

Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание
МОО "Стратегия объединения"
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:
//Машины и установки: проектирование,
разработка и эксплуатация.
Электрон. журн. 2023. № 3. С. 1 – 15.

DOI:

Представлена в редакцию: 17.06.2023

Принята к публикации: 17.08.2023

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 629. 33

Разработка ROPS из алюминиевых сплавов для фронтальных погрузчиков

Левенков Я.Ю., Вдовин Д.С.,
Александров Д.А.*

* aleksandrovdimas10@gmail.com

МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)

Актуальность. В настоящее время для фронтальных погрузчиков широкое распространение получили кабины с интегрированными устройствами защиты при опрокидывании (roll over protective structure; ROPS) и защиты от падающих предметов (falling-object protective structure; FOPS). Если на конструкцию FOPS не влияют массовые параметры машины, то ROPS существенно от них зависит. Для погрузчика с ROPS сложной и дорогостоящей частью является кабина. Одним из путей снижения стоимости её производства является унификация узлов для типоразмерного ряда погрузчиков. Но тогда проектирование ROPS должно быть выполнено для модели погрузчика с наибольшей массой. Однако такой подход приводит к увеличению металлоемкости и стоимости погрузчиков, имеющих меньшую грузоподъемность. В итоге снижается энергоэффективность машины.

Перспективным направлением повышения энергоэффективности является снижение массы кабин за счет применения алюминиевых сплавов, т.к. они обладают высокой удельной прочностью по отношению к стали. Объектами исследования являются колесные фронтальные погрузчики полной массой 10, 15 и 30 тонн. Предметом исследования является применение расчетных методов, основанных на методе конечных элементов при проектировании кабин из алюминиевых сплавов.

Цель исследования – разработать методику проектирования каркаса кабины из алюминиевого сплава, которая позволит получить кабину меньшей массы и повышенной технологичности по сравнению с аналогами.

Методология и методы. В статье представлены разработанные конечно-элементные модели конструктивно-подобных образцов кабины в статической постановке с учетом геометрической и физической нелинейностей.

Результаты и научная новизна. В работе представлена методика выбора основных конструктивных параметров кабины из алюминиевого сплава.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при создании кабин фронтальных погрузчиков.

Ключевые слова: Расчет на прочность, ROPS, фронтальный погрузчик, метод конечных элементов, нагрузки, кабина, сварное соединение, алюминиевый сплав.

Введение

Кабины современных колесных фронтальных погрузчиков имеют встроенные ROPS и FOPS. Кабина является одним из самых сложных и дорогостоящих изделий фронтального погрузчика. Помимо размещения в кабине большого количества оборудования, которое должно быть прокомпоновано таким образом, чтобы обеспечить требования эргономики, обзорности и безопасности. Сам же каркас кабины является элементом пассивной безопасности, обеспечивающий защиту оператора при опрокидывании машины.

Требования к пассивной безопасности кабин установлены ГОСТ ISO 3471-2015 [1].

Каркас кабины изготавливают из стальных профилей, характеристики материала которых удовлетворяют требованиям стандарта. Дополнительно для размещения уплотнителей дверей, размещения стекол необходимо создать буртики, которые обычно выполняют путем приваривания дополнительных профилей. Изготовление кабины из стандартных профилей каркаса имеет следующие недостатки:

- увеличение массы кабины;
- увеличение сборочных операций, усложнение технологии изготовления кабины;
- большое количество сварных швов.

Для предприятия, производящего несколько типоразмеров фронтальных погрузчиков различной грузоподъемности, целесообразно разработать унифицированную конструкцию кабины, что позволит снизить себестоимость машины. Но использование унифицированной кабины приведет к увеличению массы погрузчиков меньшей грузоподъемности, т.к. кабина будет спроектирована, исходя из массовых характеристик машины максимальной грузоподъемности, что приведет к снижению энергоэффективности.

С целью снижения массы кабин используют специальные «кабинные» профили. Преимущества специальных «кабинных» профилей:

- снижение количества сборочных единиц каркаса кабины;
- удобные пазы для размещения уплотнителя и кромки двери, стекла;
- высокая прочность, пластичность и ударная вязкость на морозе;

В целом, использование стальных профилей имеет следующие недостатки:

- большая масса каркаса кабины. Около 50% массы кабины составляет силовой каркас;
- даже при использовании кабинных профилей каркас кабины имеет большое количество сварных швов, имеющими сложную траекторию, поэтому к технологии сварки предъявляют строгие требования по механическим свойствам, в т.ч. морозостойкость;

- использование высокопрочных сталей с высокими механическими свойствами и хорошей свариваемостью приводит к значительному удорожанию каркаса кабины;

- ограниченное предложение по изготовлению профилей с необходимой формой поперечного сечения (в РФ отсутствует специальное гибочное прокатное оборудование для изготовления таких профилей);

- невозможно или сложно придать профильной трубе необходимую форму, поэтому гнутые трубы необходимо заказывать у изготовителя (например, дугообразный профиль в районе лобового стекла);

- при использовании стандартного профиля с наваренными буртиками для размещения уплотнителя двери, стекол существенно возрастает масса каркаса (в среднем на 20%), а также добавляется количество сварных швов, что нетехнологично и ухудшает внешний вид кабины, который является критичным агрегатом по дизайну.

В качестве перспективного направления в кабиностроении можно рассмотреть применение алюминиевых сплавов. Алюминиевые сплавы имеют следующие преимущества: высокая удельная прочность; коррозионная стойкость; сохранение показателей ударной

вязкости при низких температурах. Так же преимуществом алюминиевых сплавов является возможность изготовления профилей при помощи экструзии, что позволяет изготавливать поперечные сечения довольно сложной формы при относительно простой технологии. Основным недостатком алюминиевых сплавов является трудная их свариваемость и низкая пластичность сварного шва [2-4].

В настоящее время, ведется активная работа по улучшению механических свойств алюминиевых сплавов и совершенствованию технологий изготовления из них изделий, что расширяет возможности их применения в машиностроении, в том числе, и для производства каркасов кабин дорожно-строительной техники.

Современные методы расчета, основанные на методе конечных элементов, позволяют подробно исследовать поведение конструкции под нагрузками с учетом геометрической и физической нелинейности на ранних стадиях проектирования изделия.

Целью данной работы является разработка методики проектирования каркаса кабины из алюминиевого сплава, которая позволит получить кабину меньшей массы и повышенной технологичности по сравнению с аналогами.

Общее описание конструкции каркаса кабины из алюминиевого сплава

В процессе нагружения кабины нагрузками ROPS максимальные пластические деформации возникают в местах стыковки труб в зонах сварных швов [5, 6]. На рис. 1 показан пример бокового нагружения. Прочностные расчеты (рис. 2а и 2б) показывают, что максимальные напряжения возникают в местах стыковки труб, следовательно, работоспособность конструкции определяется работоспособностью сварных соединений.

