

Метод снижения массы гидравлического привода

Н.С. Кривошеев¹, М.М. Мусиенко², А.А. Жарковский²

¹ «ГС Юнит», Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается перспектива снижения массы гидропривода за счёт изменения конструкции и технологии изготовления исполнительного механизма привода — гидравлического цилиндра. Сделано предположение о возможности изменения материала гидравлического цилиндра на композиционный, обладающий невысокой стоимостью производства.

Цель работы — изучение метода снижения массы гидравлического привода, что важно для повышения эффективности и экономичности различных систем. В статье предлагается перспективный подход к уменьшению веса гидропривода через модификацию конструкции и технологии производства его исполнительного механизма, а именно гидравлического цилиндра.

Материалы и методы. Для успешной реализации данного подхода используются современные методы анализа данных и математическое моделирование.

Результаты. Использование метода снижения массы гидравлического привода путём изменения конструкции и технологии изготовления исполнительного механизма, а именно гидравлического цилиндра позволяет использовать преимущества использования композиционных материалов, которые не только обладают меньшим весом, но и значительно снижают производственные затраты.

Выводы. Основное внимание уделено изменению конструкции и технологии изготовления исполнительного механизма привода — гидравлического цилиндра. Предложение заменить традиционные материалы цилиндра на композиционные является перспективным решением, так как такие материалы обладают низкой стоимостью производства и высокой прочностью. Это не только уменьшает вес системы, но и сохраняет её надёжность и долговечность. Таким образом, внедрение композиционных материалов в производство гидравлических цилиндров представляется рациональным шагом в направлении создания более лёгких и экономичных гидравлических систем.

Ключевые слова: гидроцилиндр; композиционные материалы; снижение массы; инновационный привод; современная гидравлика.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Кривошеев Н.С., Мусиенко М.М., Жарковский А.А. Метод снижения массы гидравлического привода // Известия МГТУ «МАМИ». 2025. Т. 19, № 2. С. *x–y*. DOI: 10.17816/2074-0530-685142 EDN: ZOYELA

Hydraulic Mass Reduction Method

Nikita S. Krivosheev¹, Matvey M. Musienko², Aleksandr A. Zharkovsky²

¹ GS Unit, Saint Petersburg, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: This paper considers the prospects for reducing the weight of hydraulic drives by modifying the design and manufacturing technology of the actuator—the hydraulic cylinder. Feasibility of changing the hydraulic cylinder material to a composite, which offers a low manufacturing cost, is assumed.

AIM: Studying the methods for reducing the mass of hydraulic drives, which is crucial for enhancing the efficiency and cost-effectiveness of various systems. The paper presents an innovative approach to weight reduction of a hydraulic drive through modifications in the design and production technology of its actuator, specifically the hydraulic cylinder.

MATERIALS AND METHODS: Modern data analysis methods and mathematical modeling are used for successful implementation of this approach.

RESULTS: By altering the design and manufacturing technology of the actuator—the hydraulic cylinder—the method allows leveraging composite materials that not only have less weight but reduce production costs significantly as well.

CONCLUSION: The focus is on changing the design and production technology of the hydraulic drive's actuator—the hydraulic cylinder. The proposal to replace conventional cylinder materials with composites is a promising solution, as these materials offer low production costs and high strength. This not only reduces weight of the system but maintains its reliability and durability as well. Thus, introducing composite materials into the production of hydraulic cylinders appears to be a reasonable step towards development of lighter and more economical hydraulic systems.

Keywords: hydraulic cylinder; composite materials; weight reduction; innovative drive; modern hydraulics.

TO CITE THIS ARTICLE:

Krivosheev NS, Musienko MM, Zharkovsky A.A. Hydraulic Mass Reduction Method. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2025;19(2):x–y. DOI: 10.17816/2074-0530-685142 EDN: ZOYELA

Submitted: 19.06.2025 Accepted: 30.08.2025 Published online: 10.09.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Гидравлический привод имеет очень широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства. Бесспорными преимуществами гидравлического привода являются: Простота конструкции элементов привода, высокие значения силовых характеристик, малые переходные процессы. К недостаткам относят: большие габариты, высокие требования к качеству рабочей жидкости, большая масса. Гидравлический привод нашел применение в системах управления летательных аппаратов из-за преимуществ, указанных выше. Предлагается и рассматривается метод уменьшения массы гидроцилиндра, что является актуальной проблемой для самолётов, беспилотников, космических ракет и аппаратов.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНСТРУКЦИИ ГИДРОЦИЛИНДРА

Гидравлический цилиндр — объёмный гидравлический двигатель возвратно-поступательного действия. Основными составляющими являются гильза (корпус) — неподвижная часть и шток с поршнем — подвижная. Гидравлический цилиндр очень распространён во многом из-за его высокого коэффициента полезного действия и простоты конструкции.

ОПИСАНИЕ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО МЕТОДА СНИЖЕНИЯ МАССЫ

Предлагается метод уменьшения массы за счёт изменения материала гильзы гидроцилиндра применением композиционного материала (КМ). КМ называют материалы, состоящие из двух и более компонентов и обладающие свойствами, отличными от свойств составляющих их компонентов. КМ с алюминиевой матрицей становятся одним из самых востребованных материалов в промышленности из-за широкого спектра их применения в транспортном бизнесе, в том числе в автомобилестроении, аэрокосмической промышленности, поскольку они играют важную роль в снижении шума и расхода топлива по сравнению с другими материалами [1].

