

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРЕЛЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭКСКАВАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Веревошкин Н.Г.

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, метод конечных элементов, прочностной анализ, цифровая модель, гидравлический экскаватор, коэффициент запаса прочности, топологическая оптимизация.

Аннотация. В статье был проведен анализ механических характеристик экскаватора и оптимизация его стрелы путем сравнения различных параметров, таких как толщина и форма стрелы, распределение материала и соотношение эпюры напряжения и деформации к прочности конструкции. Основное внимание уделено последовательному выполнению двух этапов оптимизации, обеспечивающих комплексное улучшение конструкции. На первом этапе проводится параметрическая оптимизация, где определяются основные геометрические и материальные параметры в зависимости от коэффициента запаса прочности при выполнении метода конечных элементов. Следующим этапом становится топологическая оптимизация, где происходит перераспределение материала внутри конструкции при сохранении прочностных характеристик. Полученные результаты показывают, что совместный подход позволяет эффективно проектировать элементы сложных конструкций, снижая их вес и улучшая механические характеристики.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF HYDRAULIC EXCAVATOR BOOM DESIGN USING MODERN OPTIMIZATION METHODS

Verevochkin N.G.

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow

Keywords: parametric optimization, finite element method, strength analysis, digital model, hydraulic excavator, safety factor, topological optimization.

Abstract. The paper analyzed the mechanical performance of an excavator and optimized its boom by comparing various parameters such as boom thickness and shape, material distribution, and stress-strain diagrams ratio to structural strength. The focus is on performing two optimization steps sequentially to provide a comprehensive improvement of the design. At the first stage, parametric optimization is carried out, where the main geometric and material parameters are determined depending on the safety factor when performing the finite element method. The next step is topological optimization, where material redistribution within the structure is performed while maintaining the strength characteristics. The results obtained show that the joint approach allows to effectively design elements of complex structures, reducing their weight and improving their mechanical performance.

Введение. Горные машины и оборудование, используемые на открытых разработках, подвергаются значительным нагрузкам, обусловленным воздействием экстремальных температур и интенсивным износом рабочего инструмента [1]. Среди таких машин особое место занимают гидравлические экскаваторы, отличающиеся высокой производительностью и эффективностью при добыче полезных ископаемых [2]. Однако сложные условия эксплуатации, а также необходимость повышения надежности и сокращения эксплуатационных затрат ставят перед инженерами и учеными задачу непрерывного совершенствования данной техники [3, 4].

Повышение производительности горнорудной техники является одной из ключевых задач, имеющих как теоретическую, так и практическую значимость. Эффективность работы оборудования напрямую влияет на экономическую рентабельность горнодобывающих предприятий, что делает эту проблему приоритетной в научных исследованиях. Отечественные ученые активно занимаются изучением факторов, определяющих работоспособность и долговечность горной техники, моделированием технологических процессов добычи, а также

разработкой методов диагностики, обслуживания и ремонта машин [5-8]. Особое внимание уделяется внедрению современных инженерных решений, направленных на повышение надежности оборудования и снижение эксплуатационных издержек.

В данной статье рассматривается параметрическая и топологическая оптимизации конструкции стрелы гидравлического экскаватора, выполненные с использованием численного моделирования в САПР SolidWorks.

Разработка цифровой модели. В рамках сравнительного исследования была проанализирована стрела, применяемая для массовых земляных работ карьерного гидравлического экскаватора Cat390F L (рис. 1) [9]. Ключевыми характеристиками, определяющими выбор материала стрелы гидравлического экскаватора, являются высокая прочность на сдвиг и растяжение, усталостная прочность и ударная вязкость. В связи с этим выбрана сталь 15ХСНД. Общая масса рабочего оборудования составляет 8415 кг. Длина стрелы гидравлического экскаватора составляет 7,25 м, что соответствует расстоянию от оси крепления на поворотной платформе до оси крепления рукояти. Этот параметр оказывает влияние на рабочий радиус, глубину копания и высоту разгрузки.

Цифровая модель спроектирована таким образом, чтобы изменения геометрических параметров не приводили к сбоям анализа или нарушению её целостности. Для этого при построении модели были учтены ограничения, предотвращающие возникновение геометрических несовместимостей или нарушения топологии. Рабочая модель адаптирована к различным вариантам длины, толщины или расположения элементов, что необходимо в параметрической оптимизации. Такой подход способствует повышению эффективности процесса разработки за счёт ускорения проверки различных конфигураций модели.