Данное явление усложняет использование алюминиевых сплавов.



Рис. 1. Пример нагружения ROPS каркаса кабины боковой нагрузкой

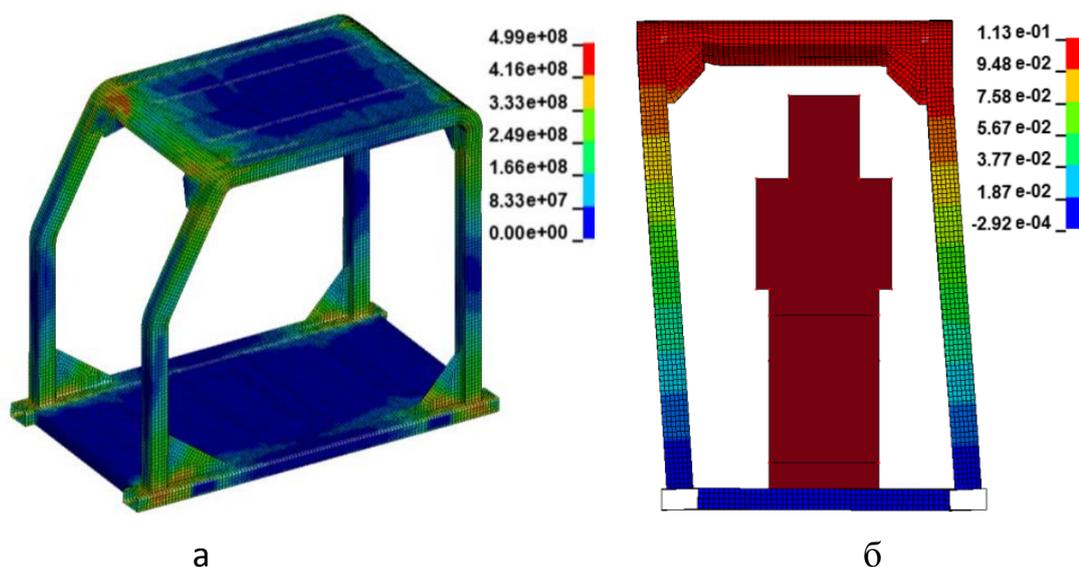


Рис. 2. Пример НДС (напряженно-деформированного состояния) кабины (пластические деформации): а – изометрия; б – вид спереди

Использование алюминиевых сплавов в конструкции каркаса позволяет снизить его массу (ориентировочно на 30%) по сравнению со стальными аналогами.

Каркас кабины из алюминиевого сплава показан на рис. 3а и 3б. Каркас представляет собой сварную конструкцию.

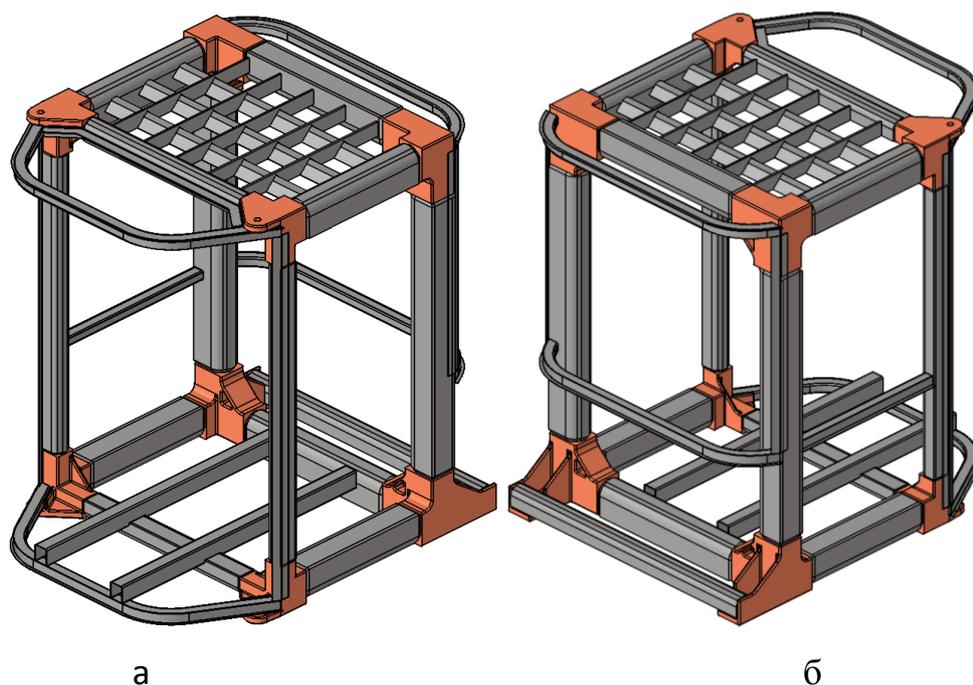


Рис. 3. Каркас кабины из алюминиевого сплава: а – вид спереди; б – вид сзади

В разработанной конструкции кабины предложено использовать кронштейны (рис. 4а, 4б и 4в), которые соединяют между собой трубы. При этом сварные швы удалены на некоторое расстояние от угла кронштейна. Основными элементами, обеспечивающими выполнение требований пассивной безопасности, являются алюминиевые профильные трубы. При этом сварной шов, соединяющий кронштейн и трубу имеет достаточно простую траекторию, что повышает технологичность. Для снижения нагруженности сварного

соединения, на концах кронштейнов выполнены пазы, обеспечивающие сборку по технологии «шип-паз», что позволяет уменьшить количество оснастки, необходимой при сборке кабины. Угловые кронштейны должны быть выполнены достаточно прочными, что позволяет изготовить их с помощью 3D печати [7] и не допустить в них больших пластических деформаций. Это позволяет обеспечить высокую надежность кронштейнов по условию прочности.