Компоненты КМ различны по геометрическому признаку. Матрица — компонент, обладающий непрерывностью по всему объёму, она связывает композицию, придаёт ей форму. От свойств матрицы зависят технология получения КМ и эксплуатационные свойства. В качестве матриц в КМ могут быть использованы металлы и их сплавы, полимеры органические и неорганические, керамические, углеродные и др. материалы. Компоненты, разделенные в объёме КМ и равномерно распределенные в матрице, являются армирующими наполнителями или упрочнителями. Наполнители должны обладать высокими прочностью, твёрдостью и модулем упругости по сравнению с матрицей. С увеличением модуля упругости и временного сопротивления наполнители повышаются соответствующие свойства КМ, однако они не достигают свойств наполнителя [2].

В соответствии с геометрией армирующих элементов КМ делятся на порошковые, волокнистые и пластинчатые [3]. В данном исследовании рассматривается волокнистый КМ. Металлические матричные композиты на основе матрицы из низкоуглеродистой стали, армированные проволокой из высокоуглеродистой стали, были изготовлены комбинированным процессом холодной и горячей прокатки. Были получены как непрерывно, так и прерывисто выровненные композиты [4].

КМ, состоящий из двух металлов, представляет собой биметалл.

Биметаллические градиентные сплавы в последнее время привлекают внимание исследователей в связи с их потенциальным применением в аэрокосмической и автомобильной промышленности. В этом исследовании биметаллические градиентные сплавы Al-20Si/7075 были успешно изготовлены методом совместного формования распылением и методом прокатки [5]. Алюминиево–стальной композитный пенопласт, обработанный методом гравитационного литья, состоит из стальных полых сфер и матрицы из твердого алюминиевого сплава. Пено композитный материал сталь-сталь, обработанный методом порошковой металлургии (ПМ), состоит из стальных полых сфер, упакованных в стальную матрицу [6]. Магний и алюминий используются в самых разных аэрокосмических конструкциях и транспорте. Магниево-алюминиевые сплавы привлекли большое внимание в академических исследованиях и в промышленных приложениях благодаря таким свойствам, как низкая плотность, хорошая перерабатываемость, высокая прочность, хорошая литейность и хорошие демпфирующие характеристики. Однако магниево-алюминиевые сплавы также имеют некоторые недостатки, такие как высокая реакционная способность в расплавленном состоянии, худшая усталостная ползучесть и низкая теплопроводность [7].

В отличие от рассматриваемых вариантов, делается выбор в пользу простого и дешевого в производстве, далее речь будет идти о решении предлагаемой прикладной задачи биметаллического композиционного материала.

Гильза гидроцилиндра представляет собой металлическую трубу, обычно стальную, предлагается заменить стальную трубу на специальный композит, состоящий из алюминия в качестве матрицы и стальных стержней, а также колец как наполнителя. Необходимо сравнить по прочным характеристикам стальную гильзу с композитной. Существуют и другие варианты, однако они обладают более сложной технологией производства и высокой стоимостью, к примеру: материал, полученный прессованием композиции алюминия и нанопорошков. Прутки полученные таким образом имеют волокнистое строение и лучшие свойства, по сравнению с другими металлическими композитами [8]. В лабораторных условиях изготовлены полуфабрикаты из алюминиевого сплава, армированного порошком, содержащим стабильную квазикристаллическую фазу, полученный материал продемонстрировал повышенные прочностные свойства [9]. Очень часто в композитах используется материалы на основе титана, однако из-за очень высокой стоимости применять такой композит повсеместно затруднительно и в данном исследовании не рассматривается. Многие исследователи отмечают, что алюминиды титана, образующиеся в этой системе, характеризуются высокой твёрдостью, коррозионной стойкостью, термостойкостью и низким удельным весом. Из большого числа возможных интерметаллидов, образующихся между алюминием и титаном, наибольший интерес вызывает Al_3Ti . Уникальный набор механических свойств делает три алюминид титана перспективным материалом для авиастроения [10].

Применение различных КМ зачастую позволяет снизить массу изделия, чем активно пользуются инженеры, создающие различную технику. К примеру: в авиации применяются композиционные материалы при производстве крыла самолета для снижения массы, что приводит к снижению потребления топлива. Сфера применения КМ охватывает практически все отрасли народного хозяйства, непрерывно расширяется и модернизируется. Этому способствуют: возможность широкого спектра свойств новых материалов, их превосходство над природными материалами по ряду важных свойств, таких как: физико-химические, механические, теплофизические, электрические, оптические качества; повышенная износостойкость, особые виброакустические свойства, огнестойкость [11]. КМ состоят из двух компонентов, один из которых называется армирующей фазой и состоит из волокон, листов или частиц, а другой называется фазой матрицы и встроен в армирующую фазу. В качестве армирующих и матричных материалов можно использовать металл, керамику или полимер. Армирующие материалы обычно прочны и имеют низкую плотность, тогда как матрица обычно пластичная или шероховатая [12]. Разновидностью композитов являются биметаллы. Биметаллические полуфабрикаты позволяют экономить легированные стали путем их замены на конструкционные без потери прочности конструкции [13].

