

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-102-112

*\*Григоренко А.А., Шопина Е.В.*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ВЫПОЛНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНА И АДАПТАЦИЯ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ ПОВОРОТНОГО КУЛАКА. ЧАСТЬ II

**Аннотация.** В статье описано создание 3D модели поворотного кулака болида класса “Formula Student” при помощи приложения, CAD/CAE системы SolidEdge, генеративный дизайн. Исходными данными являлись: модель излишне прочного поворотного кулака, ранее вычисленные значения нагрузок для статического расчета при различных режимах работы, информация о свойствах материала. В процессе оптимизации были варьированы технологические настройки с целью получения геометрии, максимально пригодной к изготовлению резанием на трехосевом фрезерном станке с чипом программного управления и без дополнительной поворотной оси. Результат генеративного дизайна был использован для построения модели кулака, который можно изготовить фрезерованием с переустановками и креплением в универсальные приспособления, такие как тиски. Построение выполнялось при помощи стандартных инструментов твердотельного моделирования (вытягивание по сечениям, придание толщины и так далее). К детали были добавлены элементы крепления, в виде прямоугольных бобышек, которые необходимо будет удалить при помощи слесарных операций после завершения фрезерных операций. Дополнительно были удалены отверстия, параллельные оси Z, которые возможно выполнить только после срезания элементов крепления.

**Ключевые слова:** генеративный дизайн, поворотный кулак, случаи нагрузки.

**Введение.** Поворотный кулак, в подвеске на двойных поперечных рычагах, служит для крепления подшипников колесного узла, шаровых шарниров рычагов и рулевой тяги, а также для крепления тормозного суппорта [1–3]. В гоночных или спортивных автомобилях, предназначенных для участия в спортивных соревнованиях, уменьшение массы поворотного кулака снизит общую массу транспортного средства и снизит величины сил инерции, возникающих при работе подвески (снижение неподрессоренной массы и, как следствие, улучшение управляемости) [4, 5]. При низком весе, поворотный кулак должен обладать и достаточной прочностью. Добиться значительного снижения массы без снижения прочности для детали, работающей в условиях механической нагрузки, можно при помощи генеративного дизайна. Генеративный дизайн – это метод проектирования или создания дизайна изделий. Дизайнеры или инженеры вводят вводные данные (требования к итоговому решению) в программное обеспечение для генеративного дизайна включая с такие параметры, как прочностные характеристики, материалы, методы производства, ограничения по стоимости и так далее. Программное обеспечение генерирует и анализирует возможные варианты решения, быстро генерируя альтернативные варианты изделия. Алгоритм тестирует и учится на каждой итерации. Характеристики сплава Д16Т:

1) Предел прочности при растяжении  $\sigma_B = 345 \text{ МПа}$

2) Предел текучести  $\sigma_T = 245 \text{ МПа}$

3) Плотность  $\rho = 2800 \text{ кг/м}^3$

4) Относительное удлинение  $\delta_5 = 3 - 7\%$

Случаи нагрузки [6–10] в виде выделенных поверхностей и проекций сил на оси координат рис. 2.

I Работа поворотного кулака в правом повороте. Колесо движется по внешнему радиусу, ось колеса проходит через центр поворота.

II Работа переднего поворотного кулака при торможении с максимальным отрицательным ускорением.

III и IV Работа поворотного кулака в правом повороте в условиях недостаточной и избыточной поворачиваемости (ось колеса повернута на угол  $30^\circ$  относительно отрезка, соединяющего центр колеса с центром поворота).

V Работа поворотного кулака в левом повороте. Колесо движется по внутреннему радиусу, ось колеса проходит через центр поворота.

VI Работа под действием усилия, направленного вдоль оси рулевой тяги. В данном случае ось параллельна оси колеса – это создаст наибольший изгибающий момент в креплении тяги.

Данные о величинах проекций сил и характере закреплений были сведены в таблицу 1.

итерации, что работает, а что нет. Условно, к недостаткам генеративного дизайна можно отнести то, что созданные оптимизированные сложные формы со внутренними полостями. Некоторые из этих форм невозможно изготовить традиционными методами производства. Вместо этого они создаются с использованием методов аддитивного производства (3D печать различных видов для трехмерных изделий и лазерная или плазменная резка для деталей, выполняемых из листовых материалов).

**Материалы и методы.** Исходными данными служат случаи нагрузки (информация о том, к каким поверхностям детали и какие значения нагрузок действуют на деталь), моделирующие работу [11], и исходная геометрия детали (3D модель детали, содержащая элементы крепления шаровых опор, посадочные отверстия подшипников и проушину для крепления рулевой

тяги), обладающей излишней прочностью и вписывающейся в требуемые габариты [12, 13] рис. 1 и информация о материале. В данном случае в качестве материала был выбран алюминиевый сплав Д16Т, так как он обладает хорошим соотношением предела текучести к плотности, хорошей обрабатываемостью резанием и достаточной усталостной прочностью [14, 15].

