06

Разработка и внедрение комплекса научно - производственных решений для увеличения количества и повышения качества продукции на примере пресса усилием 100 МН УЗТМ

Сурков Иван Александрович

Кравцов Никита Сергеевич

info@nadezhnost.com

ООО «Надежность ТМ», Москва, Россия

Аннотация. Проведен анализ причин разрушения подвижной траверсы штамповочного пресса усилием 100 МН, входящего в состав колесопрокатного стана. Исходя из результатов прочностного расчета, данная траверса обладает неограниченной долговечностью при работе оборудования в рамках проектных режимов эксплуатации. Согласно выдвинутой гипотезе причиной образования трещин послужило изменение условий контакта между сопряженными поверхностями подвижной траверсы и штампо-держателя в результате износа. По результатам измерительного контроля, проведенного контактным методом при помощи лазерного трекера, получены облака точек, характеризующие фактическую форму каждой из поверхностей сопряженных деталей. Для проведения конечно-элементного расчета полученные облака точек совмещались с трехмерными моделями контактирующих деталей с целью получения условий контакта максимально приближенных к натурным. На основании прочностного расчета конструкции с учетом фактических контактных условий обосновано образование усталостных трещин в следствие увеличения уровня действующих напряжений, связанного с уменьшением пятна контакта. Определение причин возникновения разрушений в корпусе подвижной траверсы позволило разработать техническое решение, способствующее повышению долговечности конструкции. Описана методика, позволяющая добиться снижения интенсивности формоизменения за счет наплавки контактных поверхностей износостойкими материалами с последующей механической обработкой мобильным фрезерным комплексом.

Ключевые слова: гидравлический пресс, износ контактных поверхностей, конечно-элементный анализ, напряженно-деформированное состояние, долговечность, усталостная прочность

Discretization of the computational model of a movable press traverse, taking into account the conditions of contact interaction with an instrument for studying its stress-strain state

Surkov Ivan Alexandrovich

Kravtsov Nikita Sergeevich

info@nadezhnost.com

LLC Nadezhnost TM, Moscow, Russia

Abstract. The paper analyzes the causes of destruction of the movable traverse of the forming press with a force of 100 MN. However, based on the results of the finite element calcu-

lation, the traverse has unlimited durability. According to the hypothesis put forward, the reason for the destruction was the shape change of the contact surfaces of the movable traverse and the stamp holder during operation as a result of wear. According to the results of the measurement control carried out by the contact method using a laser tracker, a point cloud was obtained. The point cloud characterizing the actual shape of the surfaces of the mated parts. Based on the finite element calculation of the structure, taking into account the actual contact conditions, the formation of fatigue cracks as a result of an increase in the level of operating stresses is justified. Determining the causes of damage in the structure made it possible to develop a technical solution that helps to increase the durability of the structure. A technique is described that allows to reduce the intensity of wear by surfacing the contact surfaces with wear-resistant materials with subsequent machining.

Keywords: hydraulic press, wear of contact surfaces, finite element analysis, stress-strain state, durability, fatigue strength

Введение. Базовые детали мощных гидравлических прессов в большинстве своем работают в условиях циклических нагрузок. Как известно, длительное циклическое воздействие приводит к постепенному накоплению в металле повреждений, приводящих к возникновению дефектов в виде усталостных трещин. Основную роль в зарождении и развитии трещин по механизму усталости играет величина и распределение максимальных растягивающих напряжений, действующих в теле детали. Если величина главных растягивающих напряжений превышает предел усталости материала, из которого изготовлена деталь, то неизбежно в ее конструкции начнутся процессы зарождения и развития трещин при достижении порядка двух миллионов циклов нагружения. Однако на практике зафиксированы случаи разрушения деталей, обладающих согласно результатам прочностных расчетов неограниченной долговечностью. Определение причин данных разрушений и исследование факторов, оказывающих влияние на процесс зарождения трещин в конструкциях кузнечных прессов, позволит разработать технические решения, которые позволят снизить риск последующих отказов. Вопрос разрушения базовых деталей гидравлических прессов исследован в работах [1–6].