Существуют композиты, изготавливаемые выдавливанием. Для получения качественного и прочного биметаллического соединения основы и рабочей части полуфабриката требуется получение совместных металлических связей путем деформационного воздействия на соединяемые материалы в зоне контакта, которое достигается при скоростном горячем выдавливании путем совместного пластического течения. Металлические связи по своей сути не относятся к химическим связям, и понятие металлической связи можно считать качественным, т.к. металлы обычно не имеют молекулярного строения, а их атомы соединяются в кристаллические образования [14]. Одним из перспективных конструкционных материалов, обладающих улучшенными характеристиками, являются материалы, получаемые с помощью различных видов армирования, такие как металломатричные КМ, состоящие из металла или сплава в качестве сплошной матрицы и армирующего компонента в виде частиц, а также коротких или непрерывных волокон. В металломатричном КМ основные металлические матрицы — это сплавы алюминия, титана, меди, магния. Алюмоматричные композиты широко применяются в промышленности [15]. Область применения КМ в судостроении и других областях промышленности обусловлена возможностями этих материалов: основным показателем роста технологичности продукции является эффективное расходование горюче-смазочных материалов. Экономия топлива — это ключевой фактор общемировой направленности. Следует отметить, что статья эксплуатационных расходов (на горюче-смазочные материалы) для судов, изготовленных с применением композитов, ниже, чем расходы таких же судов, но изготовленных с применением алюминиевого сплава. В проводимом исследовании проводится изучение вопроса снижения массы [16].

Для космической отрасли очень важны такие параметры, как масса и износостойкость. Дело в том, что чем больше вес ракеты, тем дороже выйдет её отправить в космос, именно по этой причине началось изучение новых материалов и их активное внедрение в космическую отрасль. Но прежде, чем активно внедрять в конструкцию те или иные волокна, необходимо подробно изучить их особенности, цену и доступность, так как есть вероятность что они просто будут невыгодны для массового производства или ухудшат качество выпускаемой продукции, что приведёт к тем же потерям, из-за того, что не будет выполнена основная задача [17]. Ключевая цель описываемого

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

исследования — это снижение массы гидравлического оборудования, применение которого предполагается для ракетно-космической отрасли или авиации.

Преимущества применения КМ — в строительстве опор. Главным преимуществом использования композитного армирования в строительстве — это вес самой арматуры. Масса композитного армирования значительно меньше стального армирования, что значительно сказывается при восстановлении несущих элементов, где увеличение массы элемента играет главную роль. Недостатком стального армирования является плохое сопротивление коррозии, в то время как композитная арматура не корродирует, а время износа от условий окружающей среды составляет 70 лет и более. Также композитное армирование невосприимчиво к агрессивным средам и высокой влажности, что важно для промежуточных опор мостовых сооружений. Использование композитного армирования может увеличить срок эксплуатации сооружения [18].

Наиболее перспективное направления в механике композитов — это биомеханика прочности, компьютерное моделирование оптимальных структур и технологическая механика композитов [19]. Актуальность работы обусловлена потребностью конструкторских отделов, занимающихся проектированием в методиках, которые позволяют обосновать конструктивные параметры по условиям надёжности и в то же время снижают массу. Проблема снижения массы всегда актуальна для различной техники, в том числе для строительной техники.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработка метода снижения массы объёмного гидропривода за счёт применения композитных материалов для отдельных элементов конструкции гидравлических компонентов.

МЕТОДЫ

Для снижения массы объёмного гидропривода путем использования КМ необходимо обратиться к методам, которые доказали свою эффективность в инженерной практике. На первом этапе следует провести компьютерное моделирование, чтобы оценить влияние замены традиционных материалов на композитные. Это позволит определить оптимальные места для использования композитов без ущерба для функциональности и надёжности. В дальнейшем будет проведена топологическая оптимизация, для выявления ненагруженных зон конструкции и минимизации использования избыточного материала. На третьем этапе планируется экспериментальное тестирование прототипов. Создание опытных образцов с применением композитных материалов и последующее их испытание на стендах позволит получить данные о фактической прочности и устойчивости конструкции.

Разработка объёмных моделей и расчёты проводились в Ansys mechanical.

Созданы объёмные модели стальной трубы (рис. 1) и композитной (рис. 2, 3). Последняя геометрически не отличается от стальной. Внешний диаметр труб 60 мм, внутренний 50 мм, длина 300 мм.

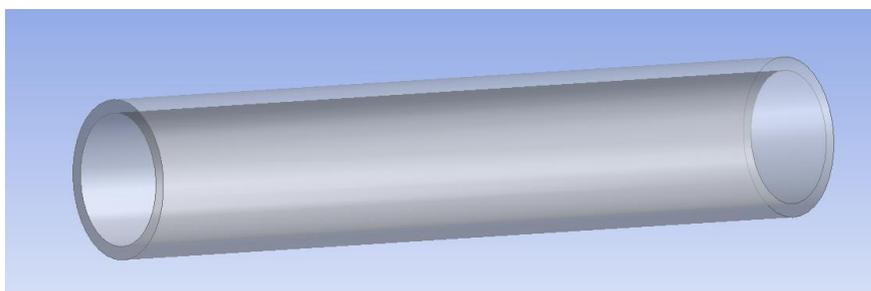


Рис. 1. Стальная труба.