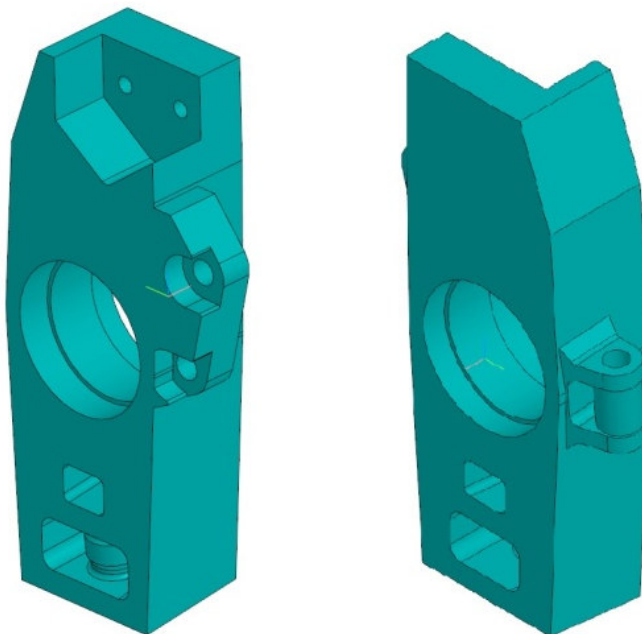


Рис. 1. 3D модель поворотного кулака для последующей оптимизации

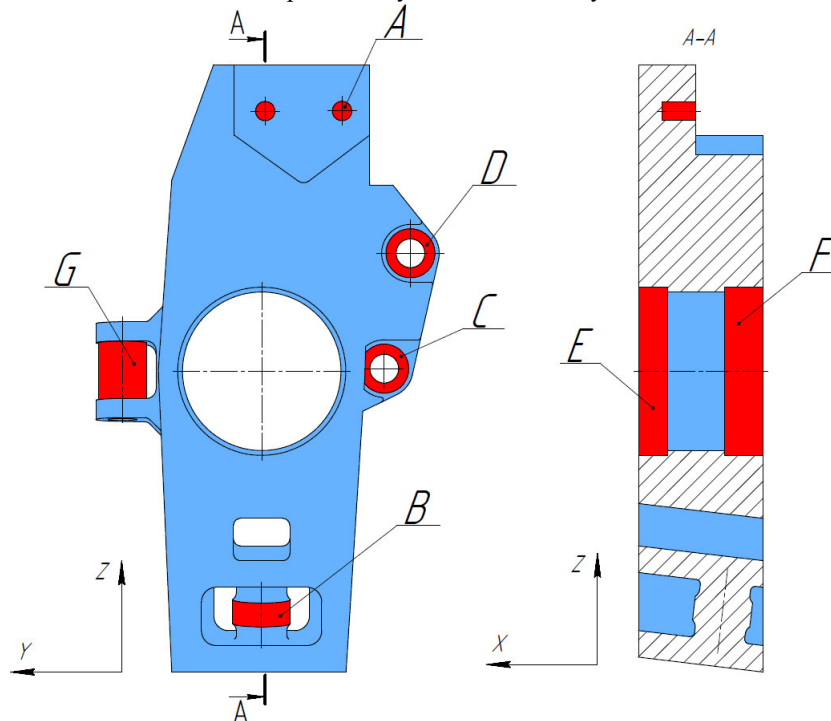


Рис. 2. Случаи нагрузки поворотного кулака.

А – отверстия крепления верхней шаровой опоры; В – крепление нижней шаровой опоры;

С – нижнее крепление тормозного суппорта; D-верхнее крепление тормозного суппорта;

Е – посадочное место переднего подшипника ступицы;

F – посадочное место заднего подшипника ступицы, G-крепление шарового шарнира рулевой тяги

Таблица 1

## Данные случаев нагрузки поворотного кулака

№ случая	I Правый поворот, угол 0°	II Торможение.	III Правый поворот, угол -30°	IV Правый поворот, угол 30°	V Левый поворот, угол -0°	VI Руление
A	X=-1692Н	Зафиксировано	X=-1296Н; Y=-1088Н	X=-1296Н; Y=1088Н	X=2149Н	–
B	X=4632Н; Z=-2940Н	Зафиксировано	X=3548Н; Y=-2977Н; Z=-2940Н	X=3548Н; Y=2977Н; Z=-2940Н	X=-4089Н; Y=-1940Н	–
C	–	X=-3375Н; Y=3969Н Z=2576Н	–	–	–	–
D	–	X=-3375Н; Y=3969Н Z=2576Н	–	–	–	–
E	Зафиксировано	–	Зафиксировано	Зафиксировано	Зафиксировано	Зафиксировано
F	Зафиксировано	–	Зафиксировано	Зафиксировано	Зафиксировано	Зафиксировано
G	–	–	–	–	–	X=1470Н

Оптимизация геометрии будет осуществляться при помощи CAD/CAE системы Solid Edge 2019 – системы твердотельного и поверхностного моделирования производства Siemens PLM Software, в которой реализованы как параметрическая технология моделирования на основе конструктивных элементов и дерева построения, так и технология вариационного прямого моделирования. Данная технология, разработанная компанией Siemens PLM Software (до 2007 года – UGS Corp.), получила название «синхронная технология». Система Solid Edge построена на основе ядра геометрического моделирования Parasolid и вариационного решателя D-Cubed и использует графический пользовательский интерфейс Microsoft Fluent. Система Solid Edge предназначена для моделирования деталей и сборок, создания чертежей, управления конструкторскими данными, и обладает встроенными средствами конечноэлементного анализа и встроенным модулем «Генеративный дизайн».

**Основная часть.** Рассмотрим процесс выполнения генеративного дизайна, с целью снижения массы, и постобработки, упрощающей изготовление, на примере поворотного кулака автомобиля.

I этап. Задание материалов, области проектирования и случаев нагрузки. В таблице материалов рис. 3 необходимо выбрать или создать необходимый материал.

Материал Д16Т не присутствует в списке материалов по стандартам ГОСТ и других списках.

Материал был создан изменением свойств алюминиевого сплава 6061, выделенных голу-

бым в таблице, показанной на рис. 2. Были изменены значения: плотности, предела текучести и предела прочности. Прочие параметры сплава (Число Пуассона, модуль упругости и так далее) не были изменены. После создания материала необходимо присвоить его исходной геометрии и приступить к созданию случаев нагрузки [16]. При создании нагрузок и ограничений для каждого из случаев необходимо задать толщину неизменяемой области от базовой грани. В модуле SolidEdge толщина данной области отсчитывается в обе стороны от базовой грани, а на краях выполняется автоматическое скругление радиусом, равным толщине неизменяемой зоны. Неизменяемая область задается для того, чтобы алгоритм не вычитал материал из посадок подшипников и бобышек вокруг отверстий для крепления шаровых опор и тормозного суппорта рис. 4. Важно, чтобы на пересечении задаваемой области и исходной геометрии не возникало тел с нулевым объемом – это вызовет ошибку при выполнении анализа.

