

УДК (UDC) 621.86/.87

ПРИМЕНЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ЭЛЕМЕНТОВ ГРУЗОЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВAPPLICATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION IN THE DESIGN
OF ELEMENTS OF LOAD HANDLING DEVICESГнездилов С.Г.
Gnezdilov S.G.Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. В статье приведены методические рекомендации по выполнению концептуальной топологической оптимизации. Под «концептуальной» понимается оптимизация, результатом которой является не конкретное конструктивное решение, а рациональная топология – структура, наилучшим образом передающая заданные силовые потоки. В соответствии с упомянутыми рекомендациями предлагается оптимизацию проводить в последовательности: определение объекта исследования, поиск точек приложения внешних сил к объекту и обоснование (при необходимости) их наиболее рационального относительного расположения, определение характера внешних сил в точках их приложения, наложение связей, учет иных факторов и анализ результатов с возможным уточнением результатов. Особое внимание уделено вопросу построения расчетной схемы для топологической оптимизации, от которой, по мнению автора, во многом определяется успешность решения задачи. Приведенные в статье рекомендации апробированы на практическом примере, в котором рассмотрен порядок оптимизации рычага грузового захвата. Такой захват имеет сложный характер нагружения, в связи с чем его наиболее рациональная структура не очевидна. А потому для поиска рационального конструктивного исполнения его элементов целесообразно применение концептуальной топологической оптимизации. Оптимизация позволила уменьшить массу рычага такого захвата на 42%. При этом прочность нового решения увеличилась на 15%, а жесткость возросла на 49%.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, конструирование, грузовой захват, конечно-элементный анализ.

Дата принятия к публикации: 23.11.2022
Дата публикации: 25.03.2023

Сведения об авторах:

Гнездилов Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: gnezdilov@bmstu.ru.
ORCID: 0000-0002-3215-3840

Abstract. The article provides guidelines for the implementation of conceptual topology optimization. By "conceptual" is meant optimization, the result of which is not a specific design solution, but a rational topology – a structure that best transmits the given force flows. In accordance with the above recommendations, it is proposed to carry out optimization in the following sequence: determining the object of study, searching for points of application of external forces to the object and substantiating (if necessary) their most rational relative location, determining the nature of external forces at the points of their application, applying connections, taking into account other factors and analysis of the results with their possible refinement. Particular attention is paid to the issue of constructing a loading diagram for topology optimization, which, in the author's opinion, largely determines the success of solving the problem. A correctly prepared loading diagram should take into account all the most unfavorable combinations of loads. Recommendations on the most rational construction of loading diagrams are given. The recommendations given in the article are tested on a practical example, which considers the procedure for optimizing the load grip lever. Such a grip has a complex nature of loading, and therefore its most rational structure is not obvious. Therefore, in order to search for a rational design of its elements, it is advisable to use conceptual topology optimization. Optimization made it possible to reduce the mass of the lever of such a grip by 42%. At the same time, the strength of the new solution increased by 15%, and the stiffness increased by 49%.

Keywords: topology optimization, construction design, load grip, finite element analysis.

Date of acceptance for publication: 23.11.2022
Date of publication: 25.03.2023

Authors' information:

Sergey G. Gnezdilov – PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of Department of Hoisting and Conveying Systems, Bauman Moscow State Technical University, e-mail: gnezdilov@bmstu.ru.
ORCID: 0000-0002-3215-3840



1. Введение

При проектировании рациональных конструкций применяют топологическую оптимизацию, в которой условно можно выделить два направления. В первом случае оптимизация применяется для получения очертаний конкретной детали, топология которой имеет определенные размеры, известен ее материал, она нагружена известными силами, доступна информация о ее напряженно-деформированном состоянии и др. Результатом оптимизация является топология, опираясь на размеры которой может быть получена готовая деталь. Во втором случае оптимизация дает концептуальное решение, в котором мало конкретики: нет данных о материале, отсутствуют численные значения сил в привычных системах единиц измерений, абсолютные значения размеров не представляют интереса. При этом результатом оптимизации является не конкретное конструктивное решение, как в первом случае, а рациональная топология – структура, наилучшим образом передающая заданные силовые потоки.

Концептуальная топологическая оптимизация применима для решения разных задач. Отметим три основных направления. Первое направление – проверка существующих структур на оптимальность. Структуры окружающих нас объектов сформировались за многие годы и, кажется, здесь ничего нового не придумаешь, однако даже для весьма устоявшихся структур могут быть найдены более рациональные исполнения, которые потенциально могут иметь лучшие технические характеристики. Второе направление – разумное усиление существующих конструкций. Предположим, что имеется некоторый объект, который необходимо модернизировать: он должен быстрее ездить, поднимать более тяжелые грузы, иметь более высокие собственные частоты и т.п. В результате моделирования можно найти решение, которое позволило бы надлежащим образом усилить конструкцию с минимальными затратами. Третье направление – создание топологии для нового продукта: проектируется что-то совсем новое, а подходящие аналоги отсутствуют.

