

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС С ПОМОЩЬЮ СТЕРЕОЛИТОГРАФИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

Кирилл Алексеевич Лезин, Николай Петрович Мидуков

Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий
и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Лезин К. А., Мидуков Н. П., 2026

Автор-корреспондент: Н. П. Мидуков, e-mail: mnp83@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В работе исследуется возможность применения 2D-сканера и стереолитографической 3D-печати для проектирования и изготовления зубчатых передач — деталей специального оборудования для производства бумажной продукции. Эта запчасть отвечает за передачу крутящего момента на валы машины для нанесения печати. Задачей исследователей было добиться ускорения производственного цикла и обеспечить технологическую сторону импортозамещения указанных деталей. Предварительно было проведено изучение научных источников, в которых описан опыт попытки использовать 3D-печать для получения зубчатых колёс в мировой производственной практике. Эта технология позволяет обеспечить независимость от зарубежных поставщиков и сократить логистические издержки в условиях современных вызовов. Экспериментальные образцы зубчатых колёс, изготовленные из полимерной смолы методом стереолитографии, имеют ряд преимуществ по сравнению с аналогичными серийными компонентами. Зубчатые колеса, напечатанные на 3D-принтере, успешно прошли функциональные испытания, продемонстрировав снижение себестоимости, а также сокращение времени производства с нескольких недель до 2–3 суток. Работа посвящена оптимизации процессов моделирования, ориентации детали, точности позиционирования и параметров печати, включая применение конструктивных решений для повышения качества и удобства изготовления деталей. В качестве иллюстраций в статье приведены фотографии разных этапов работы и полученных образцов. Результаты анализа разных аспектов проектирования и реализации зубчатых передач методами стереолитографической 3D-печати демонстрируют перспективность методики для импортозамещения и восстановления устаревшего оборудования бумагоделательных машин. Этот опыт может быть применим и к деталям другой техники, методика открывает много перспектив для дальнейших практических исследований.

Ключевые слова: зубчатые колёса, геометрические размеры, прочность, 3D-печать, стереолитографическая печать, моделирование деталей машин

Для цитирования: Лезин К. А., Мидуков Н. П. Особенности разработки и изготовления зубчатых колёс с помощью стереолитографической печати // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 16–24. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_16–24.

DESIGN AND MANUFACTURING FEATURES OF GEARS PRODUCED BY STEREOGRAPHY

Kirill Alekseevich Lezin, Nikolai Petrovich Midukov

Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: N. P. Midukov, e-mail: mnp83@mail.ru

ABSTRACT

This study explores the possibility of applying a 2D scanner and stereolithographic 3D printing to design and produce gear drives – parts of specialized equipment used in paper manufacturing. This component is responsible for transmitting torque to the shafts of the printing machine. The researchers aimed to speed up the production cycle and fulfill the technological requirements for import substitution of these components. Initially, a study of the scientific literature was carried out, detailing previous attempts to utilize 3D printing for gear manufacturing in worldwide industrial practice. This technology provides independence from overseas suppliers and cuts logistics costs in the context of



current challenges. Experimental gear samples produced from polymer resin via stereolithography offer several advantages over comparable mass-produced components. The gears printed on a 3D printer successfully passed functional tests, demonstrating a reduction in production costs as well as a decrease in manufacturing time from several weeks to 2–3 days. This study focuses on optimizing simulation processes, part orientation, positioning precision, and printing parameters, as well as the implementation of design solutions to enhance part quality and ease of manufacturing. Photographs illustrating various stages of the work and the resulting samples are presented in the article. The results of the analysis of various aspects of the design and implementation of gear transmissions using stereolithographic 3D printing methods demonstrate the potential of this technique for import substitution and the restoration of outdated equipment in papermaking machines. This experience is also applicable to parts of other machines, and the method presents many possibilities for future practical research.