Работа кузнечно-прессового оборудования в условиях циклического нагружения неразрывно связана с развитием процессов износа контактных поверхностей сопрягаемых деталей. Частота циклов нагружения, высокие температуры протекания технологического процесса, попадание мелких абразивных частиц и влаги в пространство между сопрягаемыми деталями, недостаточное усилие прижима деталей друг к другу — все это оказывает влияние на интенсивность протекания процессов износа. Исследование влияния процессов износа на долговечность базовых деталей металлургического оборудования рассмотрено в работах [7, 8].

Стоит отметить, что изнашивание отдельных деталей в узле приводит к работе оборудования в непроектных режимах эксплуатации, что, в свою очередь, может стать причиной внезапного отказа. К примеру, износ контактных поверхностей тяжело нагруженных деталей может привести к изменению условий их контактного взаимодействия, что, в свою очередь, ведет

к перераспределению напряжений, действующих в конструкции. Рост напряжений выше допустимого значения влечт за собой риск образования в конструкции усталостных трещин.

На производстве нередко случаются внезапные отказы, связанные с появлением трещин в базовых деталях, которые приводят к незапланированным простоям оборудования. На практике ремонт подобного рода дефектов обычно производится без проведения анализа причин их образования. Выявление закономерностей, приводящих к появлению трещин в конструкциях прессов, позволит разработать технические решения для увеличения долговечности базовых деталей.

Постановка задачи исследования. Объектом исследования является узел «подвижная траверса – штамподержатель» гидравлического штамповочного пресса усилием 100 МН (рис. 1). Данный пресс входит в линию по производству железнодорожных колес. Производственная линия включает в себя четыре пресса, рабочие усилия которых составляют 35, 50, 100 и 20 МН, а также горизонтальный колесопрокатный стан. В течение года базовые детали прессов колесопрокатной линии воспринимают порядка 800 000 нагружений. Таким образом, в случае возникновения в конструкциях базовых деталей пресса напряжений, превышающих предел усталостной прочности, процессы зарождения и роста усталостных трещин могут проявиться уже за три года эксплуатации.

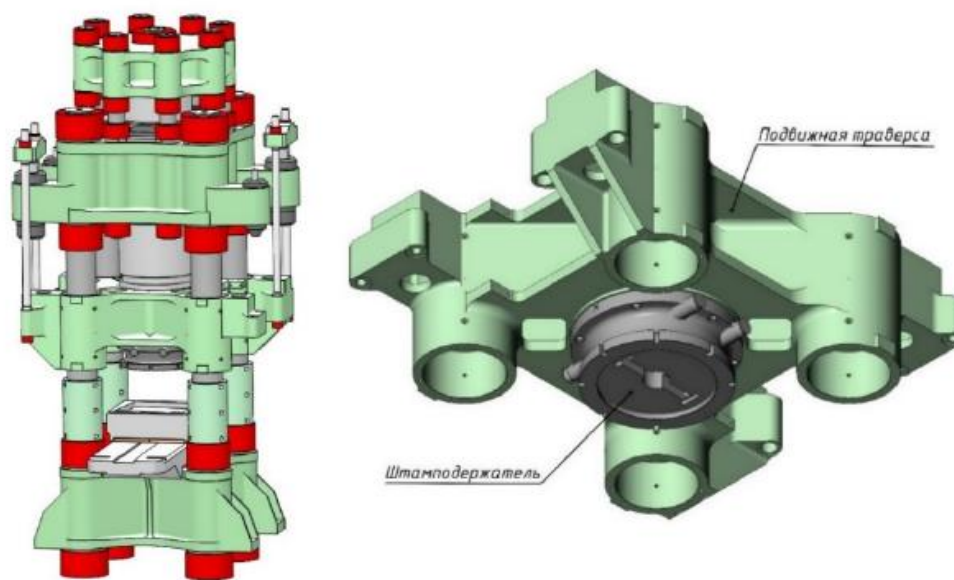


Рис. 1. 3D-модель пресса усилием 100 МН и подвижной траверсы со штамподержателем

Поводом для проведения исследования напряженно-деформированного состояния послужил факт обнаружения трещин в нижней плите корпуса подвижной траверсы при ее осмотре в период планово-предупредительного ремонта в 2023 г. Методика расчета базовых деталей гидравлических прессов представлена в работах [9, 10].

