



Научная статья

УДК 621.73.06

DOI: 10.36652/1684-1107-2024-22-10-451-457

Влияние износа контактной поверхности подвижной траверсы гидравлического штамповочного пресса на ее сопротивление усталости

Никита Сергеевич Кравцов

ООО "Надежность ТМ", Москва, Россия, kranik96@gmail.com

Аннотация. Проведен анализ причин разрушения подвижной траверсы штамповочного пресса силой 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 штамподержателя в результате износа. По результатам измерительного контроля, проведенного контактным методом лазерным трекером, 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 для получения условий контакта, максимально приближенных к натурным. На основании прочностного расчета конструкции с учетом фактических контактных условий обосновано образование усталостных трещин вследствие 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 в результате 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, сопротивление усталости

Для цитирования: Кравцов Н.С. Влияние износа контактной поверхности подвижной траверсы гидравлического штамповочного пресса на ее сопротивление усталости // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22, № 10. С. 451—457. DOI: 10.36652/1684-1107-2024-22-10-451-457.

Original article

Effect of wear of movable cross-beam contact surface of hydraulic stamping press on its fatigue strength

Nikita S. Kravtsov

"Nadezhnost TM" LLC, Moscow, Russia, kranik96@gmail.com

Abstract. The causes of destruction of the movable cross-beam of the stamping press with a force of 100 MN are analyzed. However, based on the results of the finite element calculation, the movable cross-beam is unlimited durability. According to the hypothesis put forward, the reason for the destruction is the shape change of the contact surfaces of the movable cross-beam 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 is 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 основном работают в условиях циклических нагрузок. Как известно, длительное циклическое воздействие приводит к постепенному накоплению в металле повреждений и, как следствие, 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 выносливости материала, из которого изготовлена деталь, то неизбежно в ее конструкции начнутся процессы зарождения и развития трещин при достижении примерно 2 млн 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, недостаточная сила прижима деталей друг к другу — все эти факторы влияют на интенсивность протекания процессов износа. Исследование влияния процессов износа на долговечность базовых деталей металлургического оборудования рассмотрено в [7, 8].

Изнашивание отдельных деталей в узле приводит к работе оборудования в непроектных режимах эксплуатации, что может стать причиной внезапного отказа. Например, износ контактных поверхностей тяжело нагруженных деталей может привести к изменению условий их контактного взаимодействия, что ведет к перераспределению напряжений, действующих в конструкции. Рост напряжений выше допустимого значения влечет 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 обычно осуществляют без проведения анализа причин образования дефектов. 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 силой 100 МН (рис. 1).

Данный пресс входит в линию по производству железнодорожных колес. Производственная линия включает в себя четыре прессы с рабочими силами 35, 50, 100 и 20 МН, а также горизонтальный колесопрокатный стан. В течение года базовые детали прессов колесопрокатной линии воспринимают около 800 000 нагружений. Таким образом, в случае возникновения в конструкциях базовых деталей прессы напряжений, превышающих предел выносливости, процессы зарождения и роста усталостных трещин могут проявиться уже за три года эксплуатации.

Причиной 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 рассмотрена в работах [9, 10].

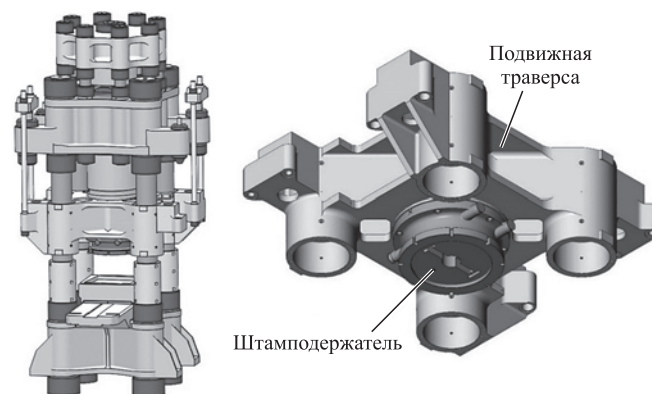


Рис. 1. 3D-модель пресса силой 100 МН и подвижной траверсы со штамподержателем

Схема расположения трещин, их размеры и фотографии приведены на рис. 2.

Трещины образовались на кромках технологических отверстий, являющихся традиционными концентраторами напряжений в конструкциях подобного рода. Однако анализ результатов конечно-элементного расчета конструкции траверсы при нагружении прессы номинальной силой 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 спровоцировало возникновение трещин в корпусе подвижной траверсы.