Концептуальная топологическая оптимизация реализована во многих находящихся в свободном доступе простых в использовании программах, в числе которых решение *TopOpt-2D*, доступное для установки как под *Windows*, так и на большинстве смартфонов и планшетов. В этой программе предусмотрен набор инструментов, позволяющий довольно гибко моделировать условия эксплуатации исследуемого объекта: действующие нагрузки и их различные сочетания, связи, области отсутствия материала и др. В процессе задания граничных условий программа в режиме реального времени формирует решение, обладающее максимальной жесткостью [16, 17].

Применение такого инструмента особенно эффективно при получении приближенных решений в «полевых» условиях, при обосновании или перепроверке конструктивных форм изделий и др. Удобство установки и использования, а также общедоступность программы, делают актуальным ее применение в учебном процессе [1, 18], что позволяет учащимся иначе взглянуть на вопросы расчета элементов машин: это подталкивает их к анализу работы исследуемых конструкций и выявлению факторов, в наибольшей степени влияющих на топологию проектируемого изделия, его напряженно-деформированное состояние, пониманию условий его эксплуатации, корректному заданию граничных условий в расчетных моделях. Такие навыки будут полезны, в частности, при решении задач конечно-элементного анализа.

Несмотря на относительную простоту такой программы, непосредственно познакомиться с которой может любой желающий, при решении конкретных практических задач для формирования корректных исходных данных от пользователя требуется специальная подготовка, основанная на понимании основных принципов работы моделируемого объекта. От исходных данных напрямую в значительной степени зависит результат топологической оптимизации, проверка которого также требует определенных навыков. В результате упущения некоторых случаев нагружения может быть получено решение,

непригодное для эксплуатации в заявленных условиях.

В публикациях, демонстрирующих результаты топологической оптимизации, часто не показывают использованные при оптимизации расчетные схемы [2–7], что, по мнению автора, является существенным упущением, поскольку составленная расчетная схема является важным научным результатом. Более того, подготовка исходных данных для топологической оптимизации является творческой работой, которая во многих случаях в значительной степени зависит от опыта проектировщика, а результаты решения одной и той же задачи разными людьми могут существенно отличаться. В других работах предлагаемые расчетные схемы представлены недостаточно подробно [8–14]. Настоящая публикация призвана продемонстрировать ряд рекомендаций по составлению расчетных схем при решении задач топологической оптимизации.

2. Порядок моделирования оптимальной топологии

Общий порядок моделирования оптимальной топологии представим следующим образом (рис. 1).

На начальном этапе следует определиться с объектом моделирования. Целесообразно проводить оптимизацию только отдельных деталей устройств. Наиболее актуальна оптимизация материалоемких изделий, характер нагружения которых неочевиден и ожидаемо имеет сложный вид. При этом необходимо иметь в виду, что некоторые программы не учитывают собственный вес оптимизируемого объекта, что в ряде случаев может отрицательно повлиять на результат оптимизации. В меньшей степени это актуально для деталей, вес которых существенно меньше передаваемой нагрузки (характерно для изделий из материалов с высокими механическими характеристиками).

Затем на подлежащей оптимизации детали намечаются характерные точки – точки приложения внешних сил, образующихся в результате взаимодействия исследуемой детали с другими элементами устройства,

внешними объектами для всех расчетных случаев нагружения. На данном этапе целесообразно на основе учета специфики работы устройства проверить рациональность относительного расположения намеченных характерных точек для обеспечения его наилучших эксплуатационных характеристик.



Рис. 1. Алгоритм моделирования деталей

На следующем этапе уточняются параметры внешних сил, воздействующих на исследуемую деталь в характерных точках: их направление и величина. В большинстве характерных точек эти параметры могут быть определены по ряду признаков без дополнительных вычислений. При определении значений силовых факторов и направлений их действия обычно не требуется повышенная точность, которая, как правило, не оказывает существенного влияния на итоговый результат: могут измениться отдельные мелкие детали результата, однако концептуальное решение не меняется.

При решении оптимизационной задачи в плоской постановке для обеспечения статической определимости моделируемого объекта необходимо наложение трех связей так,

чтобы при этом обеспечивалась геометрическая неизменяемость объекта моделирования. Это может быть реализовано разными способами: например, посредством применения двух опор: шарнирно–неподвижной (эквивалентно двум связям) и шарнирно–подвижной (эквивалентно одной связи) либо трех шарнирно–подвижных опор или одной заделки (эквивалентно трем связям). Сочетание выбранных опор и места их приложения определяются на основе анализа неизвестных внешних сил в характерных точках исследуемой детали. При наложении связей целесообразно их располагать так, чтобы из расчетной схемы посредством связей исключались внешние силы, определение величины и/или направления которых наиболее трудозатратно. Эти связи должны ограничивать перемещение точек в направлении действия неизвестных сил, вследствие чего эти силы будут действовать на исследуемый объект в виде реакций в опорах. В некоторых задачах может оказаться целесообразным разложение неизвестной силы на две составляющие, одна из которых известна.