Схема расположения обнаруженных трещин и их размеры представлены на рис. 2, фотографии трещин — на рис. 3. Трещины образовались на кромках технологических отверстий, которые являются традиционными концентраторами напряжений в конструкциях подобного рода. Однако анализ результатов конечно-элементного расчета конструкции траверсы при нагружении прессы номинальным усилием дает основание утверждать, что данная деталь обладает неограниченной долговечностью при ее эксплуатации в рамках проектных режимов работы оборудования. Следовательно, необходимо определить причины, которые привели к работе данного узла вне проектных режимов эксплуатации оборудования, что, в свою очередь, спровоцировало возникновение трещин в корпусе подвижной траверсы.

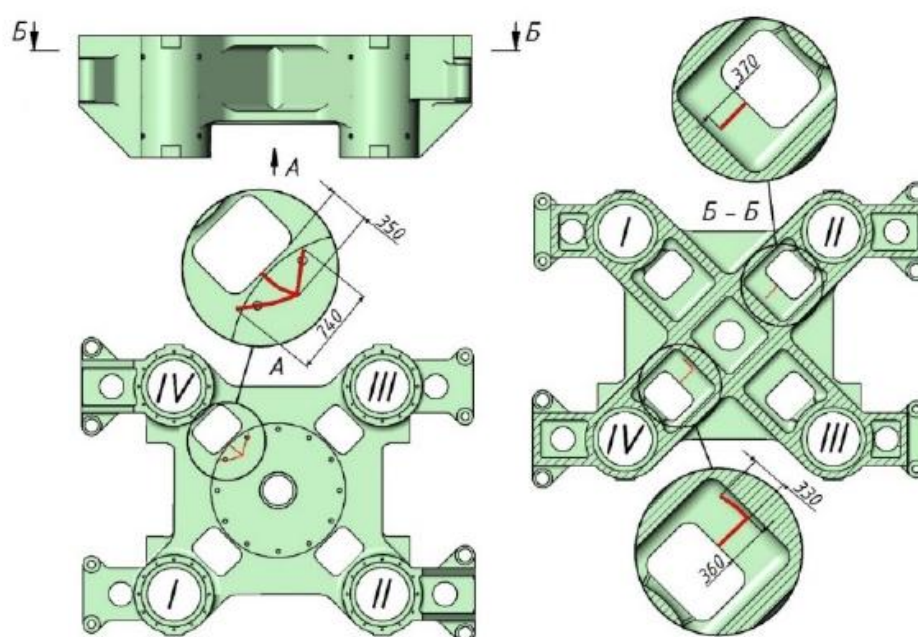


Рис. 2. Схема расположения и размеры трещин в корпусе подвижной траверсы



Рис. 3. Фотографии обнаруженных трещин

Результаты исследований. Расчетная схема, использованная для определения напряженно-деформированного состояния траверсы, представлена на рис. 4. На поверхность плунжера приложено силовое воздействие в виде рабочего давления прессы, значение которого составляет 32 МПа. Граничным условием, примененным к нижней поверхности подштамповой плиты, является ограничение вертикального перемещения. Таким образом, данная расчетная схема соответствует, схеме нагружения деталей при осуществлении технологического процесса штамповки заготовки. На схеме через U обозначено перемещение, через p — давление. Добавление символа z в качестве нижнего индекса указывает направление в соответствии с глобальными осями координат.