Толщину неизменяемой области можно проверить при помощи дополнительного прочностного расчета. Например, к цилиндрическим элементам креплений, можно приложить силу, распределенную на половине внутренней цилиндрической поверхности, чтобы убедиться, что они не разрушатся под воздействием нагрузки, действующей перпендикулярно оси болта шаровой опоры.

II этап. Задание технологических настроек и параметров анализа. Технологические настройки помогают исключить создание в процессе генеративного дизайна замкнутых полостей или за-

дать направление вытягивания для деталей, которые можно изготовить резанием из листовой заготовки. Так же окно технологических настроек рис. 5 включает ползунок настройки распределения материала. При помощи данного ползунка можно изменить характер распределения от не

зависимого до равномерного [12]. Для данного поворотного кулака было выполнено несколько анализов с различным значением распределения [17]. Наиболее подходящая для изготовления резанием геометрия была получена при положении ползунка, показанном на рисунке 5.

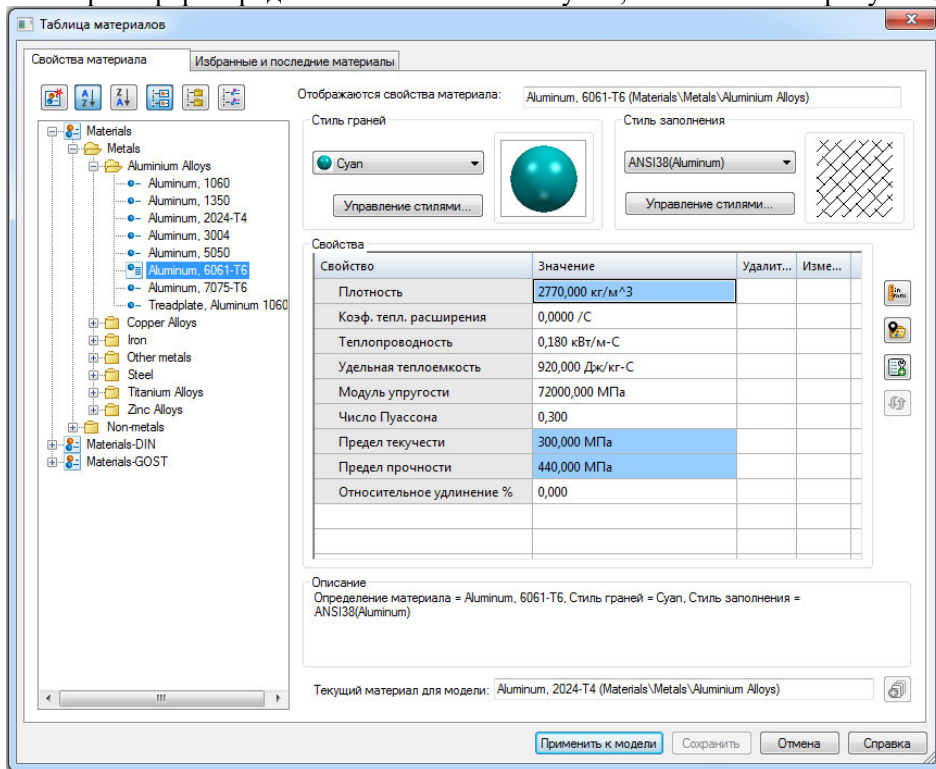


Рис. 3. Окно "Таблица материалов"