При моделировании объекта необходимо учитывать все значимые случаи его нагружения, имеющих место в разные моменты времени. При этом могут быть учтены: значения сил, направления их действия, места их приложения (для подвижных нагрузок).

Полученные результаты при необходимости могут быть скорректированы так, чтобы линии построения (оптимальная топология) не пересекали запрещенные области (области расположения других объектов). С этой целью в модель могут быть включены области разной формы, ограничивающие получаемый результат.

По завершении моделирования анализируются результаты, опираясь на которые проверяется корректность составленной модели и принимается решение о целесообразности внесения в модель уточнений.

3. Создания рациональной топологии элемента грузового захвата

В соответствии с предложенным выше порядком моделирования деталей в плоской

постановке выполним поиск рациональной топологии детали грузового захвата [15], предназначенного для работы со строительными конструкциями (рис. 2).

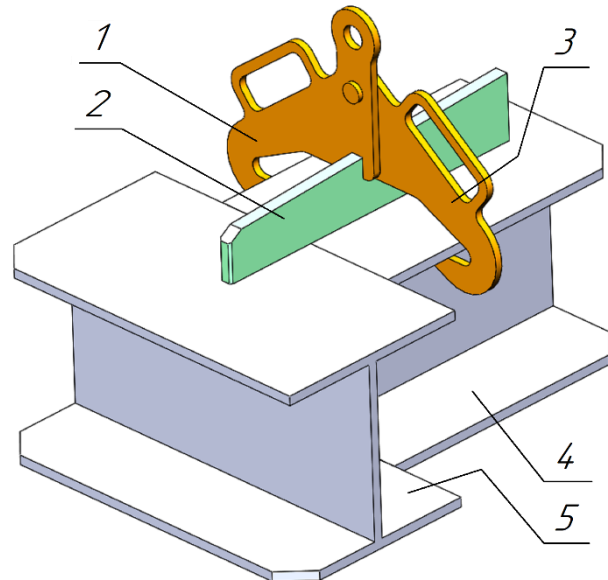


Рис. 2. Грузовой захват

В основе такого захвата – пара соединенных шарнирно рычагов 1 и 3 (рис. 2). При перемещении захватом груза 4 (представлен в виде двутавровой балки) рычаги 1 и 3 прижимаются к нижней грани верхнего пояса груза. Для ограничения относительного поворота рычагов захвата и поджатия элементов захвата к грузу предусмотрен клин 2, который перед началом подъема вставляется сквозь предусмотренные в рычагах прорези. Чем больше усилие, которое прикладывается к клину при его установке в указанные прорези, тем сильнее рычаги захвата прижимаются к поднимаемому грузу и тем надежнее соединение груза с захватом. Потенциально клин может устанавливаться как вручную, так и с применением специальных ударных средств. Клин имеет относительно большую длину и помимо фиксации рычагов 1 и 3 обеспечивает возможность расположения балки 4 в определенном положении относительно другой балки 5. В верхней части рычага 1 предусмотрена проушина для подвеса захвата на грузоподъемном устройстве. На рычагах предусмотрены ручки для ручного раскрытия рычагов захвата и высвобождения груза.

В качестве объекта моделирования выбран рычаг 1 захвата (рис. 2). Нанесем на схему рычага характерные точки $A-E$ (рис. 3), в которых имеет место контактное взаимодействие данного рычага с иными объектами. Точкой A отметим область контакта проушины и пальца грузоподъемной оснастки. В месте шарнирного соединения рычагов 1 и 3 захвата положение контактной области на рычаге 1 неочевидно, а потому приближенно примем, что характерная точка B располагается в центре отверстия. При установке в пазы рычагов захвата клин с некоторым усилием прижимается к рычагу 1 в области точки C . При подъеме груза рычаг 1 со значительным усилием прижмется к клину в точке D . Последняя характерная точка – область E , через которую сила от веса груза передается на рычаг.