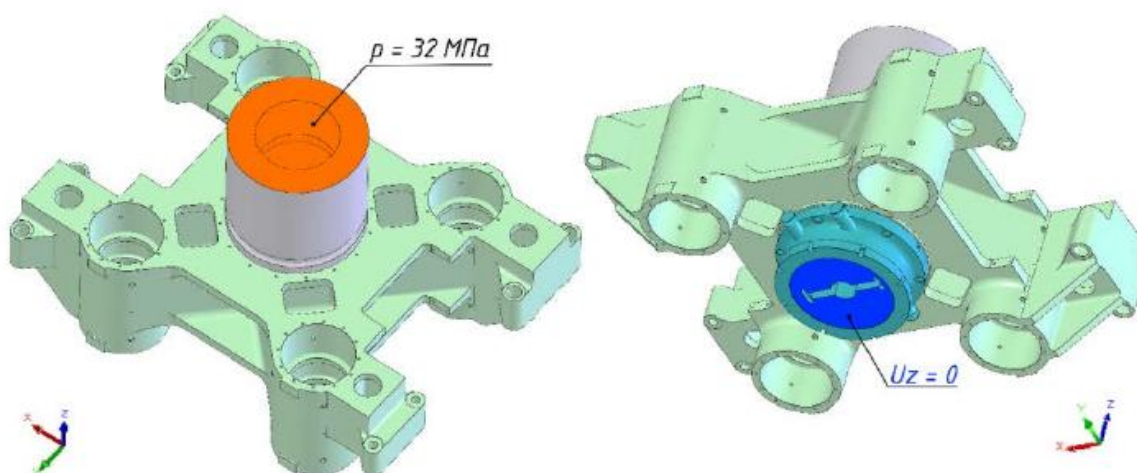


Рис. 4. Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния траверсы

Согласно результатам расчета напряженно-деформированного состояния подвижной траверсы значение растягивающих напряжений в зоне образования трещин составляет 36 МПа, максимальное значение растягивающих напряжений, действующих в конструкции, не превышает 56 МПа. Значение эквивалентных напряжений в зоне образования трещин — 35 МПа, максимальное значение составило 152 МПа (рис. 5).

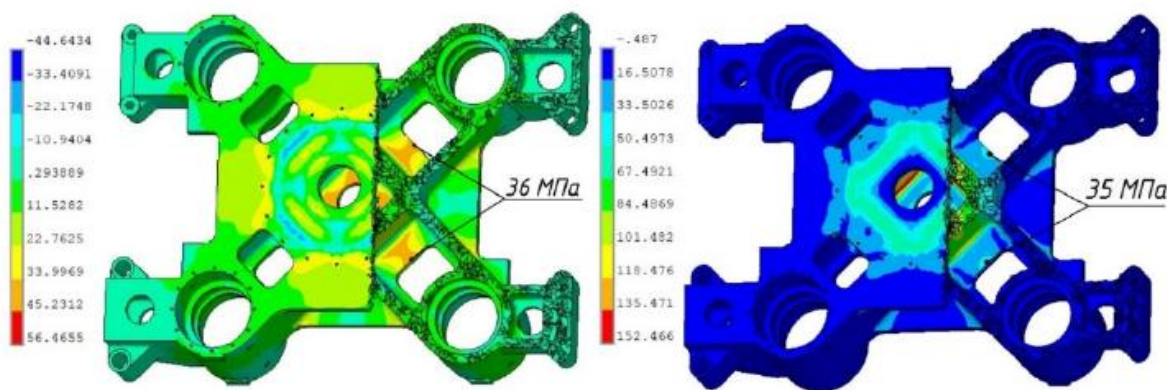


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние подвижной траверсы, первые главные напряжения σ_1 , МПа (слева) и эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, МПа (справа)

Траверса пресса изготовлена из стали 35Л, предел усталости которой при пульсирующем цикле, составляет $\sigma_0 = 190$ МПа, а предел текучести — $\sigma_T = 308$ МПа.

Коэффициент запаса прочности конструкции траверсы по усталостному критерию рассчитывается по формуле

$$n_T = \frac{\sigma_0}{\sigma_1^{\max}}, \quad (1)$$

где σ_0 — предел усталости материала при пульсирующем цикле нагружения; $\sigma_1^{\max}$ — максимальные растягивающие напряжения, действующие в корпусе детали.

Коэффициент запаса прочности конструкции траверсы по критерию текучести рассчитывается по формуле:

$$n_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\max}}, \quad (2)$$

где σ_T — предел текучести материала; $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\max}$ — максимальное значение эквивалентных напряжений, действующих в корпусе детали.

Минимально допустимое значение коэффициента запаса прочности по усталостному критерию составляет $n = 1,2$.

Минимально допустимое значение коэффициента запаса прочности по критерию текучести составляет $n_T = 1,5$.

Таким образом, коэффициенты запаса прочности для подвижной траверсы, рассчитанные по формулам (1) и (2), составляют:

$$n = \frac{190}{56} = 3,4; \quad n_T = \frac{308}{152} = 2,0.$$

Уровень напряжений, полученный в результате конечно-элементного расчета существенно ниже значений пределов усталости и текучести, а коэффициенты запаса прочности не превышают допустимых значений. Подобный уровень напряжений не мог вызвать разрушение целостности конструкции. Следовательно, необходимо определить причину, вызвавшую рост напряжений, который, в свою очередь, привел к образованию трещин. Было выдвинуто предположение, что причиной увеличения уровня действующих напряжений послужило изменение условий контактного взаимодействия между деталями в результате износа.