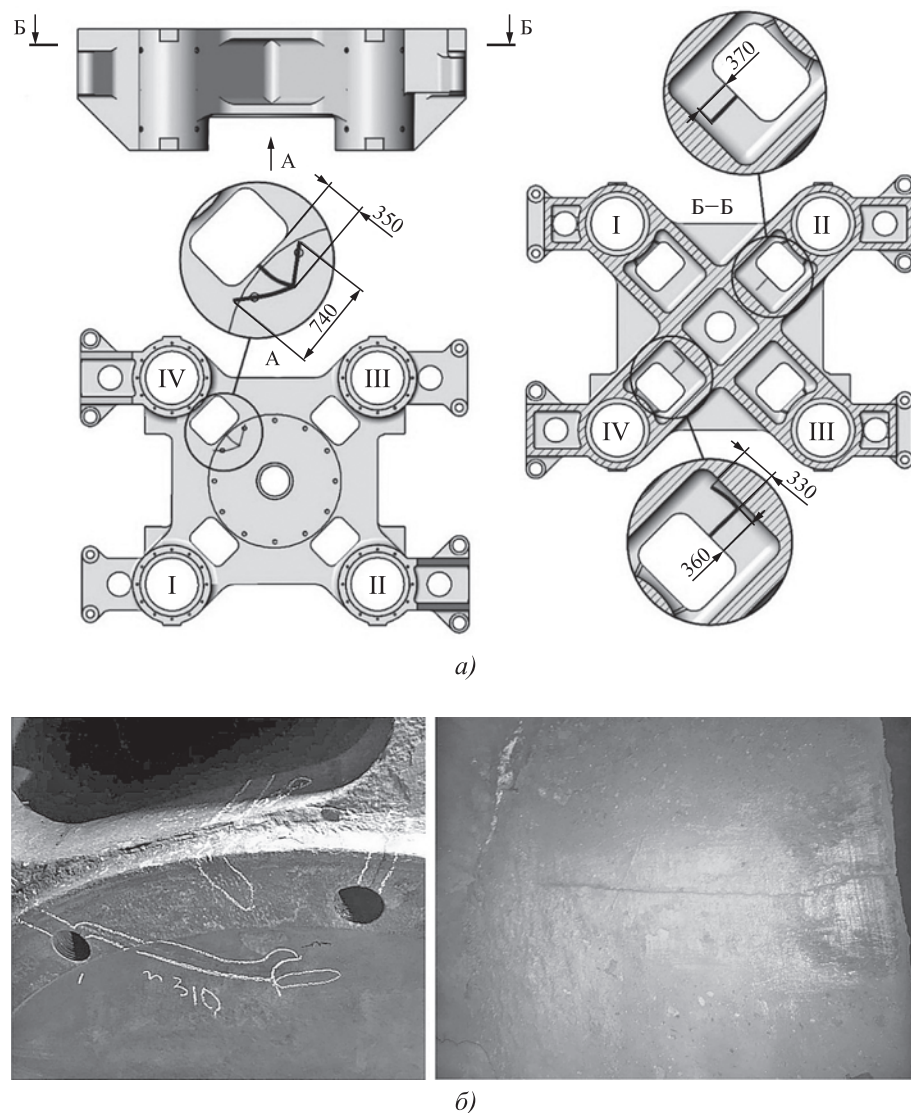


Рис. 2. Схема расположения, размеры (а) и фотографии (б) трещин в корпусе подвижной траверсы

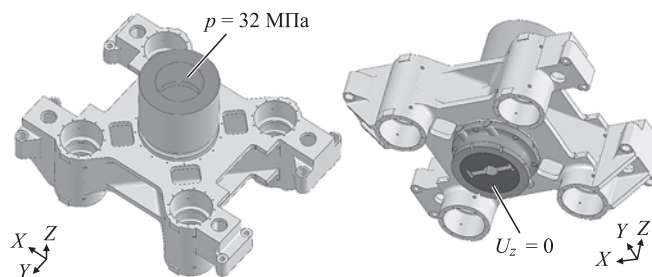


Рис. 3. Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния траверсы

Результаты исследования и их обсуждение.

Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния траверсы представлена на рис. 3. На схеме p — давление, U — перемещение, нижний индекс z указывает

направление в соответствии с глобальными осями координат. На поверхность плунжера приложено силовое воздействие — рабочее давление прессы $p = 32$ 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.