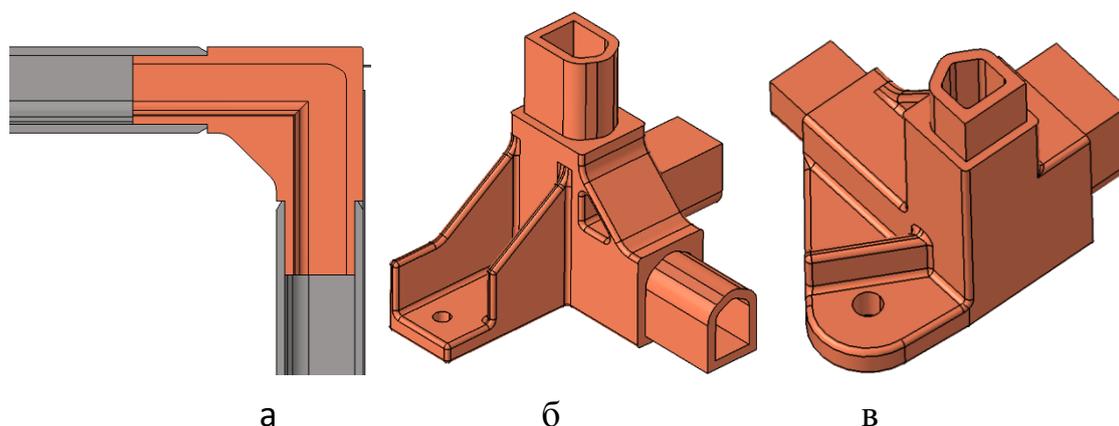


Рис. 4. Кронштейны каркаса кабины: а – в разрезе; б – вид спереди; в – вид сзади

Предложенная конструкция кабин из алюминиевого сплава обеспечивает следующие преимущества:

- существенно меньшая масса по сравнению со стальными аналогами;
- существенно меньшая трудоемкость изготовления;
- меньшее количество сварных швов, несущие сварные швы имеют относительно простую траекторию;
- коррозионная стойкость каркаса, не обязательно красить;
- вязкостные свойства алюминиевых сплавов не снижаются при отрицательных температурах окружающей среды.

Методика выбора основных параметров каркаса

Основные параметры каркаса определяются в следующей последовательности:

- 1) определение компоновочного пространства кабины, расположение стоек каркаса в соответствии с требованиями по обзорности [8], эргономике и дизайну, а также с учетом размещения агрегатов в кабине;
- 2) определение предварительного размера сечений профилей силового каркаса;
- 3) проведение поверочного расчета с выбранными параметрами сечений;
- 4) определение параметров сварного соединения кронштейна и профиля на конструктивно-подобном образце, определение параметров шипа и сварного шва;
- 5) поверочный расчет каркаса кабины с учетом соединений шип-паз.

Основные компоновочные параметры кабины приведены на рис. 3. Далее необходимо подобрать предварительные параметры сечений балок. Балочная модель показана на рис. 5. Боковая сила в расчетной модели приложена к кронштейну силового каркаса, который находится напротив головы оператора, т.к. в данной точке измеряются максимальные перемещения. Для определения параметров сечений проведена параметрическая оптимизация. Целевая функция: минимум объема материала; ограничения: максимальное перемещение при боковом нагружении 220 мм (в точке приложения нагрузки), максимальное напряжение 540 МПа для всех расчетных случаев для элементов, находящихся на удалении

углов каркаса (на рисунке показаны синим цветом), что соответствует энергии деформации 49000Дж. Данные ограничения выбраны исходя из условия сохранения необходимого жизненного пространства внутри кабины и механических свойств алюминиевых сплавов. Варьируемые параметры – длина, ширина и толщина стенок сечения профиля. При расчете использовалась линейная модель материала. Свойства материалов приведены в табл. 1. Алюминий АЛ8 используется в кронштейнах, находящихся в угловых частях каркаса, а алюминий АМг5 в профилях, соединяющих кронштейны.

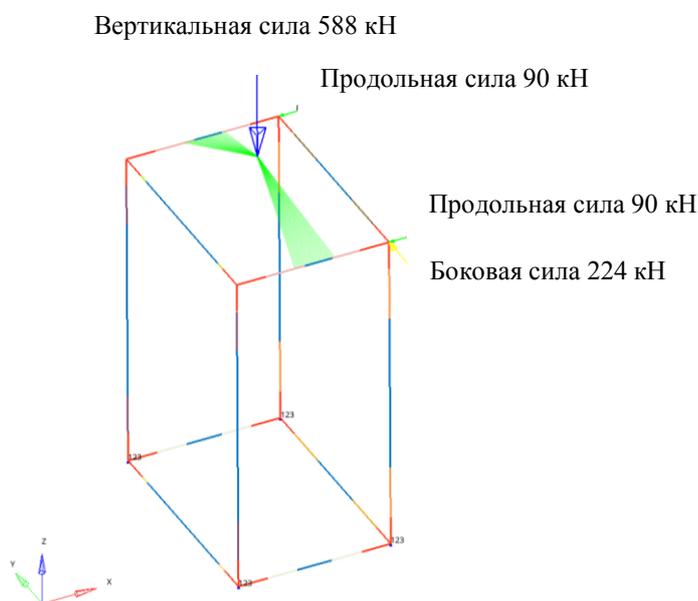


Рис. 5. Балочная КЭМ (конечно-элементная модель) каркаса кабины для предварительных расчетов

Таблица 1. Свойства материала

Материал	Модуль упругости, E, МПа	Коэфф. Пуассона	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение при разрыве, d5, %
АЛ8	70000	0,33	170	320	11
АМг5	70000	0,33	180	290	15

Следующим шагом является проверочный расчет с учетом пластичности материалов для упрощенной оболочечной модели. По результатам расчета проводится уточнение параметров несущих элементов кабины по требованиям ROPS.

Для уточнения параметров сечения и кронштейнов предложено использовать конструктивно-подобные образцы (КПО). Пример КПО представлен на рис. 6. Требования к разработке конструктивно-подобного образца:

- схожие геометрические параметры (размеры и форма поперечного сечения, длина) с реальными элементами проектируемого каркаса кабины;
- технология изготовления и сборки КПО и элементов реального объекта;
- нагружение КПО, которое близко к условиям работы реальных несущих элементов каркаса кабины.

Конструктивно-подобный образец позволяет определить параметры кронштейна (такие как длина шипа), провести сравнительный анализ сварного соединения, сечений и т.д. Так же целесообразно провести экспериментальные исследования с использованием КПО для подтверждения работоспособности выбранных конструктивных решений.