Для определения реальных условий контактного взаимодействия опорных поверхностей подвижной траверсы и инструмента были выполнены их замеры. В качестве средства измерения использовалась переносная координатно-измерительная система АТ-402 фирмы Leica, измерения проводились на ударопрочный уголкового отражателя (рис. 6). Принципы применения лазерных трекеров для решения задач машиностроительного производства рассмотрены в работах [11, 12]. По аналогии с измерениями любыми контактными координатно-измерительными машинами, принцип измерений и работы с лазерным трекером заключается в следующем: прибор подключается к компьютеру, на котором установлено метрологическое программное

обеспечение для сбора и анализа данных. Так как трекер следит за отражателем и подключен к компьютеру, управляющая программа «знает» положение центра отражателя в системе координат трекера (или любой другой). Далее с помощью отражателя, посредством контактных измерений (отражатель помещается прямо на измеряемую поверхность) набирается облако точек на детали, по которым программа строит геометрические элементы, например цилиндры (валы/отверстия), плоскости (грани, фланцы), конусы и т. п. Далее уже на основе этих элементов совместно с массивом точек оцениваются точность размера, формы и расположения контролируемых поверхностей: расстояния между плоскостями, межосевое расстояние, соосности, параллельности, неплоскостности и т. п.



Рис. 6. Лазерный трекер Leica AT-402 и угловой отражатель

В рамках измерительного контроля были выполнены измерения нижней опорной поверхности подвижной траверсы, контактирующей с инструментом, а также ответная часть подштамповой плиты. В ходе замеров определена неплоскостность каждой из контактных поверхностей. Результаты измерений представлены на рис. 7, 8. Численное значение со знаком минус показывает, что измеренная точка смещена «в тело» детали, тем самым характеризуя количественный показатель износа поверхности. Исходя из анализа данных, полученных в ходе измерений, можно сделать вывод, что взаимодействие между деталями осуществляется не по всей площади контакта, что, в свою очередь, должно привести к перераспределению напряжений, действующих в конструкции.

Для определения влияния формоизменения контактных поверхностей на напряженно-деформированное состояние траверсы был проведен конечно-элементный расчет, моделирующий реальные условия контакта. На базе облака точек, полученного в ходе измерений, методом экстраполяции создавались поверхности, которые впоследствии переносились на трехмерные модели подвижной траверсы и подштамповой плиты. Таким образом, область контакта геометрических моделей, используемых для расчета, повторяла область контакта реальных деталей, установленных на прессе.