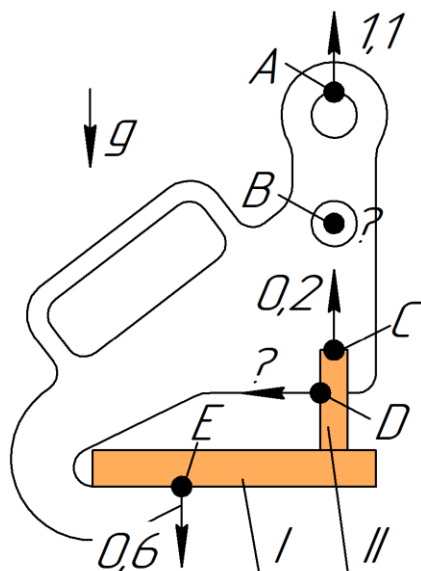


Рис. 3. Расчетная схема рычага захвата

Рассмотрим случай подъема груза, при котором захват нагружен симметрично, центр тяжести груза лежит в плоскости условной симметрии захвата, а гибкий орган грузоподъемного устройства вертикально ориентирован. Для данного случая примем ряд следующих допущений: центр тяжести груза располагается под осью верхнего отверстия захвата (точка A на рис. 3); клин 2 упирается в рычаг 1 (рис. 2), а создаваемая клином вертикальная сила распирающая рычага и груза составляет 20% от номинального веса поднимаемого груза (случай использо-

вания захвата только для подъема груза без возможности опирания его на другие конструкции с установкой клина в рабочей позиции без приложения значительного усилия). При этом примем ряд следующих общих допущений: усилие от груза к рычагу передается через контактную область (точка E на рис. 3), которая располагается вблизи конца выступа рычага; силы трения между контактирующими поверхностями клина и рычага пренебрежимо малы; вес захвата равен 10% от номинальной грузоподъемности.

В модели необходимо предусмотреть области отсутствия материала (рис. 3): I – область, определяемая расположением поднимаемого груза, а также дополнительным пространством, требуемым для обеспечения беспрепятственного обхвата груза захватом; II – область размещения клина.

Определим параметры внешних сил, приложенных к исследуемой детали в характерных точках: их направления и величины. В точке A приложена сила от грузового подвеса, которая направлена вверх (рис. 3) и, если принять, что масса груза равна 1, то значение силы в точке A с учетом принятого ранее допущения (вес захвата равен 10% от его номинальной грузоподъемности) составит 1,1. В точке B направление действия силы и ее величина неочевидны, а потому целесообразно воздержаться от уточнения параметров силы в этой точке. В точке C приложенная к рычагу сила взаимодействия с клином направлена вверх, а ее величина согласно принятому допущению составляет 0,2. В точке D известно направление действия силы (с учетом допущения об отсутствии силы трения между клином и рычагом) – горизонтальное направление, однако для определения ее значения требуются дополнительные вычисления, от которых воздержимся, ограничившись указанием (на рис. 3) направления действия силы. В последней точке E примем, что сила направлена вертикально, а ее величина определяется исходя из веса груза и внутренней силы, создаваемой клином. Просуммировав обе эти силы и равномерно распределив их по обоим рычагам получим искомую силу в точке E равную 0,6.

Далее уточним представленную на рис. 3 схему, наложив три связи так, чтобы максимально исключить из нее неизвестные силовые факторы, к которым, как было показано выше, относятся силы в точках B и D (рис. 3). Поскольку направление действия силы в точке B неизвестно, то здесь установим две связи, ограничивающие перемещение по вертикали и горизонтали и образующие шарнирно–неподвижную опору. В точке D разместим одну связь, ограничивающую перемещение в направлении действия силы (горизонталь), что может быть обеспечено шарнирно–подвижной опорой с подвижностью в вертикальном направлении.

В результате моделирования рычага с учетом наложения связей и добавления области отсутствия материала получена топология, представленная на рис. 4. Результат получен для частного случая заполнения топологией проектной области на 15%. В полученной топологии (рис. 4) имеет место суженная область (указана стрелкой), в которой на практике может возникать изгибающий момент (данное замечание относится также и к топологии, расположенной на участке AB на рис. 3) по причине того, что присоединяемый к верхней проушине подвес не всегда будет ориентирован строго вертикально. Такое может быть, когда точка подъема грузоподъемного средства располагается в стороне от грузового захвата и до момента отрыва груза от основания натянутый канат будет наклонен на некоторый угол от вертикали. В связи с этим целесообразно уточнение представленной ранее расчетной схемы.

Уточненная расчетная схема рычага (рис. 5) от начальной схемы (рис. 3) отличается тем, что в ней заменены силы в точках A и E : вместо одной силы в каждой точке приложено по две силы, которые образуются в разные моменты времени (одинаковым цветом выделены силы, действующие одновременно) в случаях предельного наклона грузозахвата в разные стороны. Принято допущение: предельный угол отклонения подвеса от вертикальной оси захвата составляет ± 10 градусов. Значение силы, приложенной в точке A , при повороте захвата остается неизменным и равно сумме веса груза и захвата.

Приблизительно рассчитаны значения сил, образующихся в точке E в разные моменты времени.