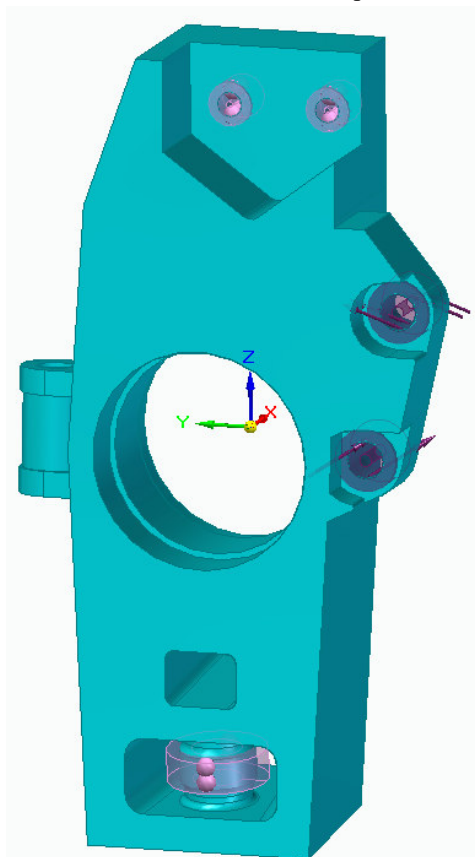


Рис. 4. Второй случай нагрузки, моделирующий торможение

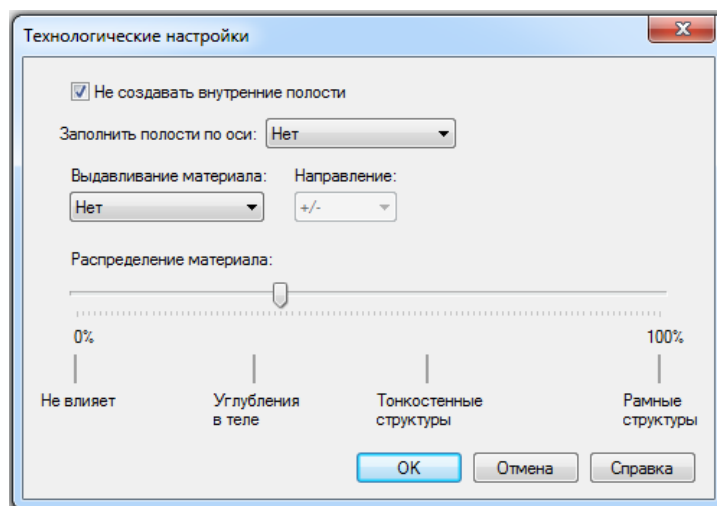


Рис. 5 Окно технологических настроек

Окно «Выполнить анализ» рис. 6 содержит настройки качества анализа и процента снижения массы. При повышении качества анализа возрастает максимально возможный процент снижения массы за счет уменьшения размера конечных элементов, на которые деталь разбивается при анализе, но возрастает и время, требующееся на анализ, так как вышеупомянутое уменьшение размера конечных элементов влечет за собой увеличение их числа, а, следовательно, и повышение количества неизвестных в системе

уравнений анализа. Время, указанное под ползунком качества анализа – это расчетное время и может не совпадать с реальным. В зависимости от количества сил и случаев нагрузки продолжительность может многократно превысить указанную в окне. Для проверки правильности задания входных параметров можно выполнить анализ с низким процентом снижения массы и низким качеством. Анализ кулака был выполнен несколько раз. Максимальный процент снижения массы при запасе прочности 2 – 75 процентов.

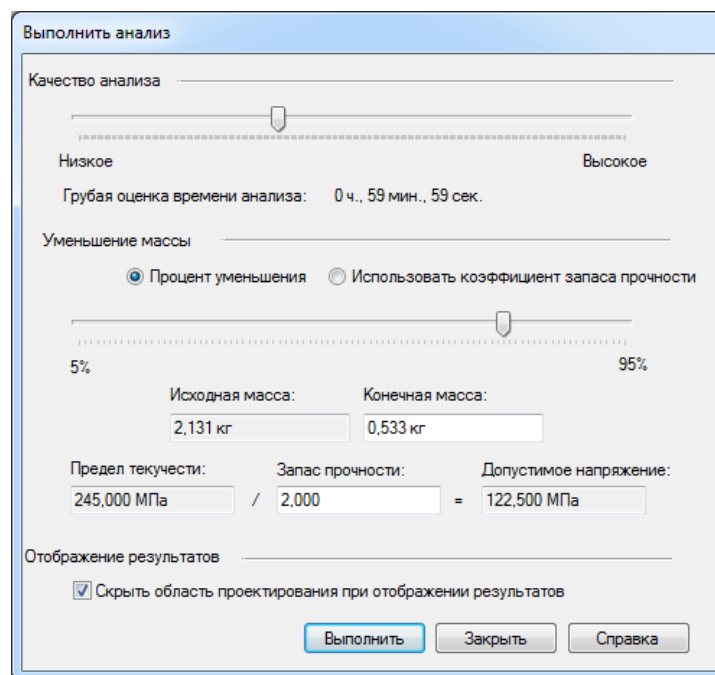


Рис. 6. Окно «Выполнить анализ»

III этап. Генеративный дизайн производился с увеличением процента снижения массы при пониженном качестве анализа [17] – это необходимо для сокращения затрат времени на выполнение промежуточных расчетов. При достижении предела снижения было варьировано распре-

деление материала. На рис. 7 изображен поворотный кулак альтернативной конструкции, который был оптимизирован с использованием генеративного дизайна, но технологические настройки были установлены на завышенное значение рамности. Итоговая геометрия совершенно непригодна к изготовлению резанием –

доступ режущего инструмента заблокирован. Результаты анализов показаны ниже рис.8 и рис. 9. Деталь на рис. 8 не имеет части креплений, это вызвано заданием слишком высокого процента снижения массы – алгоритм вычел материал из областей креплений так как в оставшейся области проектирования не осталось элементов с напряжениями ниже допустимого.

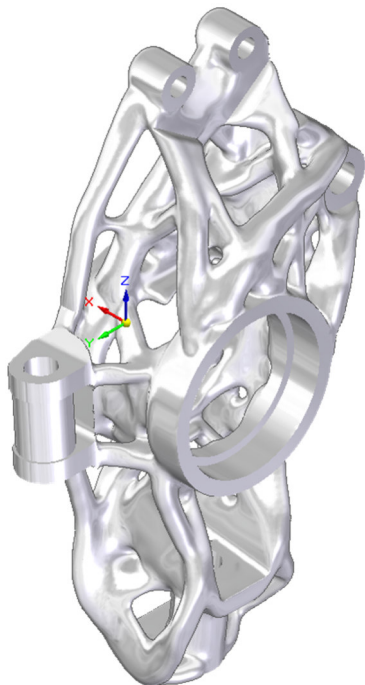


Рис. 7. Результат с завышенной «рамностью»

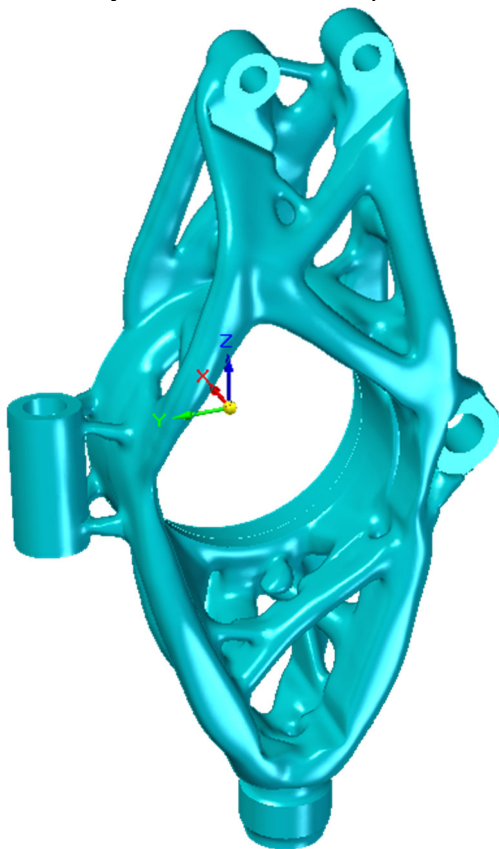


Рис. 8. Результат анализа с излишним процентом снижения массы.