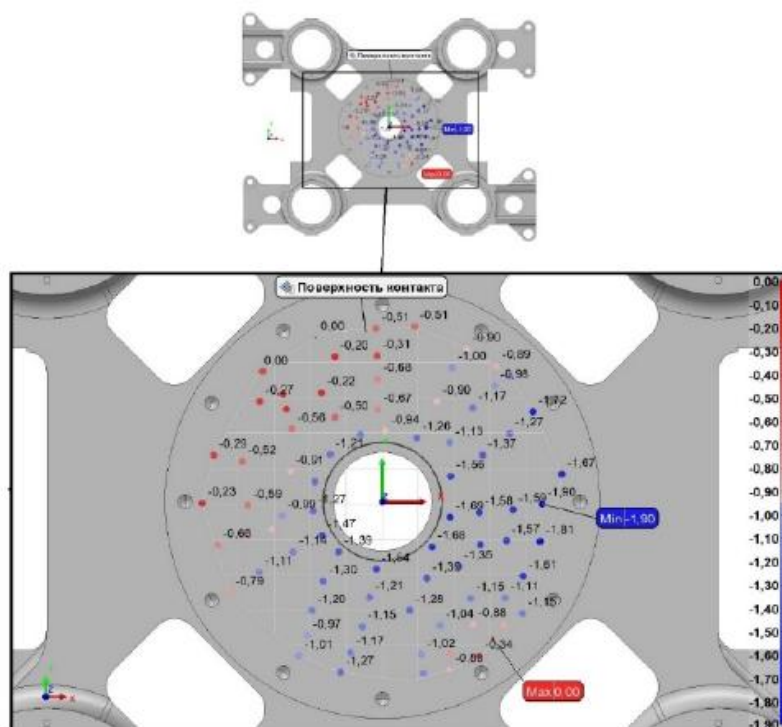


Рис. 7. Неплоскость опорной поверхности подвижной траверсы

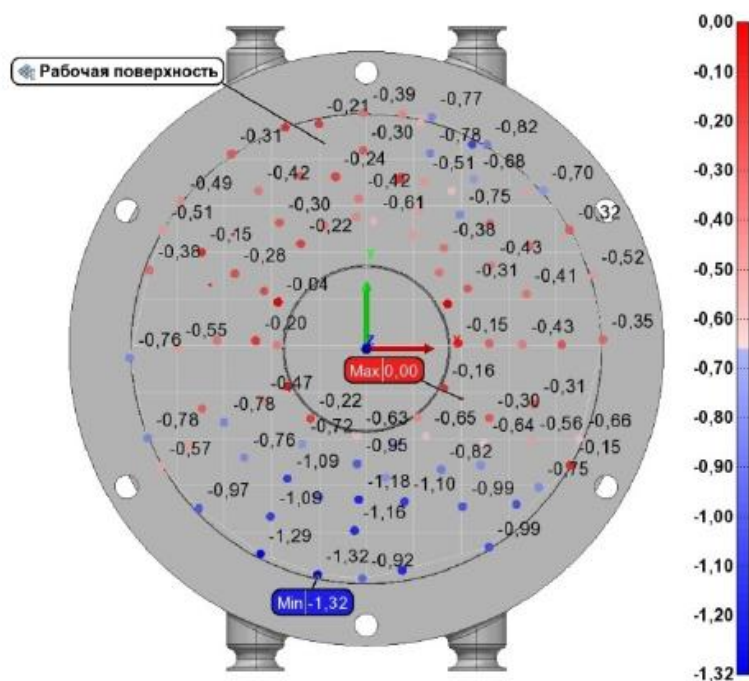


Рис. 8. Неплоскость опорной поверхности штампо-держателя

По результатам расчета напряженно-деформированного состояния траверсы с учетом износа контактных поверхностей, представленным на рис. 9, видно, что уменьшение площади соприкосновения деталей приводит к росту напряжений, действующих в конструкции. При этом максимальные напряжения реализуются в зоне безззорного контакта.

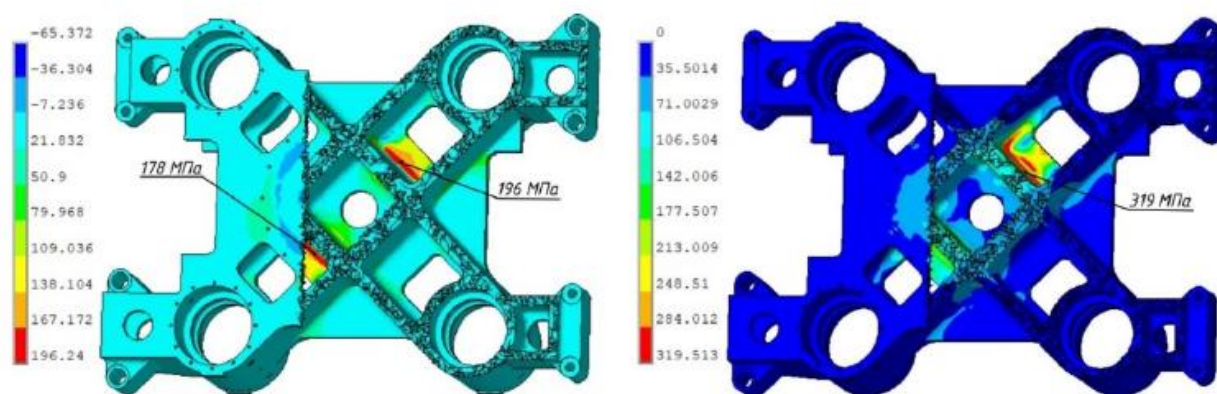


Рис. 9. Напряженно-деформированное состояние подвижной траверсы с учетом износа, первые главные напряжения σ_1 , МПа (слева) и эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, МПа (справа)

Коэффициенты запаса прочности для подвижной траверсы с учетом формоизменения контактных поверхностей составляют:

$$n = \frac{190}{196} = 0,97; \quad n = \frac{308}{319} = 0,97.$$

Как и ожидалось, полученные расчетом коэффициенты запаса прочности, ниже допустимых. Это, в свою очередь, объясняет образование в данной зоне усталостных трещин.