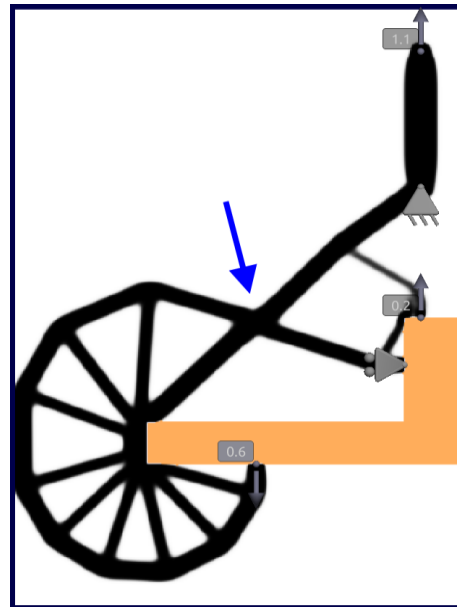


Рис. 4. Результат топологической оптимизации для «идеального» случая подъема груза

Результат моделирования рычага захвата на основе уточненной модели представлен на рис. 6. В этом решении отсутствует область, которую можно было бы характеризовать как «шарнир». На этом можно остановиться и взять такое решение топологии за основу при проектировании нового решения рычага грузового захвата.

Представленный на рис. 6 результат получен для случая применения захвата в условиях без опирания перемещаемой балки на другие строительные конструкции. При опирании захвата на другие строительные конструкции возрастет нагрузка на клин. В новой расчетной схеме (рис. 7) силу вертикального прижатия клина к рычагу 1 захвата примем равной весу поднимаемого груза – 1,0. Соответствующая данному случаю топология (рис. 8) не содержит принципиальных отличий от полученных ранее результатов (рис. 6). Основное отличие – появление топологии, соединяющей точки B и C .

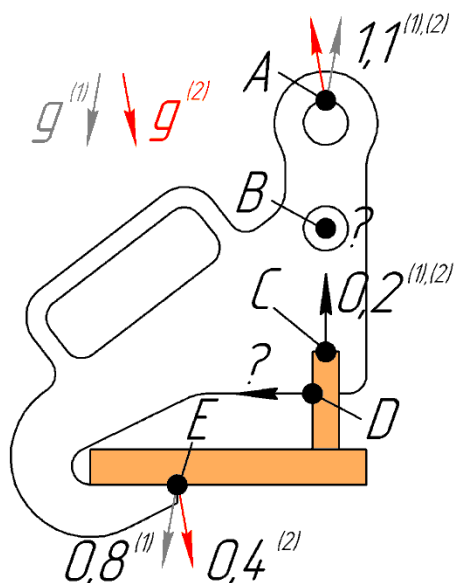


Рис. 5. Уточненная расчетная схема рычага

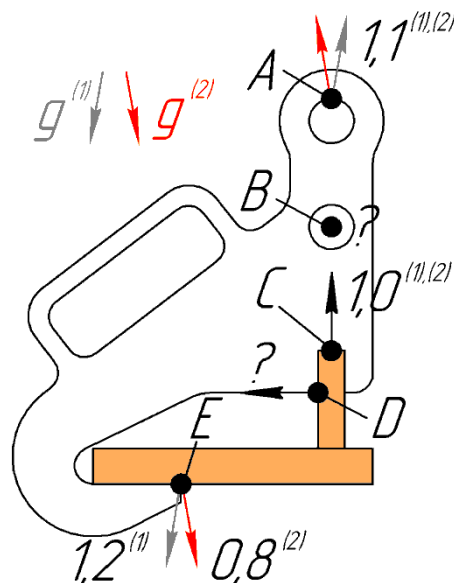


Рис. 7. Уточненная расчетная схема рычага для случая силовой установки клина

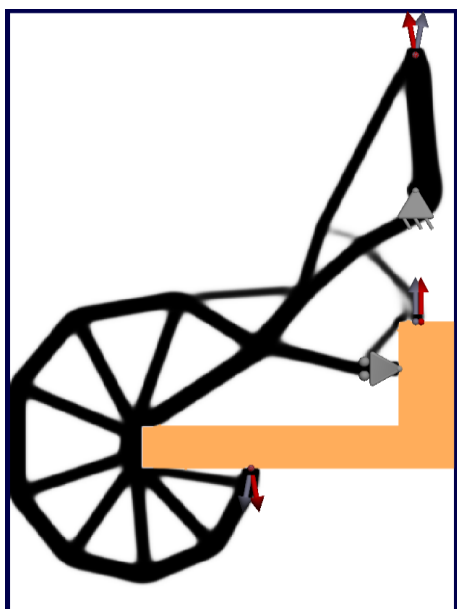


Рис. 6. Результат моделирования на основе уточненной модели рычага

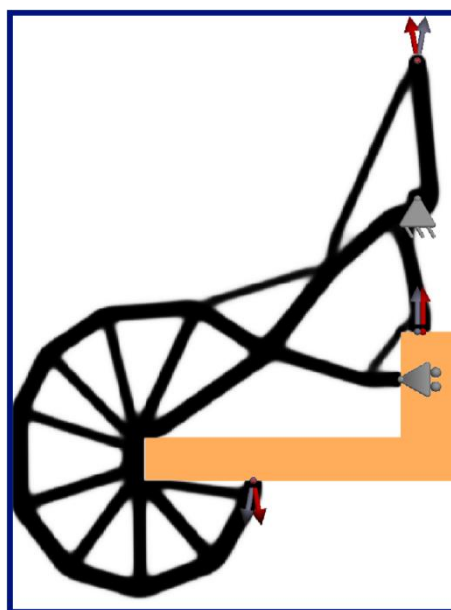


Рис. 8. Результат топологической оптимизации рычага для случая силовой установки клина