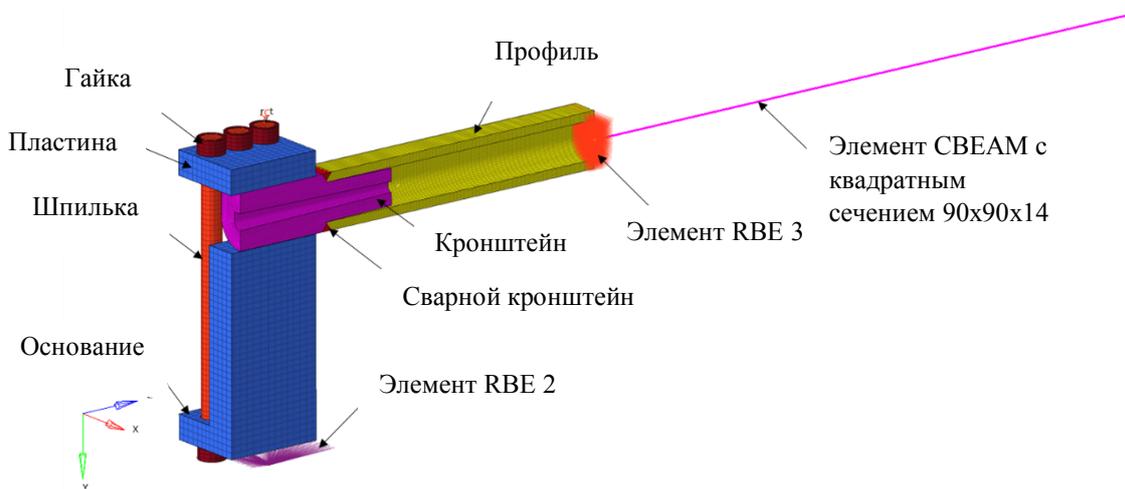


Рис. 6. Конструктивно-подобный образец

Граничные условия для КПО показаны на рис. 7.

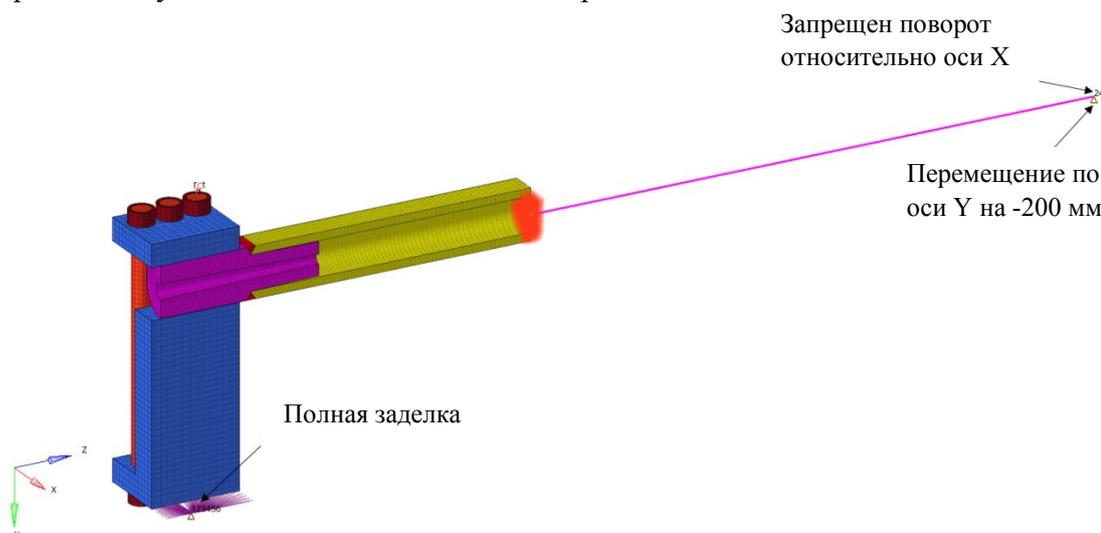


Рис. 7. Граничные условия

В результате исследования КПО с различными длинами шипа, который предназначен для разгрузки сварных швов получены следующие результаты, которые показаны в виде графиков. Контролируемые точки показаны на рис. 8.

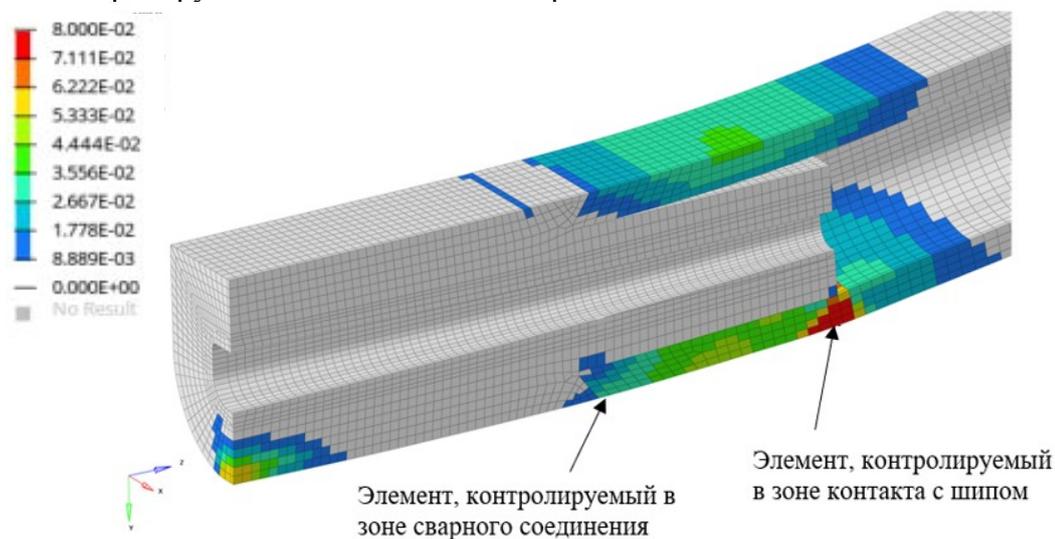


Рис. 8. Пример результатов расчета

В результате расчета были получены зависимости пластических деформаций в зоне контакта шипа и основного материала (рис. 9), сварного соединения (рис. 10) и потенциальной энергии деформации образца (рис. 11).