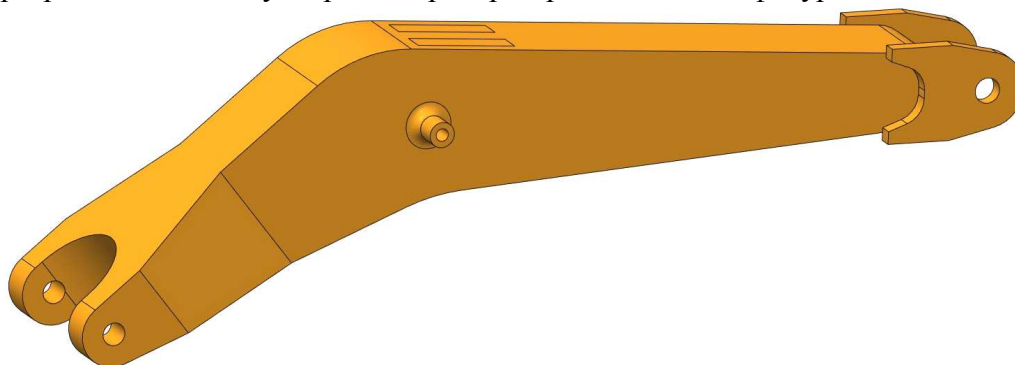


Рис. 1. Цифровая модель стрелы гидравлического экскаватора Cat390F L

Выполнение параметрической оптимизации. Основной задачей параметрической оптимизации является нахождение определенного набора параметров, который максимизирует или минимизирует целевые показатели конструкции при сохранении всех необходимых ограничений. Главной особенностью данного процесса является то, что он включает в себя итеративный процесс вычислений, где на каждом шаге происходит уточнение параметров для улучшения конечного результата. Данный метод параметрической оптимизации позволяет в значительной степени повысить эффективность проектирования, ускорить разработку и снизить риски, так как в ходе исследования выбирается наиболее оптимальный вариант. После создания модели выполняется статический анализ с использованием метода конечных элементов, с учетом нагрузок и граничных условий [10, 11]. В качестве целевого показателя принимается коэффициент запаса прочности, равный 2. В процессе параметрической оптимизации (рис. 2) выбираются оптимальные параметры, такие как расположение оси гидроцилиндров стрелы и ребер жесткости, а также толщины листов. В ходе численного моделирования было проанализировано 146 конфигураций стрелы с различными характеристиками. В результате был выбран вариант, который обеспечивает снижение массы на 12,7% по сравнению с исходной моделью, в большей степени из-за уменьшения толщины листов с 30 мм до 25 мм. Эпюры распределения напряжений и коэффициента запаса прочности оптимальной конфигурации стрелы представлены на рисунке 3.

146 из 146 сценариев завершены успешно. Качество исследования проектирования: Высокое

		Текущая	Начальная	Оптимальная (85)	Сценарий 50
Толщина		25мм	30мм	25мм	28мм
Ребро 2		700мм	700мм	700мм	700мм
Ребро 1		1200мм	800мм	1200мм	800мм
Размер до пальца от оси платформы		3000мм	3000мм	3000мм	2900мм
Размер до пальца от оси рукоятки		4100мм	4000мм	4100мм	4100мм
Sensors4	> 2.000000	2,120e+00	1,969e+00	2,120e+00	2,139e+00
Sensors2	Минимизировать	7349.07	8414.68	7349.07	8106.92