Fig. 1. Steel tube.

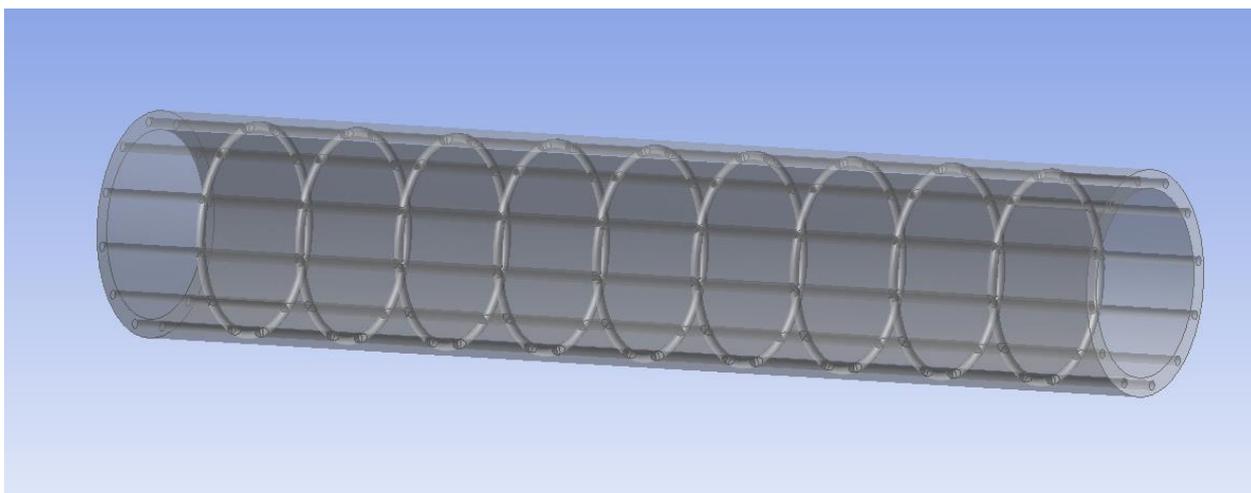


Рис. 2. Модель алюминиевой матрицы композитной трубы.

Fig. 2. Model of aluminum matrix of a composite tube.

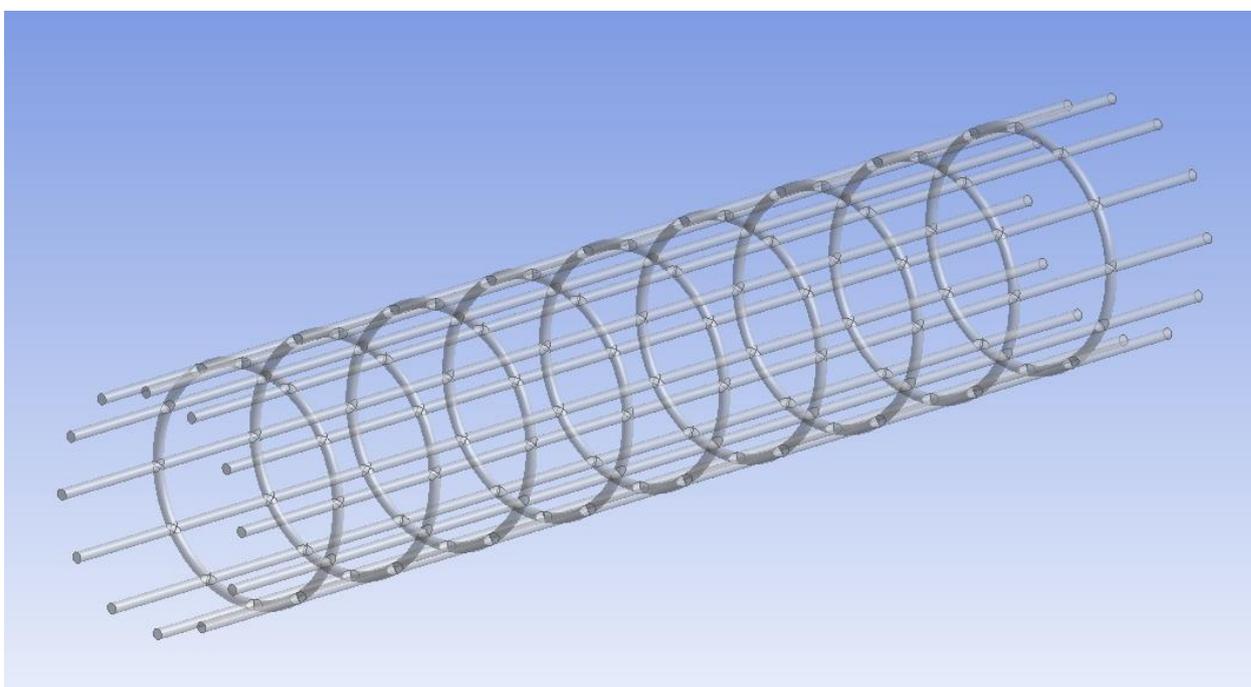


Рис. 3. Модель стального армирующего наполнителя.

Fig. 3. Model of steel reinforcing filler.