Обсуждение полученных результатов. По данным расчетов можно сделать вывод, что наличие износа контактной поверхности подвижной траверсы с инструментом значительно увеличивает главные напряжения в ее нижней плите. Также стоит отметить, что при отклонениях порядка 1–2 мм от плоскостности поверхности подвижной траверсы закономерным является образование и распространение усталостных трещин в ее конструкции, поэтому чрезвычайно важным для обеспечения прочностной надежности данной детали является соблюдение проектных условий силового взаимодействия в контактной паре «траверса – инструмент».

Заключение. Как подтвердили результаты измерительного контроля и последующего конечно-элементного расчета, образование трещин в корпусе подвижной траверсы связано с изнашиванием ее опорной поверхности. Найденные трещины были устранены во время плановых остановов колесопрокатной линии. Разделка трещин осуществлялась воздушно-дуговой строжкой с использованием угольных электродов с последующей механической зачисткой поверхности разделки для удаления науглероженного слоя. Заполнение разделанных полостей выполнено с использованием сварочных материалов на основе никеля, позволяющего проводить сварку массивных деталей без предварительного подогрева. При заполнении полостей разделок проводилась послойная проковка сварных швов, способствующая созданию в них напряжений растяжения, противоположных сжимающим напряжениям, возникающим при усадке.

Добиться снижения интенсивности износа контактных поверхностей позволяет использование износостойких материалов при наплавке [13–18].

В случае восстановления изношенной поверхности на первом этапе производится полуавтоматическая наплавка проволокой ER 307 Si на основе аустенитного немагнитизирующегося сплава с высоким содержанием хрома и никеля. Химический состав материала проволоки представлен в табл. 1, механические свойства — в табл. 2. Металл сварного шва устойчив к резким перепадам температуры и к образованию окалины при температурах до 850 °С, а также устойчив к коррозии при температурах до 300 °С.

Таблица 1

Химический состав материала проволоки ER 307 Si

Содержание химического элемента, %						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb
0,035	0,8	1,6	19,5	11,5	2,8	0,7

Таблица 2

Механические характеристики проволоки ER307 Si при $T = 20\text{ °C}$

Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж	Твердость/ твердость после наклепа, HV
620	440	40	96	200/350

По окончании наплавки производится фрезеровка наплавленного слоя для получения плоскости. В настоящее время все большее распространение получает механическая обработка крупногабаритных деталей с применением мобильного оборудования [19–21]. Это позволяет осуществлять восстановление поверхностей в условиях цеха без демонтажа и транспортировки деталей, тем самым снижая логистические и временные издержки. Пример процесса механической обработки опорной поверхности основания пресса усилием 50 МН представлен на рис. 10.

Восстановление изношенных поверхностей, согласно вышеизложенной методике, имеет несколько преимуществ. Во-первых универсальность: ремонт поверхностей, подверженных интенсивному изнашиванию, методом наплавки износостойкими материалами с последующей механической обработкой может быть применен для ряда металлургических машин — прессов, осуществляющих процессы обработки металлов давлением, прокатных станов и молотов. Во-вторых, наплавляемый металл обладает высокой устойчивостью к износу, что существенно снижает изнашивание контактных поверхностей в процессе эксплуатации. Это, в свою очередь, позволяет обеспечить прилегание деталей по всей поверхности контакта, тем самым гарантируя отсутствие возникновения перераспределения напряжений, действующих в базовых деталях оборудования.



Рис. 10. Процесс механической обработки основания прессы мобильным фрезерным станком

В 2009 г. данное техническое решение было применено в ходе восстановления опорной поверхности основания прессы усилием 90 МН, на котором ранее происходило систематическое разрушение плит нижнего штампового набора в следствие их прогиба, возникающего из-за износа центральной части опорной поверхности основания. Наплавка производилась при помощи полуавтоматической сварки в среде защитных газов проволокой Sabaros SW146. Механическая обработка осуществлялась мобильным фрезерным станком Mirage Machines MR2000.С того момента разрушения опорных плит зафиксировано не было. Это позволяет сделать вывод, что внедрение данного технического решения способствует увеличению долговечности базовых деталей оборудования.