Рис. 2. Параметрическая оптимизация стрелы

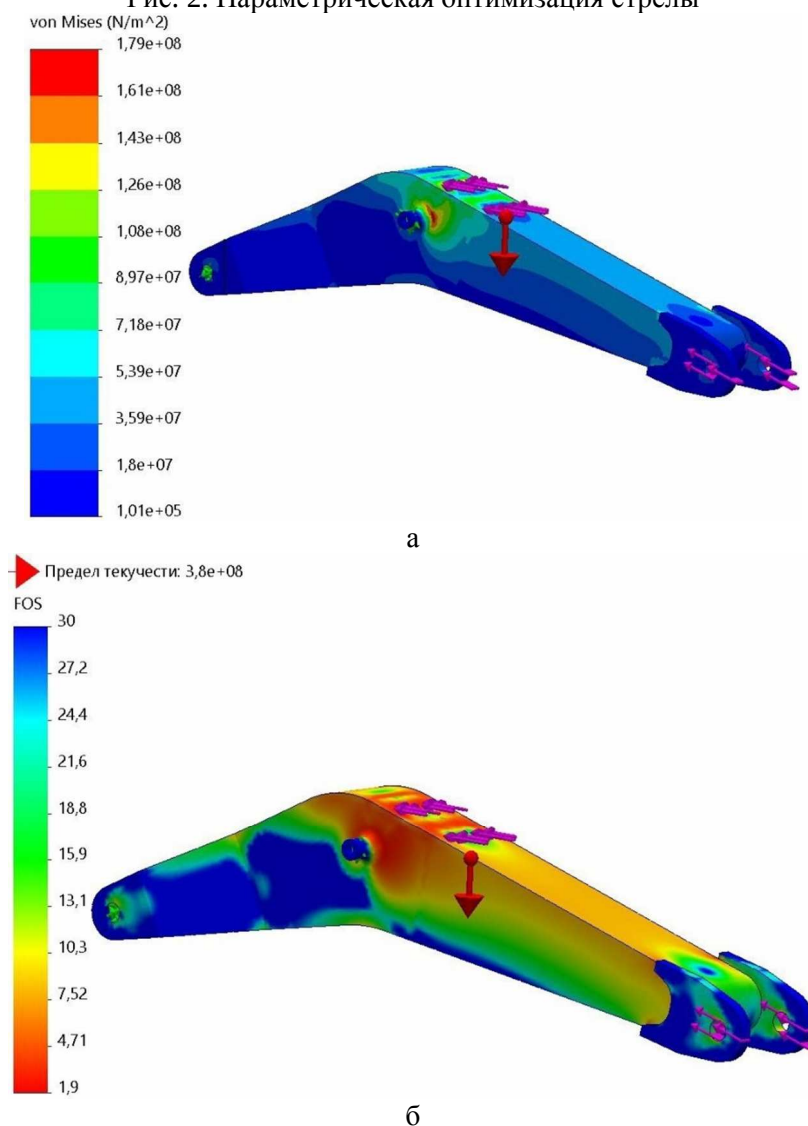


Рис. 3. Эпюры распределений оптимальной конфигурации стрелы: а) эквивалентных напряжений; б) коэффициента запаса прочности

Проведение топологической оптимизации. Топологическая оптимизация (рис. 4) основывается на численном моделировании, при котором материал в менее нагруженных областях удаляется или перераспределяется, обеспечивая оптимальное сочетание прочности и минимального веса конструкции [12-14]. Целью данной оптимизации является снижение массы стрелы на 15% при сохранении коэффициента запаса прочности не менее 2. Нагрузки и граничные условия импортируются из статического анализа. Сходимость решения является основным фактором выполнения топологической оптимизации, поскольку она обеспечивает

корректность и надежность полученных результатов. В процессе итеративных расчётов цифровая модель последовательно уточняется, что позволяет достигнуть равновесия между минимизацией массы и сохранением прочностных характеристик. Этот процесс приводит к сбалансированному перераспределению материала, в котором избыточные зоны конструкции сокращаются, а в критически нагруженных областях происходит перераспределение материала с целью повышения прочности.

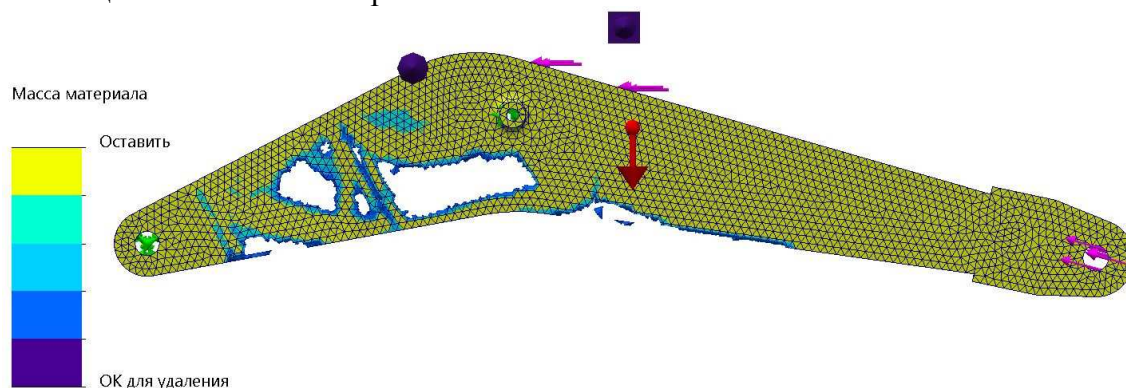


Рис. 4. Топологическая оптимизация стрелы с ярко выраженными зонами для удаления материала

В результате топологической оптимизации несущей конструкции снижение массы достигается за счёт удаления избыточного материала из ненагруженных или малонагруженных областей, таких как ребра жесткости и внешние листы конструкции (рис. 5). Данные элементы были оптимизированы в ходе анализа, что позволяет уменьшить их объём без потери прочности в критических участках.