После создания моделей и определения примерных массовых характеристик производится расчёт в Ansys mechanical. Создается сетка в сеточном генераторе Mesh с размером элемента 10^{-3} м, для данного расчёта такой точности достаточно. Расчёт проводится в системе Static structural (рис. 4, 5).

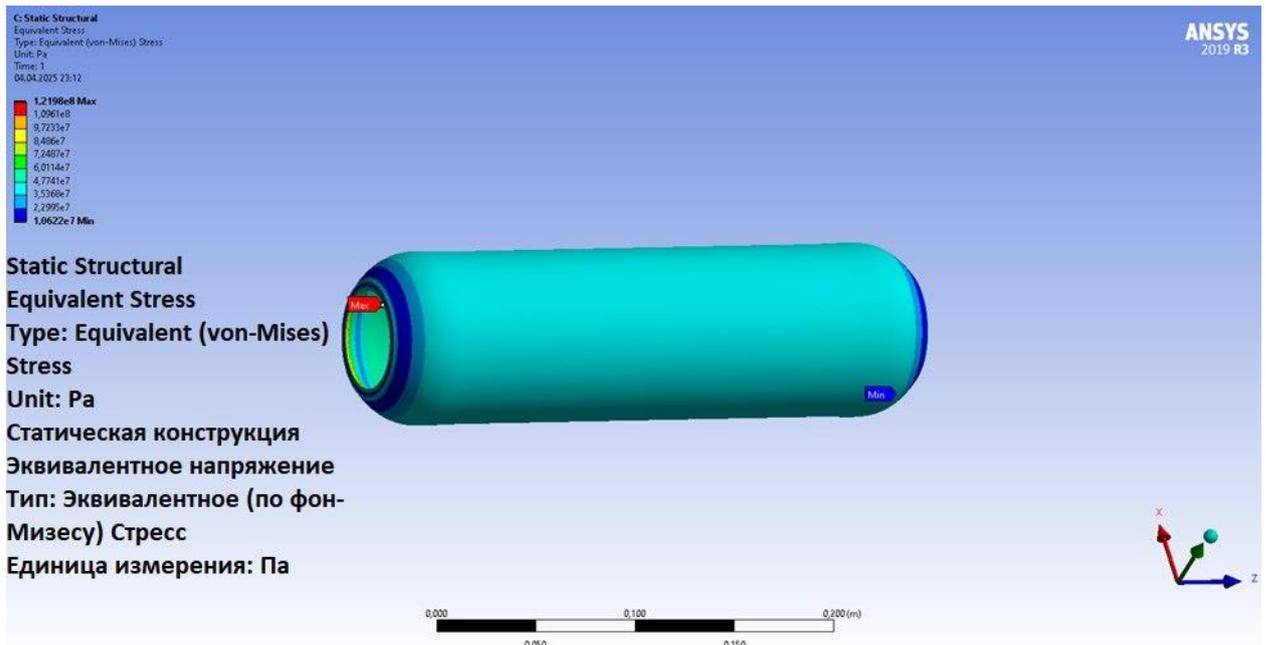


Рис. 4. Эпюра напряжения стальной трубы.

Fig. 4. Stress diagram of a steel tube.

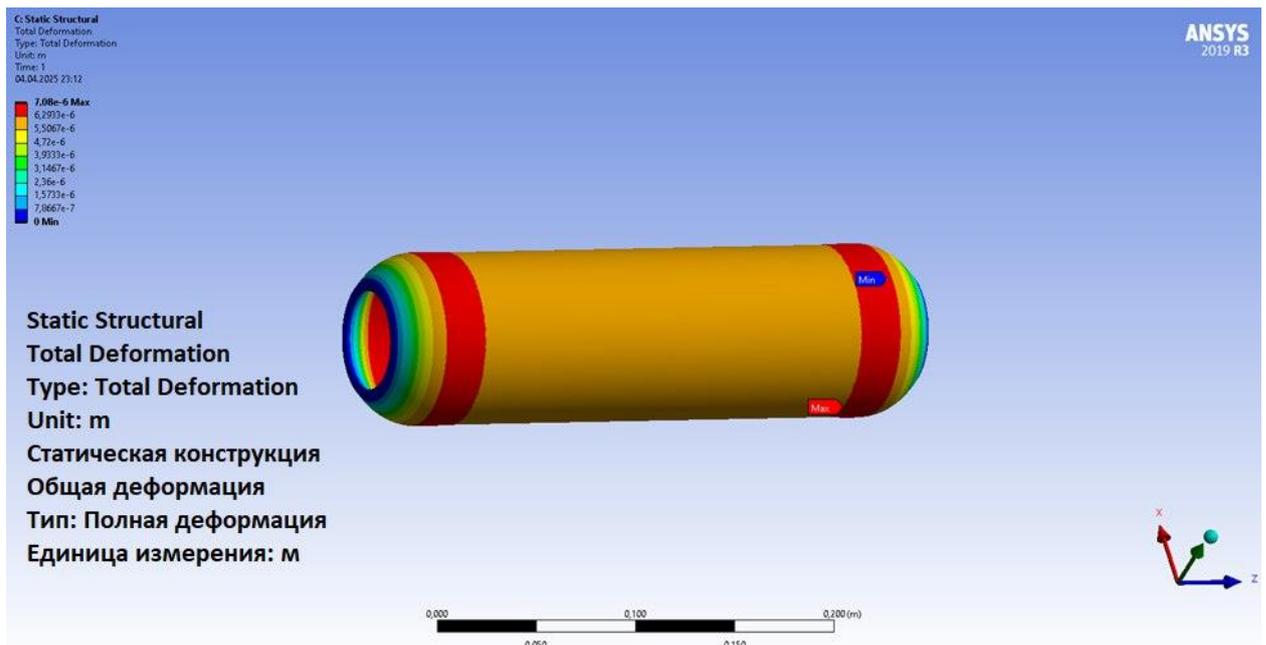


Рис. 5. Эпюра деформации стальной трубы.