Список источников

- [1] Коркин Н.П. и др. Анализ отказов, предупреждение разрушений и восстановление базовых деталей мощных гидравлических прессов. *Технология легких сплавов*, 2006, № 1–2, с. 181–189.
- [2] Семичев Ю.С., Сурков И.А. Предупреждение аварий тяжелых металлургических машин, вызванных разрушением их базовых деталей. *Тяжелое машиностроение*, 2012, № 8, с. 16–21.
- [3] Семичев Ю.С., Сурков И.А. О своевременности работ по предупреждению аварий мощных гидравлических прессов, вызванных внезапным разрушением базовых деталей. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2012, № 10, с. 29–36.
- [4] Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. *Прочность и износостойкость деталей машин*. Москва, Высшая школа, 1991, 319 с.

- [5] Курович А.Н., Сурков А.И. Развитие Б.В. Розановым методов исследования и конструктивно-технологического обеспечения прочности мощных гидравлических прессов. *Тяжелое машиностроение*, 2012, № 5, с. 66–73.
- [6] Кравцов Н.С., Сурков И.А. Исследование причин возникновения трещин в поперечинах мощных гидравлических прессов в зонах действия сжимающих нагрузок. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 2023, № 6, с. 24–29.
- [7] Шпыгарь С.А. Влияние износа сопряженных поверхностей на прочность и надежность базовых деталей мощных гидравлических прессов. *Тяжелое машиностроение*, 2011, № 2, с. 67–69.
- [8] Кравцов Н.С., Сурков И.А. Влияние фреттинг-износа на напряженно-деформированное состояние цилиндров мощных гидравлических прессов. *МашТех-2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении: сб. матер.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 275–277.
- [9] Сурков И.А., Кулагин Д.А., Моисеев А.П. Математические модели мощных гидравлических прессов и результаты условий взаимодействия их базовых деталей. *Металлургия XXI век. II Конф. молодых специалистов: сб. матер.* Москва, ВНИИМЕТМАШ, 2006, с. 397–407.
- [10] Волков А.Ю., Воробьев А.К., Зуев Е.А. Выбор метода расчета напряженно-деформированного состояния гидравлических прессов. *Научный журнал*, 2018, № 9(32), с. 30–33.
- [11] Людоговский П.Л., Комкова М.А. Методы измерений геометрических параметров изделий с помощью лазерных координатно-измерительных систем в современных машиностроительных производствах. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2016, № 4, с. 165–168.
- [12] Сысоев М.А. и др. Метрологическое обеспечение при монтаже, вводе в эксплуатацию и ремонте промышленного оборудования с применением лазерных трекеров. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2021, с. 310–312.
- [13] Сергеев Н.Н. и др. *Современные технологии восстановления деталей*, 2016.
- [14] Ryabtsev I.O. et al. Fatigue life of specimens from 40Kh steel after wear-resistant surfacing with a low-alloy steel sublayer. *The Paton Welding Journal*, 2021, no. 08, pp. 22–28.
- [15] Иванов А.В., Пирозерская О.Л. Перспективные способы наплавки и механической обработки восстанавливаемых деталей. *Технико-технологические проблемы сервиса*, 2010, № 13, с. 7–9.
- [16] Усольцев А.А. и др. Повышение надежности и долговечности деталей металлургического оборудования, работающего в условиях интенсивного износа путем наплавки. *Металлургия: технологии, инновации, качество. XXII Междунар. науч.-практ. конф.: сб. тр.* Новокузнецк, СибГИУ, 2021, с. 74–80.
- [17] Быстров В.А. и др. Управление процессом упрочнения твердым сплавом сменных деталей металлургического оборудования. *Фундаментальные исследования*, 2018, № 3, с. 7–12.
- [18] Схиртладзе А.Г., Тимирязев В.А. Методы восстановления деталей наплавкой и обработки наплавленных поверхностей в ремонтных производствах. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2015, № 9, с. 3–8.
- [19] Новкунский А.В., Новкунский А.А. О мобильной технологии обработки крупногабаритных узлов основного оборудования ГЭС. *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*, 2016, т. 281, с. 90–100.
- [20] Марусич К.В., Дружинин В.И. Обзор конструкций мобильных станков для обработки крупногабаритных изделий. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*, 2021, № 9, с. 97–112.
- [21] Tao B., Zhao X.W., Ding H. Mobile-robotic machining for large complex components: A review study. *Science China Technological Sciences*, 2019, vol. 62, pp. 1388–1400.