Согласно результатам расчета напряженно-деформированного состояния подвижной траверсы значение растягивающих напряжений в зоне образования трещин составляет $\sigma_1 = 36$ МПа, максимальное значение растягивающих напряжений, действующих в конструкции, не превышает $\sigma_1^{\max} = 56$ МПа. Значение эквивалентных напряжений в зоне образования трещин $\sigma_{\text{экв}} = 35$ МПа, а их максимальное значение $\sigma_{\text{экв}}^{\max} = 152$ МПа (рис. 4, см. обложку).

Траверса прессы изготовлена из стали 35Л, предел выносливости которой при

отнулевом цикле напряжений составляет $\sigma_0 = 190$ МПа, а предел текучести $\sigma_T = 308$ МПа.

Коэффициент запаса прочности конструкции траверсы по усталостному критерию:

$$n = \frac{\sigma_0}{\sigma_{1\max}} \quad (1)$$

Коэффициент запаса прочности конструкции траверсы по критерию текучести:

$$n_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max\text{экв}}} \quad (2)$$

Минимально допустимое значение коэффициента запаса прочности по усталостному критерию составляет $[n] = 1,2$, по критерию текучести — $[n_T] = 1,5$.

Таким образом, коэффициенты запаса прочности для подвижной траверсы, рассчитанные по формулам (1) и (2), равны: $n = \frac{190}{56} = 3,4$ и $n_T = \frac{308}{152} = 2,0$ соответственно.

Уровень напряжений, полученный в результате конечно-элементного расчета, существенно ниже значений пределов выносливости 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 привел к образованию трещин.

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 выполнены их замеры. В качестве средства измерения использовали переносную координатно-измерительную систему АТ-402 фирмы Leica, измерения проводили на ударопрочный уголкового отражатель (рис. 5).

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 под-



Рис. 5. Лазерный трекер Leica At-402 и уголкового отражатель

ключается 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 (границы, 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.

Также выполнены измерения нижней опорной поверхности подвижной траверсы, контактирующей с инструментом, а также ответной части подштамповой плиты. Определена неплоскостность каждой из контактных поверхностей. Результаты измерений приведены на рис. 6 (см. обложку). Численное значение со знаком минус показывает, что измеренная точка смещена "в тело" детали, характеризуя количественный показатель износа поверхности.

Исходя из анализа данных, полученных при измерениях, можно сделать вывод, что взаимодействие между деталями осуществляется не по всей площади контакта, что должно привести

к перераспределению напряжений, действующих в конструкции.

Для определения влияния формоизменения контактных поверхностей на напряженно-деформированное состояние траверсы проведен конечно-элементный расчет, моделирующий реальные условия контакта. На базе облака точек 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.

По результатам расчета напряженно-деформированного состояния траверсы с учетом износа контактных поверхностей (рис. 7, см. обложку), видно, что уменьшение площади соприкосновения деталей приводит к росту напряжений, действующих в конструкции. При этом максимальные напряжения реализуются в зоне безззорного контакта.

Коэффициенты запаса прочности для подвижной траверсы, рассчитанные по формулам (1) и (2), с учетом формоизменения контактных поверхностей составляют $n = \frac{190}{196} = 0,97$ и $n_T = \frac{308}{319} = 0,97$ соответственно.

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

По данным расчетов можно сделать вывод, что наличие износа контактной поверхности подвижной траверсы с инструментом значительно увеличивает главные напряжения в ее нижней плите. При отклонениях около 1...2 мм от плоскостности поверхности подвижной траверсы закономерным является образование и распространение усталостных трещин в ее конструкции, поэтому 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.

Трещины были устранены во время плановых остановов колесопрокатной линии. Разделку трещин осуществляли воздушно-дуговой строжкой с использованием угольных электродов с последующей механической зачисткой поверхности разделки для удаления науглероженного слоя. Заполнение разделанных полостей выполняли с использованием сварочных материалов на основе никеля, позволяющего проводить сварку массивных деталей без предварительного подогрева. При заполнении полостей разделок проводили послойную проковку сварных швов, способствующую 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 выполняют полуавтоматическую наплавку проволокой ER 307 Si на основе аустенитного немагнитивающегося сплава с высоким содержанием хрома и никеля. Химический состав и механические свойства материала проволоки приведены в табл. 1 и 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.

По окончании наплавки проводят фрезеровку наплавленного слоя для получения плоскости. В настоящее время все большее распространение получает механическая обработка крупногабаритных деталей с применением мобильного оборудования [19—21]. Это позволяет осущест-

1. Химический состав материала проволоки ER 307 Si, % мас.