4. Проектирование детали на основе результатов оптимизации

Полученная топология (рис. 6 и 8) не дает готового решения геометрии для моделируемого изделия, однако эта информация может быть использована при его проектировании. Такое изделие должно удовлетворять не только условиям прочности и жесткости, но и многим другим условиям, в числе которых: технологичность, эстетичность, собираемость с другими элементами устройства, удобство эксплуатации и др.

На рис. 9 представлено возможное решение рычага, полученное на основе результатов топологической оптимизации (рис. 8). В этом решении предусмотрена пара проушин для подвешивания захвата и соединения его рычагов. Данная геометрия отличается от полученных ранее результатов (рис. 8): левая часть захвата имеет более компактное исполнение, отдельные элементы приобрели прямолинейное исполнение и др.

На рис. 9 новое решение рычага захвата представлено на фоне исходного решения, что наглядно показывает характер перераспределения материала в результате оптимизации. Масса нового исполнения рычага меньше исходного на 42% (при определенной доработке данного рычага это значение может уменьшиться).

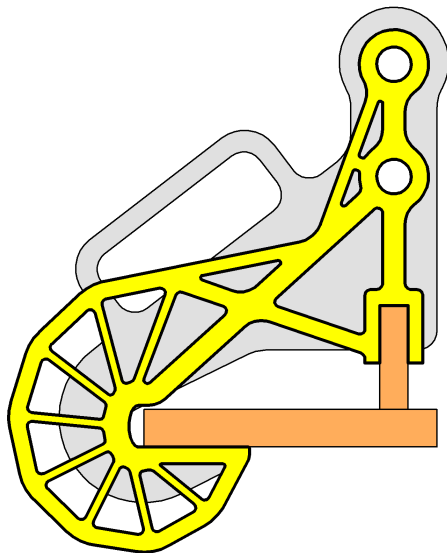


Рис. 9. Решение рычага захвата, полученное на основе результатов топологической оптимизации, с учетом области отсутствия материала на фоне исходного решения рычага

5. Сравнение исходного и нового решений элемента захвата

Сравним исходное (рис. 3) и новое (рис. 9) решения рычага захвата на основе их конечно-элементного анализа. Такой анализ выполнен в соответствии с представлена на рис. 7 расчетной схемой для 1-го расчетного случая. В модели толщина рычагов составляет 10 мм. Одна условная единица силы, применявшаяся при топологической оптимизации, соответствует 1000 Н. Полученные в результате конечно-элементного анализа карты напряжений и перемещений представлены на рис. 10 и 11 (деформация геометрии увеличена в 100 раз).

Из результатов (рис. 10, 11) следует, что в новом решении рычага напряжения распределены более равномерно, а пиковая величина (84,0 МПа) меньше, чем в исходном решении рычага (99,8 МПа). В то же время,

новое решение рычага имеет более высокую жесткость, о чем свидетельствуют меньшие перемещения точек рычага (0,067 мм вместо 0,100 мм).

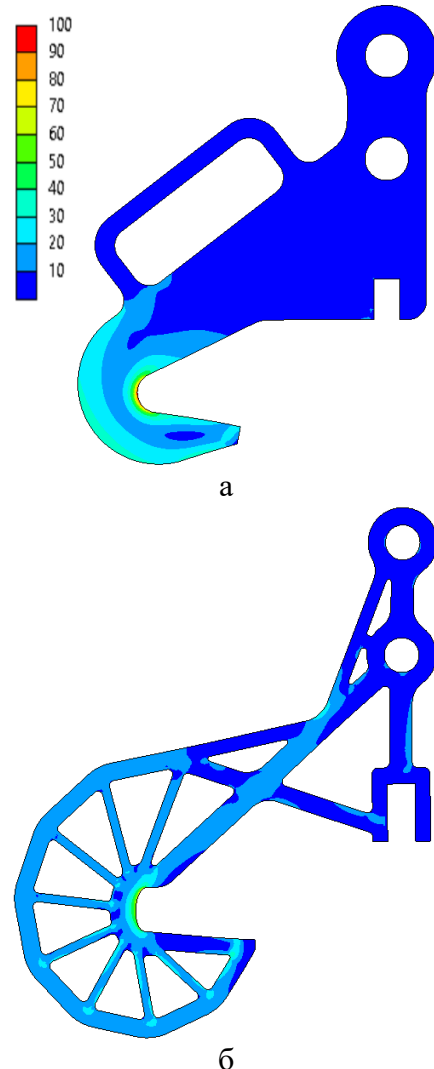


Рис. 10. Карты напряжений в решениях рычага: а – исходное решение; б – новое решение

6. Заключение

Представлен алгоритм проведения топологической оптимизации отдельной детали в плоской постановке. Аналогичным образом он может быть применен и для решения задач в объемной постановке.