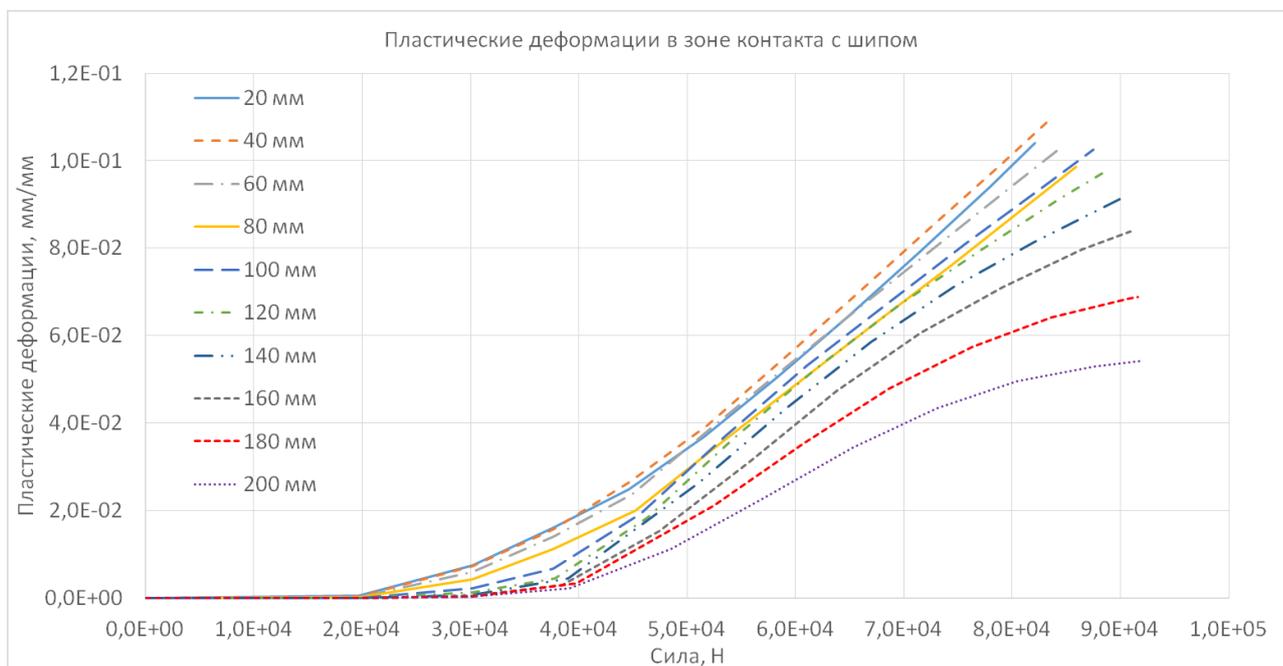


Рис. 9. Пластические деформации в зоне контакта с шипом

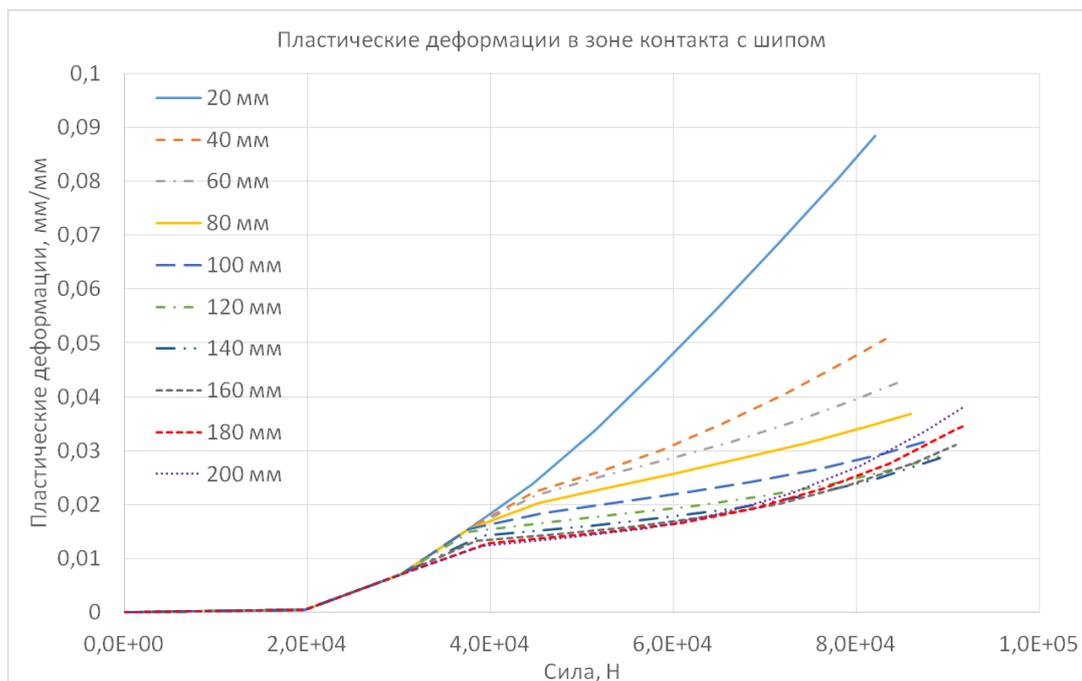


Рис. 10. Пластические деформации в зоне сварного соединения

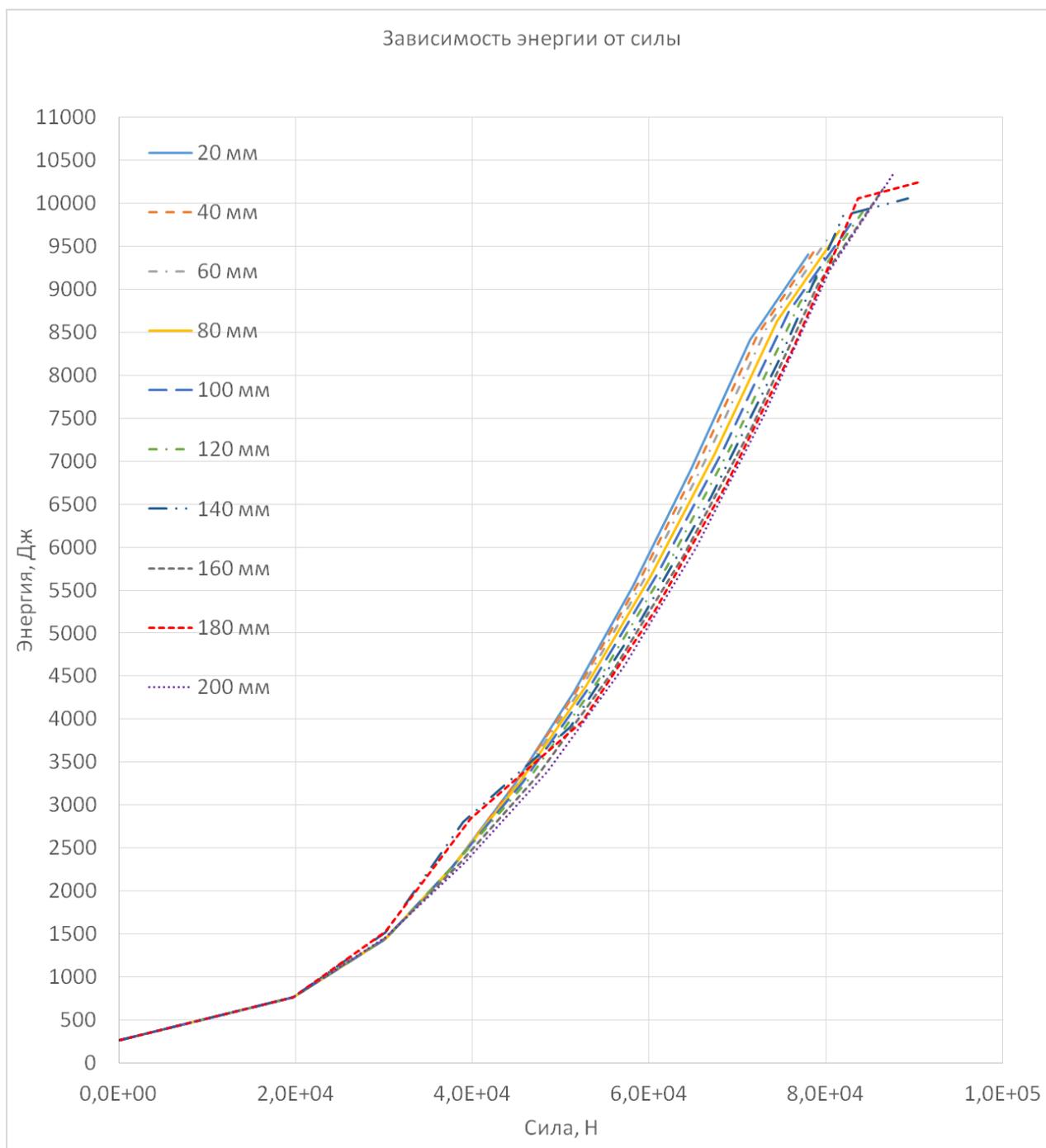


Рис. 11. Потенциальная энергия деформации

Основные требования к прочностным характеристикам КПО:

Максимальные пластические деформации основного металла не должны превышать предел текучести.

Минимальные пластические деформации в зоне сварного шва.

По возможности, минимум материала емкости изделия.

Наиболее опасным местом является сварное соединение, поэтому рациональная длина шипа, в первую очередь определяется допускаемыми пластическими деформациями в зоне сварки.