Ребра жесткости, которые используются для усиления конструкции, подверглись сокращению или полному удалению в местах, где нагрузка была относительно низкой. Это перераспределение материала позволяет сохранить прочность конструкции, снижая её массу, что является важным моментом в современном подходе к проектированию для повышения энергоэффективности и снижения затрат на материалы. Таким образом, масса стрелы составляет 6401 кг, что позволяет снизить массу без ущерба для эксплуатационных характеристик.

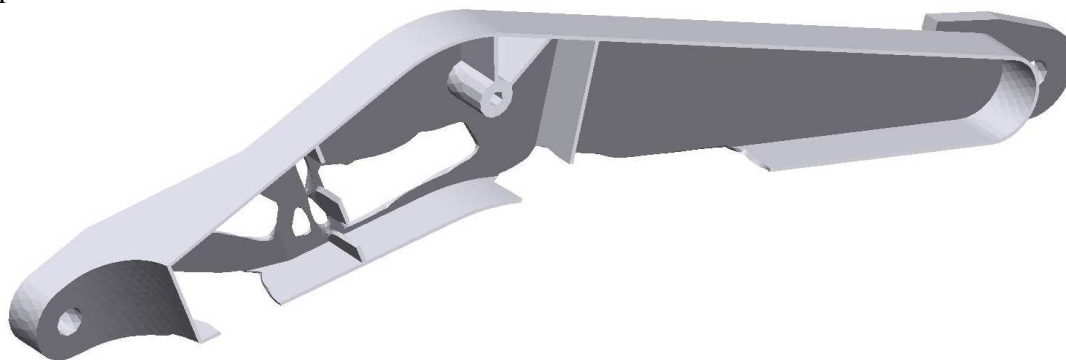


Рис. 5. Стрела в разрезе после удаления избыточного материала

Результаты исследования. В ходе исследования был применен совместный подход к параметрической и топологической оптимизации, что позволило снизить массу стрелы гидравлического экскаватора Cat390F L на 24%, сохранив коэффициент запаса прочности, приложенные нагрузки и граничные условия. Однако при проектировании конструкций, подвергающихся топологической оптимизации, важно учитывать условия эксплуатации. Поэтому открытые зоны, сформированные в результате перераспределения материала, способствуют накоплению горной породы внутри стрелы, что увеличивает массу рабочего оборудования и вызывает дополнительные нагрузки на конструкцию. Для уменьшения этого риска при разработке рассмотреть использование защитных кожухов, предотвращающих попадание посторонних материалов в полости стрелы

Закключение. В научной статье выполнены два последовательных этапа оптимизации – параметрическая и топологическая. Применение этих методов позволило определить ключевые параметры конструкции стрелы, а также создать основу для модернизации существующего оборудования и разработки современных отечественных конструктивных решений. Результаты исследования показывают, что созданная цифровая модель гидравлического экскаватора позволяет определить оптимальные конструктивные параметры рабочих элементов и обоснованно удалить избыточный материал на основе численного моделирования. На следующем этапе планируется создание цифровой модели стрелы и рукояти после топологической оптимизации, а также выполнение динамического моделирования с использованием метода дискретных элементов.