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

2. Механические характеристики проволоки ER 307 Si при температуре 20 °С

Предел прочности σ_B	Предел текучести σ_T	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость KCU, Дж/см ²	Твердость/ твердость после наклепа, HV
МПа				
620	440	40	96	200/350



Рис. 8. Процесс механической обработки основания пресса мобильным фрезерным станком

влять восстановление поверхностей в условиях цеха без демонтажа и транспортировки деталей, снижая логистические и временные издержки. Пример процесса механической обработки опорной поверхности основания пресса силой 50 МН показан на рис. 8.

Восстановление изношенных поверхностей согласно изложенной выше методике имеет следующие преимущества. Во-первых, универсальность: ремонт поверхностей, подверженных интенсивному изнашиванию, методом наплавки износостойкими материалами с последующей механической обработкой можно применять для ряда металлургических машин — прессов, осуществляющих процессы обработки металлов давлением, прокатных станков и молотов. Во-вторых, наплавляемый металл обладает высокой устойчивостью к износу, что значительно снижает изнашивание контактных поверхностей в процессе эксплуатации. Это позволяет обеспечить прилегание деталей по всей поверхности контакта, гарантируя отсутствие возникновения перераспределения напряжений, действующих в базовых деталях оборудования.

В 2009 г. данное техническое решение было применено при восстановлении опорной поверхности основания пресса силой 90 МН, на котором ранее происходило систематическое разрушение плит нижнего штампового набора вследствие их прогиба, возникающего из-за износа центральной части опорной поверхности основания. Наплавку выполняли с помощью

полуавтоматической сварки в среде защитных газов проволокой Sabaros SW146. Механическую обработку осуществляли мобильным фрезерным станком Mirage Machines MR2000. С того момента разрушения опорных плит зафиксировано не было.

Таким образом, 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: учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов. Москва: Высшая школа, 1991. 319 с.
5. **Курович А.Н., Сурков А.И., Розанов Б.В.** Развитие 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*. 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 // 2-я конференция молодых специалистов "Металлургия XXI век". 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. Т. 1. Красноярск, 2021. С. 310—312. URL: <https://apak.sibsay.ru/page/materials> (дата обращения: 15.04.2024).
13. Сергеев Н.Н. и др. Современные технологии восстановления деталей: учебное пособие. Тула: ТулГУ, 2016. 112 с.
14. Ryabtsev I.O. et al. Fatigue life of samples after wear-resistant, fabrication and repair surfacing // Automatic Welding. 2020. No. 9. P. 28—35.
15. Иванов А.В., Пирозерская О.Л. Перспективные способы наплавки и механической обработки восстанавливаемых деталей // Техничко-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: труды XXII Международной научно-практической конференции "Металлургия—2021". 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 гидро-техники 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. P. 1388—1400.
- Статья поступила в редакцию 10.06.2024; одобрена после рецензирования 19.07.2024; принята к публикации 19.07.2024.*

Рисунки к статье Дань Чжоу, Лулу Ху, Сыци Хуанг,
Юнхуэй Ин, Хуацзе Ху, А.А. Анцифорова

"Современный подход к технологиям литья под низким давлением"



Рис. 1. Диски, изготовленные методом литья под низким давлением:

а — диск с толстыми спицами; б — диск с тонкими спицами; в — диск с расходящимися тонкими спицами; з — диск со сходящимися тонкими спицами