В результате анализа графиков, показанных на рис. 12, рациональной длиной шипа была выбрана длина 120мм (по пластическим деформациям в зоне сварки (рис. 12б), массе (рис. 12в) и энергии (рис. 12а)).

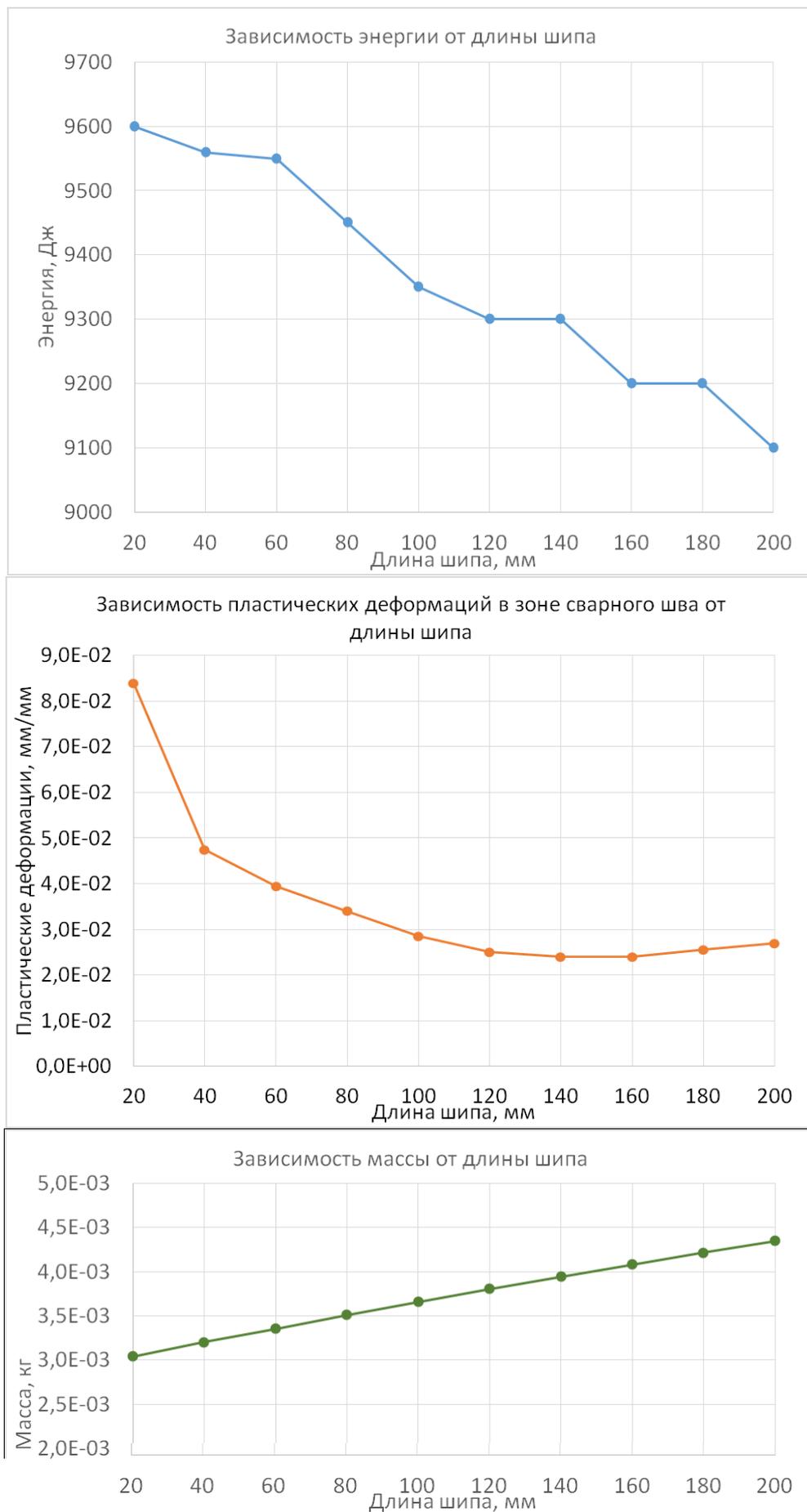


Рис. 12. Зависимость пластических деформаций, массы и энергии от длины шипа

На рис. 13 показаны результаты расчета с выбранной длиной шипа для бокового нагружения. На рис. 13а показано перемещение, мм, на рис. 13б – эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа, на рис.13в – пластические деформации, мм/мм.