Список литературы

1. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Шестаков В.С. Проектирование карьерных экскаваторов. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 228 с.
2. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2007. – 680 с.
3. Джураев Р.У., Райханова Г.Е., Губанов С.Г. Совершенствование конструкции режущих элементов ковша карьерных экскаваторов // Горный Журнал. – 2023. – №3. – С. 49-55. – doi.org/10.17580/gzh.2023.03.07.
4. Сарычев В.Д., Грановский А.Ю., Невский С.А. Построение математической модели износа внутренних поверхностей ковша экскаватора // Горный журнал. – 2019. – № 8. – С. 70-73. – DOI: 10.17580/gzh.2019.08.13.
5. Побегайло П.А. Рабочее оборудование одноковшовых гидравлических экскаваторов: исследование геометрических свойств // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 5. – С. 212-225.
6. Рахутин М.Г., Симба Наваррете В.Х. Влияние угла наклона экскаватора на запас прочности трака гусеницы // Горная промышленность. – 2023. – №2. – С. 141-146. – doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-141-146.
7. Грнеж Б. Применение стали марки HARDOX в горной промышленности // Горная промышленность. – 2008. – № 3(79). – С. 34-38.
8. Шестаков В.С., Телиман И.В., Безкоровайный П.Г. Исследование нагруженности рабочего оборудования гидравлического экскаватора // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 1 (171). – С. 18-23. – DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-18-23.
9. Веревошкин Н.Г. Анализ динамического воздействия породы на рабочее оборудование гидравлического экскаватора // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – №24. – С. 129-134. – DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-129-134.
10. Yu Chunlei, Bao Yingchao, Li Qi. Finite element analysis of excavator mechanical behavior and boom structure optimization // Measurement. 2021, vol. 173, p. 108637. doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108637.
11. Chen X., Han Z., Young-chul K., Haochen Z., Yantong L. Programmed system for fatigue life prediction of excavator turntables based on multi-body dynamics and finite element analysis // Heliyon. 2024, vol. 10, iss. 12, p. 33126. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33126.
12. Павлов С.П., Бодягина К.С. Топологическая оптимизация конструкций, состоящих из нескольких материалов с использованием модифицированного метода SIMP // Математика и математическое моделирование. – 2019. – № 06. – С. 19-34. – DOI: 10.24108/mathm.0619.0000211.
13. Krysko A.V., Awrejcewicz J., Pavlov S.P., Bodyagina K.S., Krysko V.A. Topological optimization of thermoelastic composites with maximized stiffness and heat transfer // Composites Part B: Engineering. 2019, vol. 158, pp. 319-327. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.09.047.
14. Takezawa A., Yoon G.H., Jeong S.H., Kobashi M., Kitamura M. Structural topology optimization with strength and heat conduction constraints // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2014, vol. 276, pp. 341-361. doi.org/10.1016/j.cma.2014.04.003.

References

1. Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Shestakov V.S. Design of quarry excavators. – M: Innovative Engineering, 2017. – 228 p.
2. Poderni R.Yu. Mechanical equipment of open pits: Tutorial. – 6th, add. and revised edition. – M.: Publ. house of the Moscow State Mining University, 2007. – 680 p.
3. Dzhuraev R.U., Raikhanova G.E., Gubanov S.G. Design improvement for cutting elements of excavator buckets // Mining Journal. 2023, no. 3, pp. 49-55. doi.org/10.17580/gzh.2023.03.07.
4. Sarychev V.D., Granovskiy A.Yu., Nevskiy S.A. Mathematical model of internal surface wear in shovel buckets // Mining Journal. 2019, no. 8, pp. 70-73. DOI: 10.17580/gzh.2019.08.13.
5. Pobegailo P.A. Working equipment hydraulic excavators: research of geometrical properties // Mining information and analytical bulletin. 2015, no. 5, pp. 212-225.

6. Rakhutin M.G., Simba Navarrete V.H. Influence of the excavator inclination angle on the track safety margin // Mining Industry. 2023, no. 2, pp. 141-146. doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-141-146.
7. Grnez B. Hardox steels in mining // Mining Industry. 2008, no. 3(79), pp. 34-38.
8. Shestakov V.S., Teliman I.V., Bezkorovayny P.G. Investigation of the loading of hydraulic excavator working equipment // Mining equipment and electromechanics. 2024, no. 1(171), pp. 18-23. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-1-18-23.
9. Verevchkin N.G. Analysis of dynamic impact of rock on the working equipment of hydraulic excavator // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2024, no. 24, pp. 129-134. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-129-134.
10. Yu Chunlei, Bao Yingchao, Li Qi. Finite element analysis of excavator mechanical behavior and boom structure optimization // Measurement. 2021, vol. 173, p. 108637. doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108637.
11. Chen X., Han Z., Young-chul K., Haochen Z., Yantong L. Programmed system for fatigue life prediction of excavator turntables based on multi-body dynamics and finite element analysis // Heliyon. 2024, vol. 10, iss. 12, p. 33126. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33126.
12. Pavlov S.P., Bodyagina K.S. Modified simp method-based topological optimization of structures consisting of several materials // Mathematics and mathematical modeling. 2019, no. 06, pp. 19-34. DOI: 10.24108/mathm.0619.0000211.
13. Krysko A.V., Awrejcewicz J., Pavlov S.P., Bodyagina K.S., Krysko V.A. Topological optimization of thermoelastic composites with maximized stiffness and heat transfer // Composites Part B: Engineering. 2019, vol. 158, pp. 319-327. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.09.047.
14. Takezawa A., Yoon G.H., Jeong S.H., Kobashi M., Kitamura M. Structural topology optimization with strength and heat conduction constraints // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2014, vol. 276, pp. 341-361. doi.org/10.1016/j.cma.2014.04.003.

Сведения об авторах:

Веревошкин Николай Григорьевич – аспирант

nikmanver@gmail.com

Information about authors:

Verevchkin Nikolay Grigorievich – postgraduate student

Получена 05.12.2024