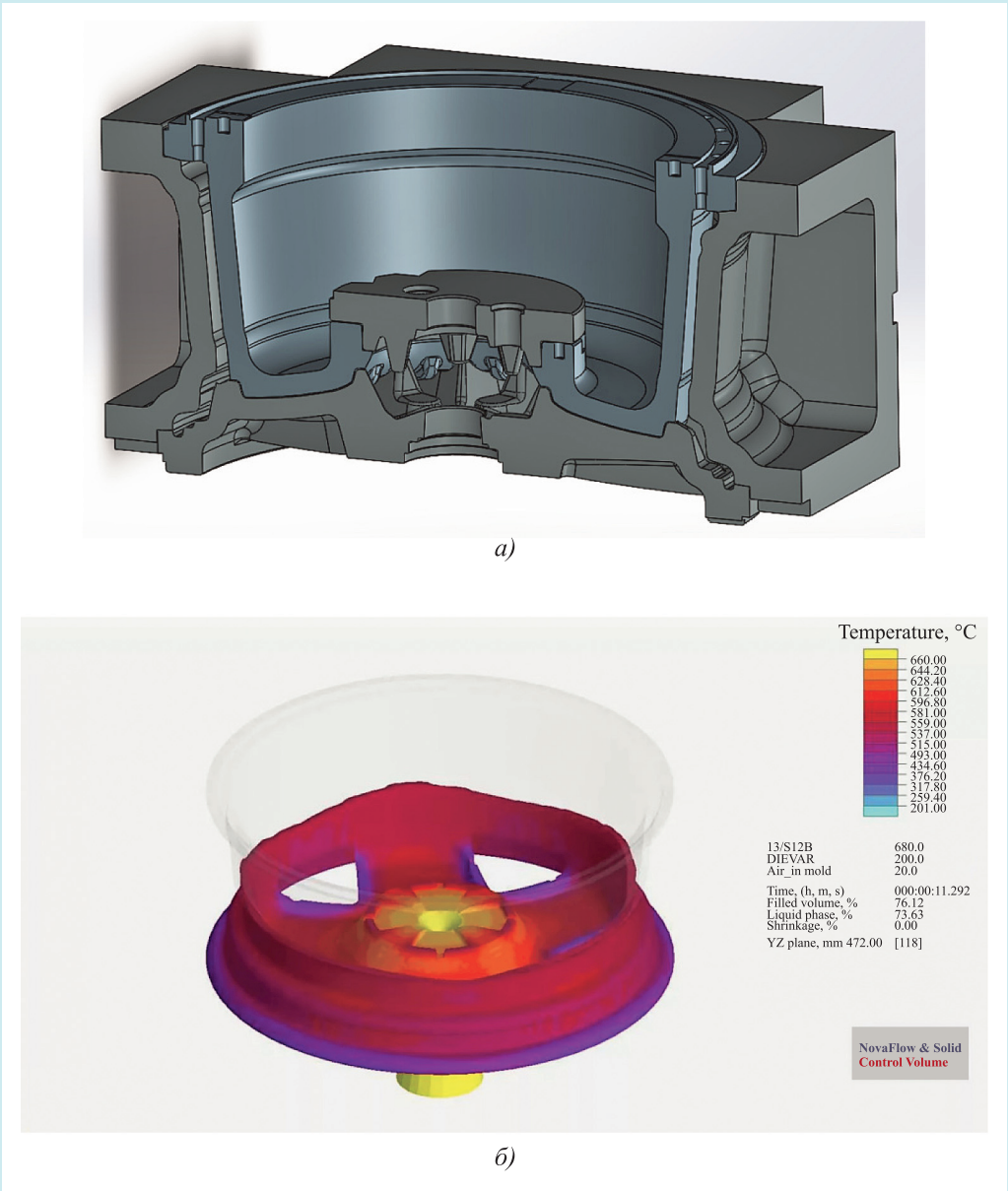


Рис. 3. Пример использования систем при моделировании технологии литья алюминиевых дисков:

а — 3D-модель формы для литья под низким давлением; б — результаты моделирования

Рисунки к статье Н.С. Кравцова

"Влияние износа контактной поверхности подвижной траверсы гидравлического штамповочного прессы на ее сопротивление усталости"