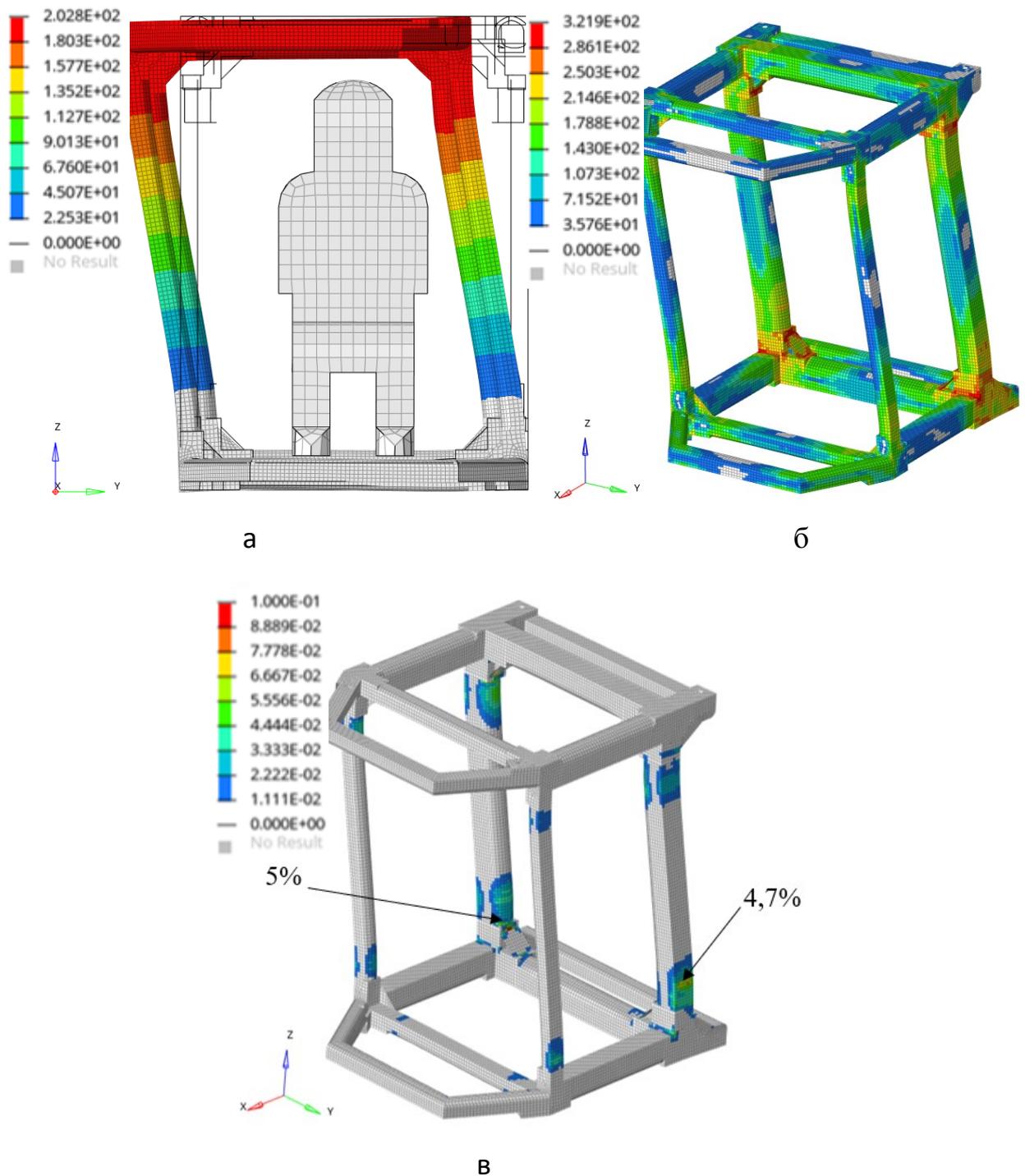


Рис. 13. Результаты расчета

На рис. 14 показана зависимость энергии от перемещений. Сравнение полученных результатов с требованиями ГОСТ ISO 3471-2015 приведены в табл. 2.

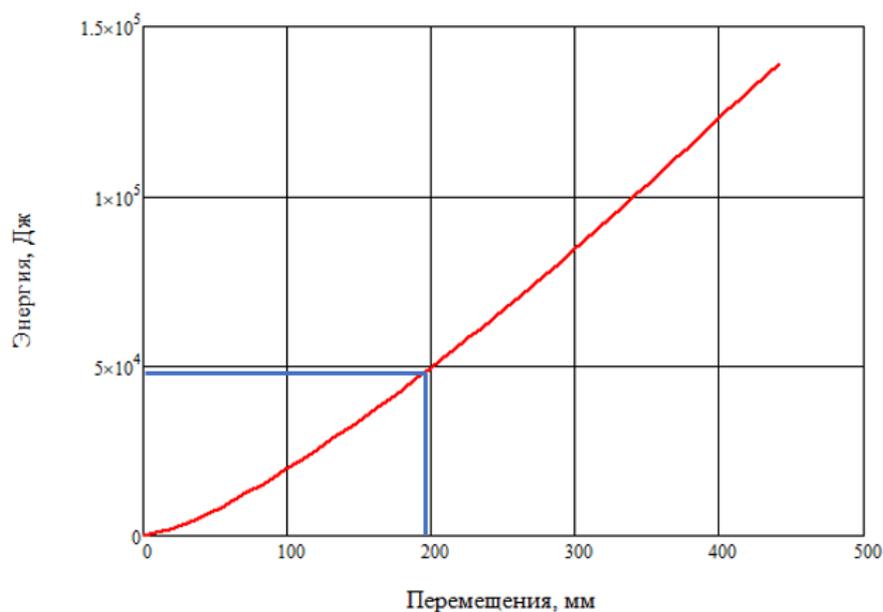


Рис. 14. Зависимость энергии от перемещений

Таблица 2. Результаты расчета

	Требования по ГОСТ ISO 3471-2015	Полученные результаты
Сила, Н	224321	321040
Энергия, Дж	49350	48973

Проведенные расчеты показали работоспособность предложенной конструкции кабины из алюминиевого сплава.

Результаты и выводы

1. Представлена методика проектирования каркаса кабины со встроенным ROPS с использованием алюминиевых сплавов. В процессе проектирования использованы КЭМ конструктивно-подобного образца, позволяющего утонить параметры конструкции ROPS. Так же, КПО можно использовать для проведения экспериментальных исследований прочности при выборе конструктивных решений.

2. Трубы кабины требуется изготавливать из деформируемых алюминиевых сплавов. Применение 3D печати кронштейнов кабины позволит изготавливать кронштейны из близких групп алюминиевых сплавов из которых изготовлены трубы, что позволит повысить прочностные характеристики сварного шва.

3. Проверочные расчеты показали, что каркас кабины, изготовленный из алюминиевого сплава, соответствует требованиям, предъявляемым к ROPS.