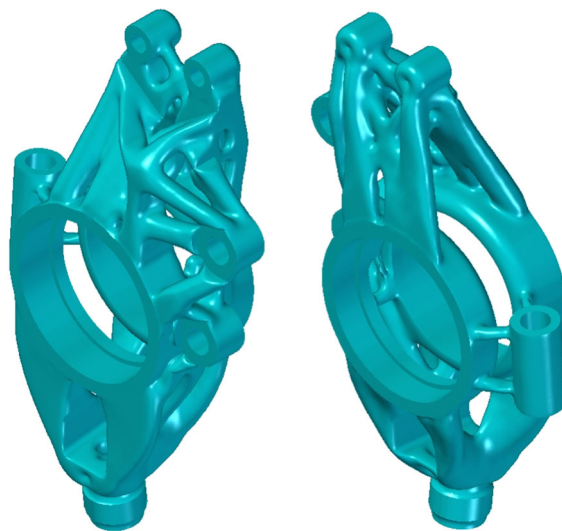


Рис. 9. Итоговый результат генеративного дизайна (масса=533 г.)

IV этап. Адаптация к производству. Среди возможных вариантов изготовления деталей, полученных при помощи генеративного дизайна, есть 3D печать, литье и обработка резанием (имеются ограничения). Многие виды 3D печати не подходят для изготовления вышеописанной детали так как материалы, используемые для печати, обладают недостаточной твердостью и пределом прочности на смятие. Технология, пригодная к изготовлению, это селективное лазерное спекание металлического порошка, наносимого тонкими слоями при помощи скребка и ролика. Полученные при помощи данной технологии детали будут нуждаться в минимальном объеме механической обработки (чистовая расточка посадочных отверстий подшипников, полировка доступных поверхностей для снижения числа концентраторов напряжений, дополнительная обработка резьбовых отверстий метчиком). К недостаткам можно отнести достаточно низкую распространенность и дороговизну как самой печати, так и расходных материалов.

Литьем (например, по выплавляемым моделям) тоже можно получить деталь требуемой конфигурации. К недостаткам литья можно отнести возможность формирования пустот по объему, резко снижающих прочность, и невысокие механические характеристики самих литейных сплавов.

В итоге, в качестве метода изготовления была выбрана обработка резанием. Заготовка получена из однородного материала с высокими механическими характеристиками. Стоимость расходных материалов ниже, по сравнению с печатью спеканием, и имеется доступ к оборудованию.

Задачей является обеспечение возможности изготовления на 3-х осевом фрезерном станке из

плиты материала толщиной 70мм. Обработку планируется производить с тремя переустановками с поворотом на  $90^\circ$  вокруг оси Z детали. В качестве инструментов будут использованы концевые фрезы с цилиндрической и сферической режущей частью.

При адаптации к изготовлению, по контурам оптимизированной модели, было смоделировано тело детали с карманами без отрицательных уклонов (рис. 10) и радиусами скруглений, несущественно превышающими радиусы стандартных концевых фрез. В ходе моделирования геометрия, полученная при помощи генеративного дизайна, была разделена на несколько областей для упрощения построения. Большинство элементов были перестроены при помощи простых операций: вытягивание по прямой и под углом. При моделировании некоторых элементов были использованы команды: вытягивание по сечениям и придать толщину. После построения отдельных элементов было выполнено объединение при помощи булевой операции в одно тело и создание скруглений с переменным радиусом.

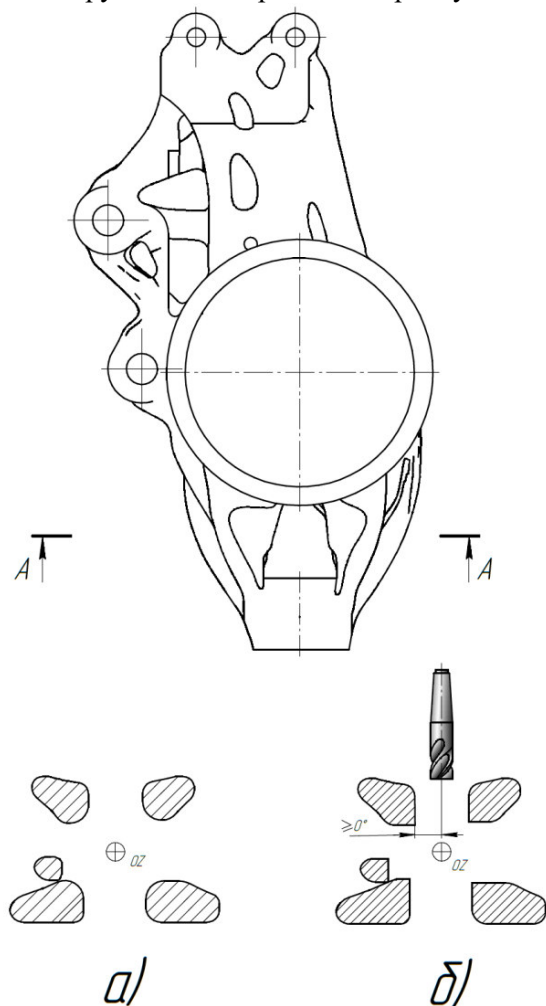


Рис. 10. Схематическое изображение сечений результата генеративного дизайна (а) и адаптированной детали (б)

Для упрощения установки в приспособление к модели поворотного кулака необходимо добавить квадратные бобышки рис. 10. Данные бобышки можно будет устанавливать, как в тиски, так и закреплять прижимами к столу. Таким образом, заготовкой для фрезеровки поворотного кулака будет служить прямоугольная плита с посадочным отверстием для подшипников рис. 11.