На основе представленного алгоритма получено новое более легкое решение рычага грузового захвата, обладающее по сравнению с исходным решением более высокими прочностью и жесткостью.

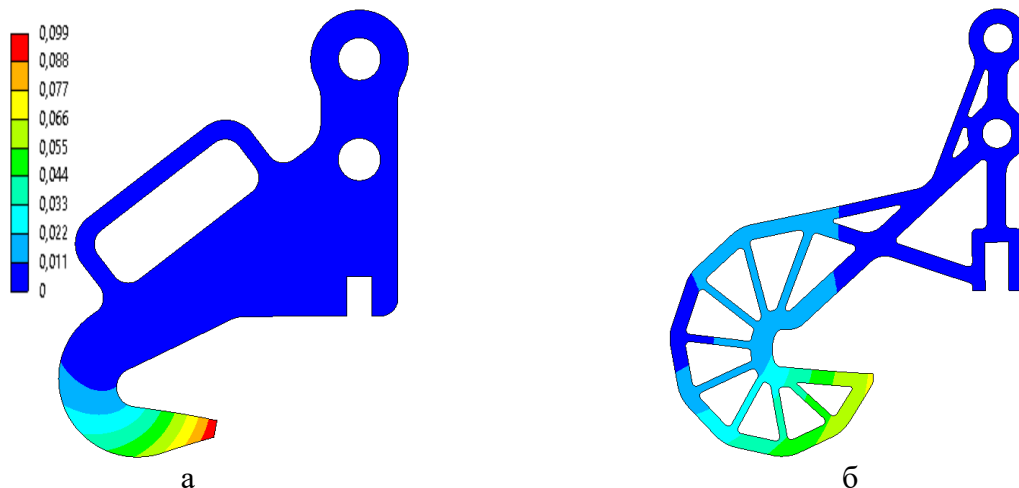


Рис. 11. Карты перемещений в решениях рычага: а – исходное решение; б – новое решение

Список литературы

1. Гнездилов С.Г., Шубин А.Н. Топологическая оптимизация на примере стрелы башенного крана // Механизация строительства. 2017. №6. С. 40–43.
2. Гнездилов С.Г., Шубин А.Н. Принципы рационального проектирования элементов машин с использованием методов топологической оптимизации // Строительные и дорожные машины. 2016. №2. С. 44–49.
3. Tyflopoulos E., Haskins C., Steinert M. Topology-Optimization-Based Learning: A Powerful Teaching and Learning Framework under the Prism of the CDIO Approach // Education Sciences. 2021. Vol. 11. DOI: 10.3390/educsci11070348
4. Гнездилов С.Г. Моделирование оптимальной топологии деталей устройств. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 52 с.
5. Heidler N., Lukowicz H., Hilpert E., Risse S., Alber L., Klement J., Heine F., Bölter R., Armengol J.M.P. Topology optimization and additive manufacturing of an optical housing for space applications // EPJ Web of Conferences. 2019. Vol. 215.
6. Faskhutdinov R.N., Dubrovskaya A.S., Dongauzer K.A. Maksimov P.V., Trufanov N.A. Topology optimization of a gas-turbine engine part // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 177. P. 012077. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012077
7. Ghungarde V., Awachar S., Vaidya N.K., Jagadeesha T. Design optimization of steering knuckle by adopting bionic design

References

1. Gnezdilov S.G., Shubin A.N. *Topologicheskaya optimizatsiya na primere strely bashennogo kрана* [Topological optimization on the example of a tower crane boom]. *Mekhanizatsiya stroitelstva*, 2017, No.6, pp. 40–43. (In Russian)
2. Gnezdilov S.G., Shubin A.N. *Printsipy ratsionalnogo proyektirovaniya elementov mashin s ispolzovaniyem metodov topologicheskoy optimizatsii* [Principles of rational design of machine elements using topological optimization methods]. *Stroitelnyye i dorozhnye mashiny*, 2016, No.2, pp. 44–49. (In Russian)
3. Tyflopoulos E., Haskins C., Steinert M. Topology-Optimization-Based Learning: A Powerful Teaching and Learning Framework under the Prism of the CDIO Approach. *Education Sciences*, 2021, Vol. 11. DOI: 10.3390/educsci11070348
4. Gnezdilov S.G. *Modelirovaniye optimal'noy topologii detaley ustroystv* [Modeling of the optimal topology of device parts]. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman, 2017. 52 p. (In Russian)
5. Heidler N., Lukowicz H., Hilpert E., Risse S., Alber L., Klement J., Heine F., Bölter R., Armengol J.M.P. Topology optimization and additive manufacturing of an optical housing for space applications. *EPJ Web of Conferences*, 2019, Vol. 215.
6. Faskhutdinov R.N., Dubrovskaya A.S., Dongauzer K.A. Maksimov P.V., Trufanov

approach // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 624. P. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/624/1/012023