Список литературы

1. ГОСТ ISO 3471-2015. Машины землеройные. Устройства защиты при опрокидывании. Технические требования и лабораторные испытания. - М.: Российский институт стандартизации, 2021. - 34 с.
2. Развитие литейных алюминиевых сплавов в ВИАМ (к 120-летию со дня рождения И.Ф. Колобнева) / Д. В. Огородов, А. В. Трапезников, Д. А. Попов, С. И. Пентюхин // Труды ВИАМ. – 2017. – № 2(50). – С. 107-114.
3. Абрамов, А. А. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. Достижения и перспективы. Часть II. Технологические процессы / А. А. Абрамов // Литейное производство. – 2021. – № 3. – С. 2-8.
4. Саранин, Л. Г. Исследование получения изделий из наноструктурированных алюминиевых сплавов с улучшенными механическими свойствами / Л. Г. Саранин // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2022. – № 35. – С. 49-53.
5. G. Kokot, W. Ogierman. The Numerical Simulation of FOPS and ROPS Tests using LS-DYNA. *Mechanika*. – 2019. - Volume 25(5) pp. 383-390. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.25.5.4314>
6. Четвериков М.В., Гончаров Р.Б., Бутарович Д.О. Исследование остаточного напряжённо-деформированного состояния несущей системы минипогрузчика при многократном нагружении по требованиям стандарта безопасности ROPS. *Труды НАМИ*. 2023;(1):46-55. <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-1-46-55>
7. O. Panchenko, D. Kurushkin , I. Mushnikov, A. Khismatullin, A. Popovich. A high-performance WAAM process for Al–Mg–Mn using controlled short-circuiting metal transfer at increased wire feed rate and increased travel speed. *Materials and Design* 195 (2020) 109040. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109040>
8. ГОСТ Р ИСО 5006-2010. Машины землеройные. Поле обзора оператора. Метод испытания и критерии функционирования. - М.: Стандартиформ, 2012. - 24 с.

АВТОРЫ

Левенков Ярослав Юрьевич, к.т.н., lique87@mail.ru, доцент кафедры "Колесные машины" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Вдовин Денис Сергеевич, к.т.н., vdovin@bmstu.ru, доцент кафедры "Колесные машины" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Александров Дмитрий Алексеевич, aleksandrovdimas10@gmail.com, аспирант кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Machines & Plants Design & Exploiting

*Electronic journal
International Public Organization
“Integration strategy”
<http://maplants-journal.ru>*

*//Machines and Plants:Design and Exploiting.
2023. № 3. pp. 1 – 15.*

DOI:

Received: 17.06.2023

Accepted for publication: 17.08.2023

© International Public Organization “Integration strategy”

Development of aluminum alloy ROPS for front loaders

Yaroslav Y. Levenkov, Denis S. Vdovin,
Dmitry A. Aleksandrov *

* aleksandrovdimas10@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russian Federation

Relevance. Currently, cabs with integrated rollover protection devices (roll over protective structure; ROPS) and protection against falling objects (falling-object protective structure; FOPS) are widely used for front-end loaders. If the design of FOPS is not affected by the mass parameters of the machine, then ROPS significantly depends on them. For a loader with ROPS, the cab is a difficult and expensive part. One of the ways to reduce the cost of its production is the unification of units for a standard-sized range of loaders. But then the ROPS design should be done for the loader model with the largest mass. However, this approach leads to an increase in the metal consumption and cost of loaders with a lower load capacity. As a result, the energy efficiency of the machine decreases.

A promising direction for improving energy efficiency is to reduce the weight of cabins through the use of aluminum alloys, because they have a high specific strength relative to steel.

The objects of the study are wheeled front loaders with a gross weight of 10, 15 and 30 tons. The subject of the study is the application of computational methods based on the finite element method in the design of cabins made of aluminum alloys.

The purpose of the study is to develop a methodology for designing an aluminum alloy cabin frame, which will allow obtaining a cabin of lower weight and increased manufacturability compared to analogues.

Methodology and methods. The article presents the developed finite element models of structurally similar cabin samples in a static formulation, taking into account geometric and physical nonlinearities.

Results and scientific novelty. The paper presents a method for selecting the main design parameters of an aluminum alloy cabin.

Practical significance. The results obtained can be used to create cabs of front-end loaders.

Keywords: strength calculation, ROPS, front loader, finite element method, loads, cab, welded joint, aluminum alloy.

References

1. GOST ISO 3471-2015. Earth-moving machinery. Roll-over protective structures. Technical requirements and laboratory tests. - M.: Russian Institute of Standardization, 2021. - 34 s.
2. Razvitie litejnyh aljuminievyh splavov v VIAM (k 120-letiju so dnja rozhdenija I.F. Kolobneva) / D. V. Ogorodov, A. V. Trapeznikov, D. A. Popov, S. I. Pentjuhin // Trudy VIAM. – 2017. – № 2(50). – S. 107-114.
3. Abramov, A. A. Vysokoprochnye litejnye aljuminievye splavy. Dostizhenija i perspektivy. Chast' II. Tehnologicheskie processy / A. A. Abramov // Litejnoe proizvodstvo. – 2021. – № 3. – S. 2-8.
4. Saranin, L. G. Research on the receipt of products made of nanostructured aluminum alloys with improved mechanical properties / L. G. Saranin // Novye materialy i tehnologii v mashinostroenii. – 2022. – № 35. – S. 49-53. (In Russ.)
5. G. Kokot, W. Ogierman. The Numerical Simulation of FOPS and ROPS Tests using LS-DYNA. Mechanika. – 2019. - Volume 25(5) pp. 383-390. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.25.5.4314>
6. Chetverikov M.V., Goncharov R.B., Butarovich D.O. Study of residual stress-strain behavior of a load-bearing system of a skid-steer loader under multiple loads according to the ROPS safety standard. Trudy NAMI. 2023;(1):46-55. (In Russ.) <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2023-1-46-55>
7. O. Panchenko, D. Kurushkin, I. Mushnikov, A. Khismatullin, A. Popovich. A high-performance WAAM process for Al–Mg–Mn using controlled short-circuiting metal transfer at increased wire feed rate and increased travel speed. Materials and Design 195 (2020) 109040. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109040>
8. GOST R ISO 5006-2010. Earth-moving machinery. Operator's field of view. Test method and performance criteria. –M: Standartinform, 2012 – 24 s.

AUTHORS

Yaroslav Y. Levenkov, Ph.D., lique87@mail.ru, Associate Professor, Wheeled Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University.

Denis S. Vdovin Ph.D., vdovin@bmstu.ru, Associate Professor, Wheeled Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University.

Dmitry A. Aleksandrov, aleksandrovdimas10@gmail.com, Graduate student, Wheeled Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University.