Fig. 5. Deformation diagram of a steel tube.

Задаются жёсткие заделки по краям трубы и статическое давление во внутренней поверхности, равное 10 МПа (рис. 6, 7).

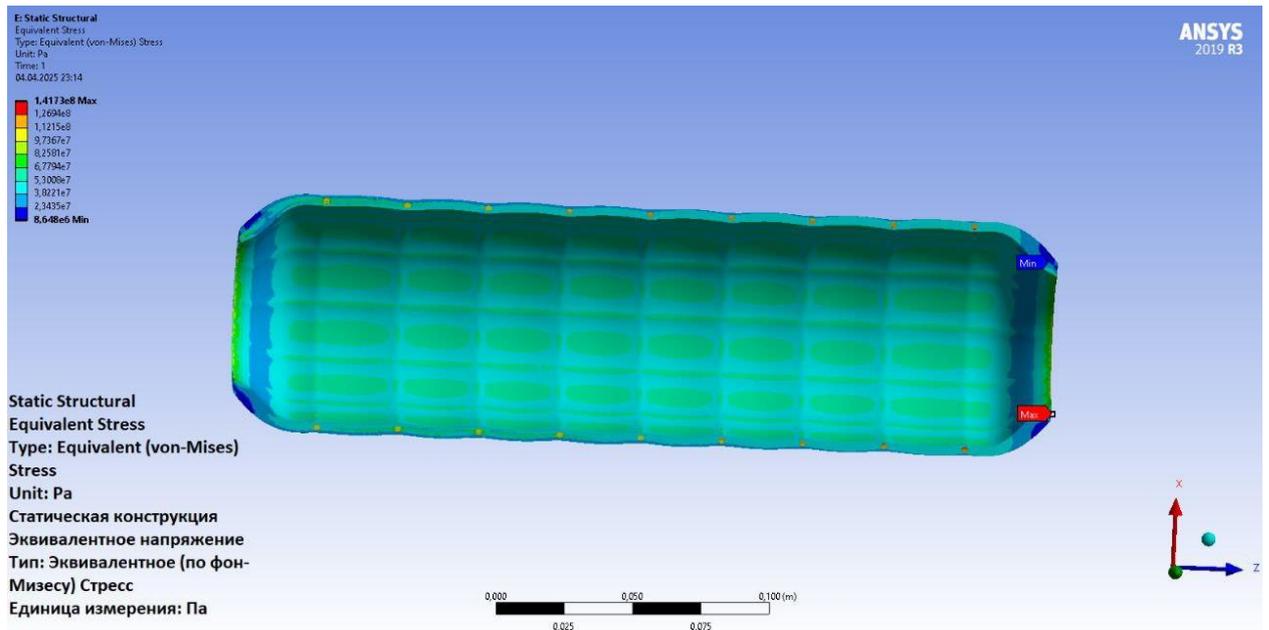


Рис. 6. Эпюра напряжения композитной трубы.
 Fig. 6. Stress diagram of a composite tube.