8. Lu X., Yang Y., Zeng W., Xu D. Lightweight Design of Six-dof Tandem Manipulator Based on Additive Manufacturing Technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 612. No.3. P. 032145. DOI: 10.1088/1757-899X/612/3/032145

9. Shuping Z., Zengjie Y., Lei X. Research on the Topology Optimization of the rocker arm of compression garbage truck based on Rigid-Flexible coupling // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 423. P. 012107. DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012107

10. Zhang E., Zhang X. Finite element analysis and Topology optimization design for automobile door-handle // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 392. P. 062072. DOI: 10.1088/1757-899X/392/6/062072

11. Ma C., Pu R., Wu L., Zhang L., Lu G. Lightweight Design of a Support Based on Topology Optimization and 3D Printing // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 332. P. 042044. DOI: 10.1088/1755-1315/332/4/0420

12. Gebisa A.W., Lemu H.G. A case study on topology optimized design for additive manufacturing // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 276. P. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/276/1/012026

13. Zhu J., Yang K., Zhang W. Backbone cup – a structure design competition based on topology optimization and 3D printing // International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization. 2016. Vol. 7.

14. Teo J.W.C., Khan S.F. Topology optimization of mandible fracture plate // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 670. P. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/670/1/012049

15. Vdovin D., Levenkov Y., Chichekin V. Light frame design for quad bike using topology optimization // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 589. P. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/589/1/012026

16. Yin J., Zhang S., Liu Y., Sha Z., Ma F.,

N.A. Topology optimization of a gas-turbine engine part. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 177, pp. 012077. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012077

7. Ghungarde V., Awachar S., Vaidya N.K., Jagadeesha T. Design optimization of steering knuckle by adopting bionic design approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 624, pp. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/624/1/012023

8. Lu X., Yang Y., Zeng W., Xu D. Lightweight Design of Six-dof Tandem Manipulator Based on Additive Manufacturing Technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 612, No.3, pp. 032145. DOI: 10.1088/1757-899X/612/3/032145

9. Shuping Z., Zengjie Y., Lei X. Research on the Topology Optimization of the rocker arm of compression garbage truck based on Rigid-Flexible coupling. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 423, pp. 012107. DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012107

10. Zhang E., Zhang X. Finite element analysis and Topology optimization design for automobile door-handle. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 392, pp. 062072. DOI: 10.1088/1757-899X/392/6/062072

11. Ma C., Pu R., Wu L., Zhang L., Lu G. Lightweight Design of a Support Based on Topology Optimization and 3D Printing. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 332, pp. 042044. DOI: 10.1088/1755-1315/332/4/0420

12. Gebisa A.W., Lemu H.G. A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 276, pp. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/276/1/012026

13. Zhu J., Yang K., Zhang W. Backbone cup – a structure design competition based on topology optimization and 3D printing. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 2016, Vol. 7.

14. Teo J.W.C., Khan S.F. Topology optimization of mandible fracture plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 670, pp. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/670/1/012049

Yang D., Yuan D. Structural Topology Optimization of Cantilever Crane Boom Based on Equivalent Moving Load Method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 692. P. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012020

17. Zhao L., Li K., Chang Y., Li J. Topology Optimization Design of Compliant Mechanism of Composite Wing Leading Edge // Journal of Physics: Conference Series, 2019. Vol. 1215. P. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1215/1/012002

18. Patent US 2016264381. Clamping apparatus. Swope T.S., Dean R. Declared 14.03.2016. Published 15.09.2016.

†
† 15. Vdovin D., Levenkov Y., Chichekin V. Light frame design for quad bike using topology optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 589, pp. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/589/1/012026

†
† 16. Yin J., Zhang S., Liu Y., Sha Z., Ma F., Yang D., Yuan D. Structural Topology Optimization of Cantilever Crane Boom Based on Equivalent Moving Load Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 692, pp. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012020

†
† 17. Zhao L., Li K., Chang Y., Li J. Topology Optimization Design of Compliant Mechanism of Composite Wing Leading Edge. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1215, pp. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1215/1/012002

†
† 18. Patent US 2016264381. Clamping apparatus. Swope T.S., Dean R. Declared 14.03.2016. Published 15.09.2016.