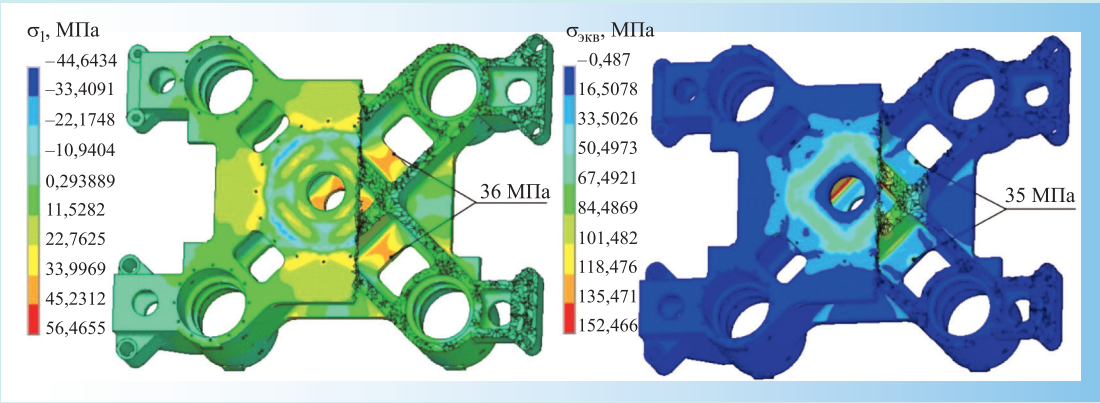


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние подвижной траверсы

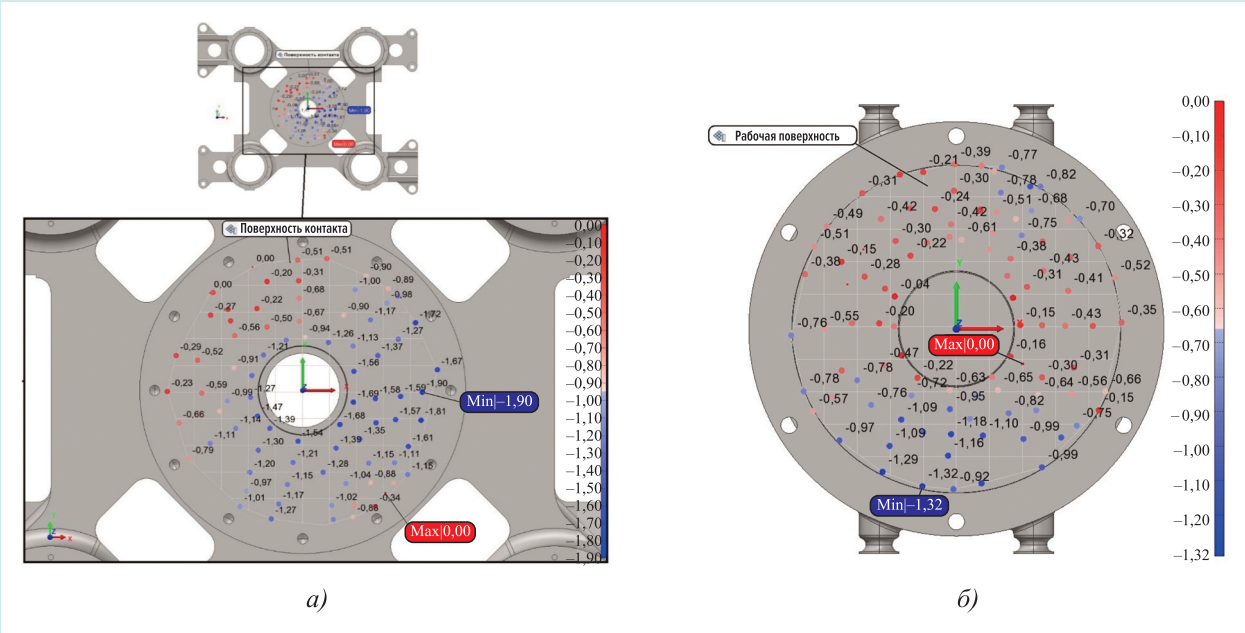


Рис. 6. Неплоскостность, мм, опорной поверхности подвижной траверсы (а) и штамподержателя (б)

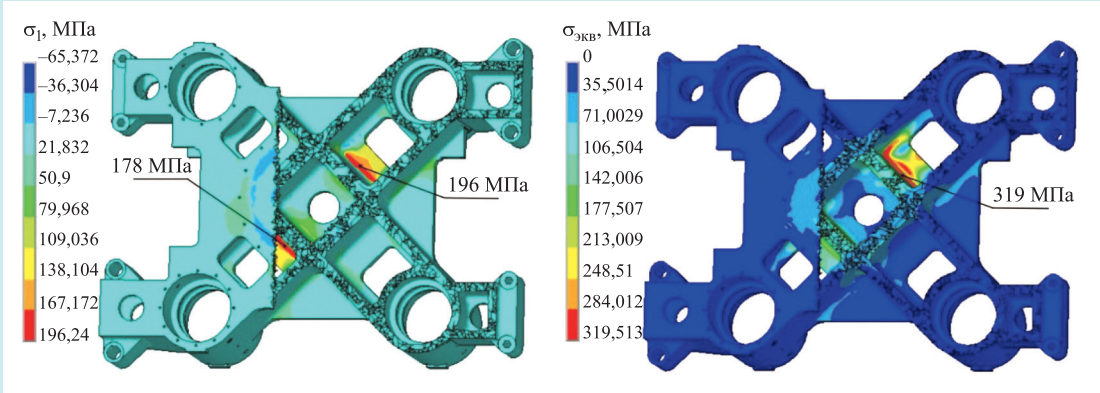


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние подвижной траверсы с учетом износа