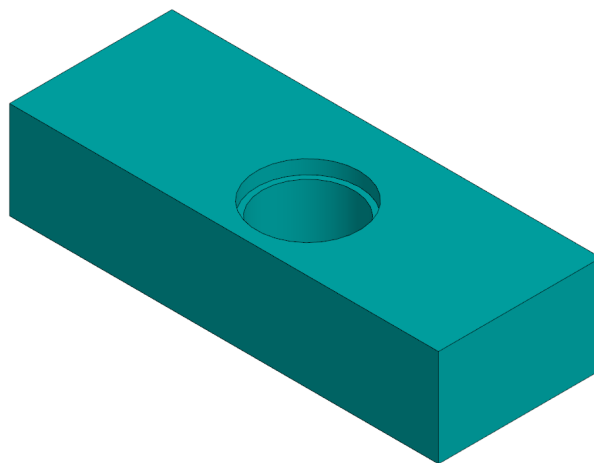


Рис. 11. Заготовка поворотного кулака перед установкой на стол фрезерного станка

Большую часть материала лучше удалять при прижиге кулака его лицевой и тыльной сторонами к столу, т. к. возможно дополнительное закрепление за посадочное отверстие подшипников. Дополнительное крепление через осевое отверстие обеспечит дополнительную жесткость и позволит снимать больший слой материала за проход без возникновения дробовидного выбивания на поверхности – это сократит время, требуемое на черновые операции. В заготовке отверстия для подшипников должны иметь припуск для чистовой обработки так как после снятия больших объемов материала цилиндрические поверхности поведет. После завершения обработки на фрезерном станке необходимо будет удалить бобышки рис. 12 и выполнить отверстия для крепления шаровых шарниров рулевой тяги и нижнего рычага. Достаточной точности данных отверстий нужно добиться при помощи шаблонов, например, изготовленных лазерной резкой из пластмассы или фанеры. В данном случае необходимо изготовить всего лишь два правых поворотных кулака и два левых на переднюю и заднюю ось. Для дополнительного снижения массы возможно удалить часть материала из нижнего крепления вручную при помощи борфрезы с удлиненным хвостовиком. После снятия материала необходимо выполнить шлифовку и полировку в направлении действия нагрузки для устранения концентраторов напряжений и предотвращения усталостного разрушения.

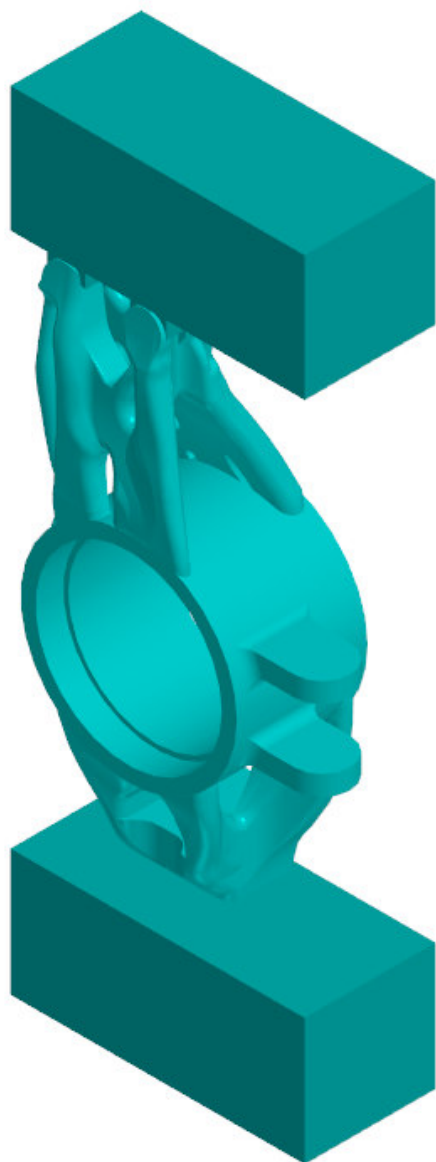


Рис. 12. Итоговая 3D модель адаптированного поворотного кулака

### Выводы

1. При помощи приложения CAD системы SolidEdge был выполнен генеративный дизайн поворотного кулака болида класса “Formula Student” с целью получения геометрии с наименьшим объемом и, как следствие, наименьшей массой. В качестве входных параметров оптимизации были использованы значения статических нагрузок, рассчитанных исходя из условий работы детали в повороте и при торможении. В ходе выполнения генеративного анализа был подобран наивысший процент снижения массы, при котором возможно выполнение входных условий. Процент составил 75 %. Дополнительно были варьированы технологические настройки с целью получения в результате наиболее простой в изготовлении детали. В данном случае оптимальные значения параметров: распределение

материала – 40% от максимальной и отключенные внутренние полости.