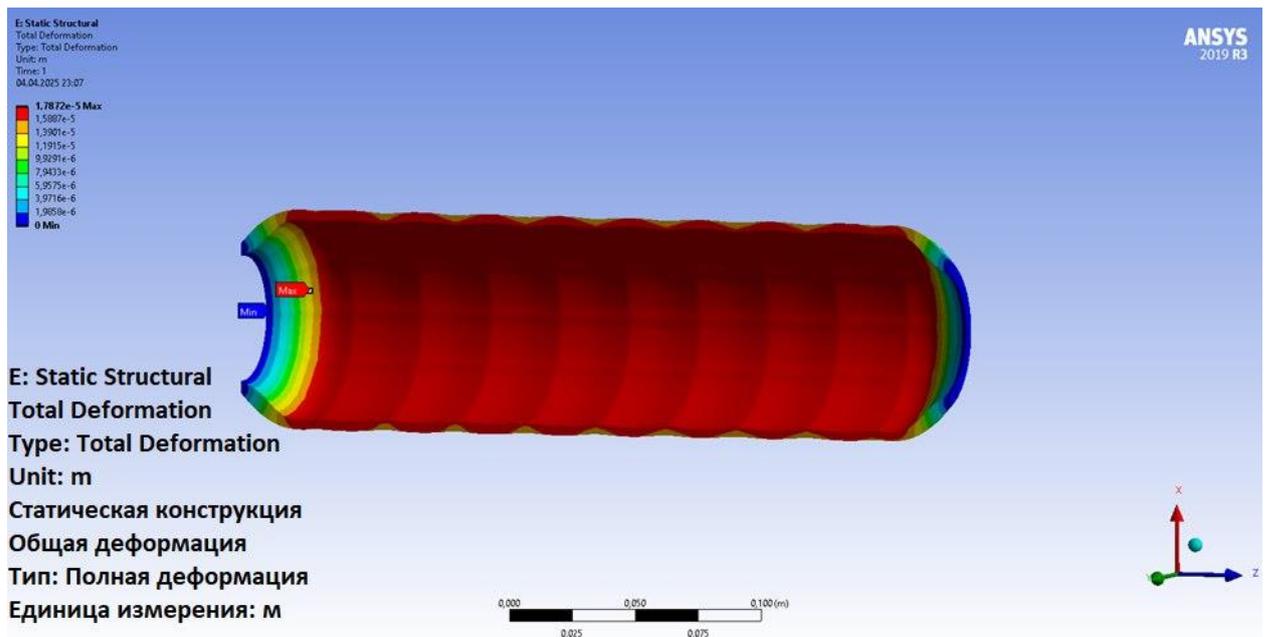


Рис. 7. Эпюра деформаций композитной трубы.
 Fig. 7. Deformation diagram of a composite tube.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение основных характеристик композитной и стальной труб приведено в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики композитной и стальной труб
 Table 1. Specifications of the composite tube and the steel

Параметр	Стальная труба	Композитная труба
Масса, г	2039,76	826,72
Напряжение по Мизесу, МПа	122	141
Максимальная деформация, м	$71 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$

Алюминий является наиболее слабым материалом, поэтому разумно сравнить предел прочности алюминия с полученным в ходе расчёта.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Из библиотеки материалов Workbench для матрицы был выбран Aluminum Alloy. Предел прочности на растяжение $\sigma_b=280$ МПа. Предел прочности материала АМГ2М составляет 200 МПа, что является достаточным для данного случая.

При исследовании боралюминиевого композита из сплава АМГ3 была получена диаграмма растяжения, из которой видно, что при максимальном напряжении в 200 МПа, деформация составляет 1% от габарита заготовки, что является приемлемым и доказывает способность алюминиевых КМ выдерживать значительные нагрузки [20]. Сплав АМГ3 претерпевает до разрушения значительные деформации. Боралюминиевый композит на основе сплава АМГ3 с наноразмерным карбидом бора характеризуется по сравнению с исходным сплавом повышенными на 40–110 МПа прочностными свойствами [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённых исследований показывают значительный потенциал в снижении массы гидравлических систем через использование композиционных материалов, что подтверждается систематическими оценками. Однако нерешёнными остаются вопросы оптимальной конструкции и технологии производства, которые позволят максимально эффективно использовать композитные материалы.

Полученные результаты демонстрируют, что использование композитных материалов в гидравлических цилиндрах не только уменьшает вес системы, но и способствует снижению металлоёмкости. Это особенно важно для повышения эффективности и экономичности гидроприводов различного применения. Применение композитных материалов позволяет сохранить прочность гидравлических компонентов, что подтверждается моделированием и экспериментальными данными. Внедрение новых технологий производства способствует увеличению конкурентоспособности продукции на рынке. Таким образом, исследование вносит значительный вклад в развитие производства более лёгких и экономичных гидравлических компонентов, предлагая перспективные решения для оптимизации их конструкции и используемых материалов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Н.С. Кривошеев — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи; М.М. Мусяненко — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи; А.А. Жарковский — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы использовали фрагменты ранее опубликованных собственных сведений (текст, иллюстрации, данные), отмеченные ссылками на источники в списке литературы.

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: M.M. Musienko: literature review, collection and analysis of literary sources, preparation and writing of the manuscript; N.S. Krivosheev: literature review, collection and analysis of

literary sources, preparation and writing of the manuscript; A.A. Zharkovskii: literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the manuscript. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: N/A.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Amanollahi A, Ebrahimzadeh I, Raeissi M, et al. Laminated steel/aluminum composites: Improvement of mechanical properties by annealing treatment. *Materials Today Communications*. 2021;29:102866. doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102866 EDN: IZEIVB
2. Kuzina AA. *Composite Materials*. Samara: Samara University; 2023. (In Russ.)
3. Bataev A, Bataev VA. *Composite Materials: Structure, Production, Application*. Moscow: Universitetskaya kniga, Logos; 2006. (In Russ.)
4. Sun S, Pugh M. Fabrication and mechanical properties of steel–steel composites. *Materials Science and Engineering: A*. 2001;300(1-2):135–141. doi: 10.1016/S0921-5093(00)01657-9 EDN: YITFGI
5. Rohem NRF, Pacheco L, Budhe S, et al. Development and qualification of a new polymeric matrix laminated composite for pipe repair. *Composite Structures*. 2016;152:737–745. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.05.091
6. Vendra L, Neville B, Rabiei A. Fatigue in aluminum–steel and steel–steel composite foams. *Materials Science and Engineering: A*. 2009;517(1-2):146–153. doi: 10.1016/j.msea.2009.03.075
7. Chen ZJ, Liu Q, Wang G, et al. Deformation inhomogeneities of Mg–Al laminated metal composites fabricated by accumulative roll bonding. *Materials Research Innovations*. 2015;19(sup4):S147–S151. doi: 10.1179/1432891715Z.0000000001533
8. Kochkina GV, Krushenko GG. Strength calculation of aluminum composite fibers. *Current Issues in Aviation and Cosmonautics*. 2013;1(9):113–114 (In Russ.) EDN: TAPSEN
9. Kuis DV, Volochko AT, Shegidevich AA, et al. Aluminum composite reinforced with quasicrystalline particles Al–Cu–Fe. *Proceedings of BSTU Forestry and Wood Industry*. 2015;2(175):229–233. (In Russ.) EDN: WMSIFJ
10. Bataev IA, Bataev AA, Mali VI, Pavliukova DV. Structural and mechanical properties of metallic–intermetallic laminate composite produced by explosive welding and annealing. *Material and Design*. 2012(35):225–234. (In Russ.) doi: 10.1016/j.matdes.2011.09.030 EDN: AYVYNW
11. Kolosova AS, Sokolskaya MK, Vitkalova IA, et al. Modern polymer composite materials and their applications. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;(5-1):245–256. (In Russ.) EDN: OZTDRV
12. Bakholdin DG. Application of composite materials in construction. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;(5-1(92)):189–192. (In Russ.) doi: 10.24412/2500-1000-2024-5-1-189-192 EDN: AVSWVS
13. Lebedeva OV, Sipkina EI. Polymer composites and their properties. *Proceedings of Universities: Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(2(41)):192–207. (In Russ.) doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207 EDN: BSBTTQ