2. В качестве наиболее простого и доступного способа изготовления было выбрано фрезерование с тремя переустановками. Для адаптации к изготовлению было выполнено построение новой модели детали по контурам фасетного тела, полученного при помощи генеративного дизайна. Геометрия некоторых областей была изменена для упрощения фрезерования. Итоговое значение массы составило 610 грамм. Были рассмотрены пути дополнительного снижения массы при помощи ручной слесарной обработки областей детали, недоступных для фрезерования на трехосевом фрезерном станке, с последующей шлифовкой и полировкой для устранения концентраторов напряжений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пахомеев Н.В., Лопухов А.В., Чуйдук И.А., Салимоненко Г.Н. Разработка колесно-ступичного узла гоночного электроболида класса Formula Student // Сервис технических систем – Агропромышленному комплексу России Материалы международной научно-практической конференции института агроинженерии. Южно-Уральский государственный аграрный университет. 2019. С. 140–147.
2. Хамилл Д. Подвеска и тормоза: Как построить и модифицировать спортивный автомобиль. М.: Изд-во Veloce Publishing Plc, 2005. 96 с.
3. Milliken W.F. Race car vehicle dynamics: Problems, Answers and Experiments. : Изд-во SAE International, 2003. 78 с.
4. Курдюк В.А., Вольская Н.С. Влияние геометрических характеристик двухрычажной подвески на поперечных рычагах на кинематику и распределение усилий в узлах подвески // Известия московского государственного промышленного университета. 2013. №9. С. 50–55.
5. Саплинова В.В., Каськов С.А. Система подвески гоночного болида класса “Formula Student” и ее безопасность // Новые задачи технических наук и пути их решения. 2017. С. 206–209.
6. Саплинова В.В., Глаголев С.Н., Новиков А.Н., Новиков И.А. Разработка тормозной системы гоночного болида формульного типа класса “Formula Student” // Вестник гражданских инженеров. 2019. №5. С. 270–277.
7. Гудков Н.А., Михайлов П.Г. Уточнение нагрузочных режимов для расчетов на прочность на примере гоночных болидов Vauman Racing Team // Студенческие инженерные проекты Сборник трудов V всероссийской конференции. МАДИ. 2017. С. 76–91.



8. Кулагин А.Л., Тумасов А.В., Гончаров К.О. Расчет сил, действующих в передней подвеске гоночного болида Formula Student на двойных поперечных рычагах // Безопасность транспортных средств в эксплуатации Сборник материалов 71-й Международной научно-технической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 2010. С. 45–47.

9. Бутин Д.А., Тумасов А.В. Расчет рулевого управления с маятниковыми рычагами для болида класса Formula Student // Сборник материалов XII Международной молодежной научно-технической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 2013 С. 109–110.

10. Григоренко А.А., Шопина Е.В. Выполнение генеративного дизайна и адаптация к изготовлению поворотного кулака. Часть I // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №1. С 132–143.

11. Рампель Й. Шасси автомобиля: Элементы подвески. М.: Изд-во Машиностроение, 1987. С. 284.

12. Бухтояров И.В., Кошкина И.Н. Оптимизация конструкции робота методами генеративного дизайна // STUDENT. 2022. №5. С. 45–56.

13. Демин Е.А., Федоров А.Н., Гончаров К.О., Кулагин А.Л. Применении САПР в проектировании элементов подвески спортивного ав-

томобиля класса Formula Student // Будущее технической науки сборник материалов Сборник выступлений международной молодежной научно-практической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 2015. С. 601–602.

14. Гудков Н.А., Михайлов П.Г., Киселев П.И., Больших А.А. Исследование прочностных свойств стали DOCOL1000DP и верификация критерия прочности для конечно-элементного расчета поворотного кулака автомобиля класса “Формула студент” // Сборник материалов и докладов 6-ого Всероссийского форума. 2020. С. 35–46.

15. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Изд-во Машиностроение, 2001. 420 с.

16. Кутепов Н.Ю., Манджапарашвили Р.З. Разработка методики оптимизации конструкции поворотных кулаков гоночного болида проекта Formula Student. // Прикладная математика Материалы VI международной научно-практической конференции молодых ученых. Тольяттинский государственный университет. 2020. С. 869–872.

17. Петров Р.И., Скабин Д.А., Шабунин Е.Н. Создание рамы квадрокоптера методом генеративного дизайна с применением аддитивных технологий // Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Том 2. 2018. С. 136–139.

#### Информация об авторах

**Григоренко Александр Александрович**, ассистент кафедры «Технология машиностроения». E-mail: grigorenko1998@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Шопина Елена Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 22.06.2022 г.

© Григоренко А.А., Шопина Е.В., 2023

**\*Grigorenko A.A. Shopina E.V.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*\*E-mail: grigorenko1998@yandex.ru*

## GENERATIVE DESIGN AND ADAPTATION FOR MANUFACTURING OF STEERING KNUCKLE. PART II

**Abstract.** The article describes the creation of a 3D model of the steering knuckle of the “Formula Student” class car using the SolidEdge CAD / CAE system application, named generative design. The initial data are a model of an overly strong steering knuckle, previously calculated load values for various operating modes, information about the properties of the material. In the process of optimization, technological settings are varied in order to obtain a geometry that is as suitable as possible for cutting on a three-axis milling machine with a CNC and without an additional rotary axis. The result of the generative design is used to build a model of a knuckle that can be milled with repositioning and clamped into universal fixtures such as a vise.