14. Kachanov IV, Lenkevich SA, Vlasov VV, et al. Features of developing technologies for producing bimetallic semi-finished products for tool purposes by high-speed hot extrusion. *Science and Technology*. 2025;24(3):192–203 (In Russ.) doi: 10.21122/2227-1031-2025-24-3-192-203 EDN: GPEGJU
15. Meleshin MA, Ali S, Mazen A. Experience in the application of composite materials in shipbuilding. *Bulletin of Astrakhan State Technical University: Marine Equipment and Technology Series*. 2022;2:44–50. (In Russ.) doi: 10.24143/2073-1574-2022-2-44-50 EDN: UXSRLV
16. Kustov AV, Rozhkova E A, Bordachev VA. Composite materials in the rocket and space industry. In: *Science, Technology, Society - NTO-II-2022*. Krasnoyarsk: Obshchestvennoe uchrezhdenie "Krasnoyarskiy kraevoy Dom nauki i tekhniki Rossiyskogo soyuza nauchnykh i inzhenernykh obshchestvennykh obedineniy"; 2022:101–109. (In Russ.) EDN: NSHXS
17. Alekseev SV, Ogurtsov GL, Trifonova AA, et al. Comparison of characteristics of composite materials used in bridge support structures. In: *Science Week ISI Proceedings*. Saint Petersburg: SPbPU; 2021:237–239. (In Russ.) EDN: FMIVOK
18. Polilov AN, Tatus' N.A. Biomimetics in the design of constructions from fibrous composites. *XXXII International Innovative Conference for Young Scientists and Students on Machine Science Issues*. 2021:17–23. (In Russ.) EDN: TTZNZK
19. Bezkorovainyi PG, Shestakov VS. Determining optimal parameters for hydraulic excavator working equipment with a pressure link. *Proceedings of Higher Education Institutions: Mining Journal*. 2023;1:25–35. doi: 10.21440/0536-1028-2023-1-25-35 (In Russ.) EDN: HMXSFD
20. Gladkovsky SV, Trunina TA, Kokovikhin EA, Smirnova (Kutenyeva) SV. Technology for obtaining and properties of layered steel-aluminum composites. *Rolling Production Journal*. 2011(12):25–29. (In Russ.) EDN: PBQSYF
21. Gladkovsky SV, Trunina TA, Kokovikhin EA, et al., Structure and properties of boron-aluminum composites obtained by hot rolling. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(1-2):361–364. (In Russ.) EDN: OORVIZ

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

<p>* Кривошеев Никита Сергеевич, директор по производству и научной деятельности; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Садовая, д. 91; ORCID: 0009-0009-1754-431; eLibrary SPIN: 3147-5597; e-mail: ax@hydraulicunit.ru</p>	<p>* Nikita S. Krivosheev, Production and Science Director; address: 91 Sadovaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; ORCID: 0009-0009-1754-431; eLibrary SPIN: 3147-5597; e-mail: ax@hydraulicunit.ru</p>
<p>Соавторы:</p>	<p>Co-Authors:</p>
<p>Мусиенко Матвей Максимович, студент Высшей школы энергетического машиностроения; ORCID: 0009-0001-5793-060X; eLibrary SPIN: 3931-9246; e-mail: matvey.polesie@gmail.com</p>	<p>Matvey M. Musienko, student of the Higher School of Power Engineering; ORCID: 0009-0001-5793-060X; eLibrary SPIN: 3931-9246; e-mail: matvey.polesie@gmail.com</p>
<p>Жарковский Александр Аркадьевич, д-р техн. наук, профессор, профессор Высшей школы энергетического машиностроения; ORCID: 0000-0002-3044-8768; eLibrary SPIN: 3637-7853; e-mail: azharkovsky@gmail.com</p>	<p>Alexander A. Zharkovsky, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Higher School of Power Engineering; ORCID: 0000-0002-3044-8768; eLibrary SPIN: 3637-7853; e-mail: azharkovsky@gmail.com</p>
<p>* Автор, ответственный за переписку / * Corresponding author</p>	