*The construction is carried out using standard solid modeling tools (lofting by sections, adding thickness, etc.). Fastening elements have been added to the part, in the form of rectangular bodies, which will need to be removed using manual cutting and grinding operations after the milling operations are completed. Additionally, holes are removed parallel to the Z axis, which can only be made after cutting the fasteners.*

**Keywords:** generative design, steering knuckle, cases of loading.

## REFERENCES

1. Pakhomeev N.V., Lopukhov A.V., Chuyduk I.A., Salimonenko G.N. Development of a wheel-hub unit for an electric race car of the Formula Student class [Razrabotka kolesno-stupichnogo uzla gonochnogo elektrobolida klassa Formula Student]. Servis tekhnicheskikh sistem – Agropromyshlennomu kompleksu Rossii Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii instituta agroinzhenerii. YUzhno-Ural'skij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. 2019. Pp. 140–147. (rus)
2. Hamill D. Suspension and brakes: How to build and modify a sports car. Moscow: Veloce Publishing Plc, 2005. 96 p. (rus)
3. Milliken W.F. Race car vehicle dynamics: Problems, Answers and Experiments. SAE International, 2003. 78 p.
4. Kurdyuk V.A., Volskaya N.S. Influence of geometrical characteristics of a double wishbone suspension on transverse levers on the kinematics and distribution of forces in the suspension units [Vliyaniye geometricheskikh harakteristik dvuhrychazhnoy podveski na poperechnykh ryuchagah na kinematiku i raspredeleniye usilij v uzlah podveski]. Izvestiya moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta. 2013.No. 9. Pp. 50–55. (rus)
5. Saplinova V.V., Kaskov S.A. The Suspension System of a Formula Student Racing Car and Its Safety [Sistema podveski gonochnogo bolida klassa "Formula Student" i ee bezopasnost']. Novye zadachi tekhnicheskikh nauk i puti ih resheniya. 2017. Pp. 206–209. (rus)
6. Saplinova V.V., Glagolev S.N., Novikov A.N., Novikov I.A. Development of the braking system for a Formula Student race car [Razrabotka tormoznoj sistemy gonochnogo bolida formul'nogo tipa klassa "Formula Student"]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2019. Pp. 270–277. (rus)
7. Gudkov N.A., Mikhailov P.G. Refinement of load conditions for strength calculations on the example of racing cars Bauman Racing Team [Utochneniye nagruzochnykh rezhimov dlya raschetov na prochnost' na primere gonochnykh bolidov Bauman Racing Team]. Studencheskie inzhenernye proekty Cbornik trudov V sserossijskoj konferencii. MADI. 2017. Pp. 76–91. (rus)
8. Kulagin A.L., Tumasov A.V., Goncharov K.O. Calculation of the forces acting in the front suspension of the Formula Student racing car on double wishbones [Raschet sil, dejstvuyushchih v perednej podveske gonochnogo bolida Formula Student na dvoynykh poperechnykh ryuchagah]. Bezopasnost' transportnykh sredstv v ekspluatatsii Sbornik materialov 71-j Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva. 2010. Pp. 45–47. (rus)
9. Butin D.A., Tumasov A.V. Calculation of steering with pendulum levers for a Formula Student car [Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoj molodyozhnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii]. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva. 2013. Pp. 109–110. (rus)
10. Grigorenko A.A., Shopipa E.V. Generative design and adaptation for manufacturing of steering knuckle. Part I. [Vypolneniye generativnogo dizajna i adaptatsiya k izgotovleniyu povorotnogo kulaka chast' pervaya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 132–143. (rus)
11. Rampel J. Car chassis: Suspension elements [Shassi avtomobilya: Elementy podveski]. Moscow: Mashinostroeniye, 1987. 284 p. (rus)
12. Bukhtoyarov I.V., Koshkina I.N. Optimization of the robot design by generative design [Optimizatsiya konstrukcii robota metodami generativnogo dizajna]. STUDENT. 2022.No 5. Pp. 45–56. (rus)
13. Demin E.A., Fedorov A.N., Goncharov K.O., Kulagin A.L. The use of CAD in the design of the suspension elements of a Formula Student class race car [Primeneniye SAPR v proektirovaniye elementov podveski sportivnogo avtomobilya klassa Formula Student]. Budushchee tekhnicheskoy nauki sbornik materialov Sbornik vystuplenij mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Nizhegorodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. R.E. Alekseeva. 2015. Pp. 601–602. (rus)
14. Gudkov N.A., Mikhailov P.G., Kiselev P.I., Bolshikh A.A. Study of the strength properties of DOCOL1000DP steel and verification of the strength criterion for finite element calculation of the steering knuckle of a Formula Student car [Issledovaniye prochnostnykh svoystv stali DOCOL1000DP i verifikatsiya kriteriya prochnosti dlya konechno-elementnogo rascheta povorotnogo kulaka avtomobilya klassa "Formula student"]. Sbornik materialov i dokladov 6-ogo Vserossijskogo foruma. 2020. Pp. 35–46. (rus)

15. Anuryev V.I. Handbook of the designer-machine builder [Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya]. Moscow: Mashinostroenie, 2001. 420 p. (rus)

16. Kutepov N.Yu., Manjaparashvili R.Z. Development of a methodology for optimizing the design of the steering knuckles of a racing car of the Formula Student project. [Razrabotka metodiki optimizacii konstrukcii povorotnyh kulakov gonochnogo bolida proekta Formula Student]. Prikladnaya matematika Materialy VI mezhdunarodnoj

nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh. Tol'yattinskij gosudarstvennyj universitet. 2020. Pp. 869–872. (rus)

17. Petrov R.I., Skabin D.A., Shabunin E.N. Creation of a quadcopter frame by generative design using additive technologies [Sozдание ramy kvadrokoptera metodom generativnogo dizajna s primeneniem additivnyh tekhnologij]. Nedelya nauki SPBPU. 2018. Pp. 136–139. (rus)

*Information about the authors*

**Grigorenko, Alexander A.** E-mail: grigorenko1998@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Shopina, Elena V.** PhD. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 22.06.2022*

**Для цитирования:**

Григоренко А.А., Шопина Е.В. Выполнение генеративного дизайна и адаптация к изготовлению поворотного кулака. Часть II // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 102–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-102-112

**For citation:**

Grigorenko A.A. Shopina E.V. Generative design and adaptation for manufacturing of steering knuckle. Part II. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 102–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-102-112