Keywords: gears, geometrical dimensions, mechanical strength, 3D printing, stereolithographic printing, modeling of machine parts

For citation: Lezin K. A., Midukov N. P. (2026) 'Design and manufacturing features of gears produced by stereolithography', Technology and Energy, vol. 2 no. 2, pp. 16–24. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_16–24

ВВЕДЕНИЕ

Оборудование для производства бумажной продукции включает в себя детали и узлы печатающих машин, которые представляют собой зубчатые колеса. Несмотря на то, что зубчатые колеса являются довольно простыми в исполнении механизмами, их проектирование и изготовление имеет некоторые особенности. На сегодняшний день в России огромное количество зарубежного оборудования, поставки запчастей для которого ограничены. Это связано как с санкциями (когда компании отказываются поставлять запчасти, и из строя выходит многомиллионное оборудование), так и с устареванием парка оборудования, которому необходимы запчасти, больше не выпускаемые производителем (на многих предприятиях в России для печати на картоне, бумаге и других видах упаковочного материала используются импортные печатные машины с длительным сроком эксплуатации). В некоторых случаях требуется модернизация существующих установок и изменение размеров деталей и узлов механизма, тогда на помощь приходят аддитивные технологии, которые позволяют в небольшой лаборатории в короткие сроки быстро изготовить зубчатые колеса по их 3D-модели [1–6]. Однако не все способы 3D-печати подходят для решения этой задачи — у каждой технологии есть свои особенности. Целью данного исследования стало изучение их и определение наиболее подходящего способа изготовления зубчатых колес.

В работе исследователей университета Дебрецена (венг. Debreceni Egyetem, один из ведущих вузов Венгрии) представлены результаты изготовления зубчатых колес на принтерах Ultimaker 3 (FDM) и Formlabs Form (SLA) из полимерной нити методом экструзии (FDM) и из фотополимерной смолы методом стереолитографической печати (SLA). Результаты экспериментов венгерских специалистов свидетельствуют о более высокой точности

при использовании FDM по сравнению с SLA [7, 8, 9]. Контроль геометрии продукции осуществляется лазерным 3D-сканером, который регистрирует трёхмерное облако точек поверхности зацепления и, сопоставив его с CAD-моделью, позволяет вычислять отклонения по всей поверхности зубьев. Известно, что точность изготовления зависит от параметров печати, которые были приведены авторами в предыдущей работе [10]. В работе применяются методы, не всегда доступные широкой аудитории из-за сложности оборудования и навыков реверс-инжиниринга.

Несмотря на высокую точность изготовления зубчатых колёс с помощью FDM-печати, остаётся проблема, связанная со снижением механических характеристик зубьев. В работе [11] прочность зубьев определялась с помощью инфракрасной термографии, являющейся неразрушающим методом контроля. В приведённых экспериментальных данных сравниваются свойства шестерён, изготовленных из различных полимерных материалов, включая PLA, ABS, PETG и другие распространённые полимеры [12, 13, 14]. Зубчатые колёса были изготовлены с помощью 3D-принтера Anycubic Kassel plus при скорости печати 55 мм/с и толщине слоя 0,2 мм, с варьированием температуры экструдера и рабочего стола в диапазоне, рекомендованном для соответствующего материала. Эти результаты демонстрируют влияние состава материала и режимов печати на прочность зубьев, что объясняется физической адгезией между слоями, кинетикой отверждения полимера и термическими градиентами; отмечается, что различия в материалах и режимах печати приводят к изменению микроструктуры и способности к трещинообразованию, следовательно, требуют дальнейших исследований и оптимизации параметров обработки для повышения надёжности зубчатых передач.



Известно, что наибольшей прочностью обладают зубчатые колеса, изготовленные из металла. 3D-печатать изделий из металла выполняется методом лазерного спекания (селективного) металлических порошков [15, 16]. Как и при изготовлении шестерёнок из смолы и полимерной экструзии (FDM), прочность деталей и точность их геометрии во многом определяется высотой слоя. В работе [17] установлено, что при высоте слоя 50 мкм механические характеристики зубчатых колес выше; однако при повышении толщины слоя до 150 мкм с последующей полировкой можно добиться существенного удешевления процессов изготовления (до 33%). Авторы работы справедливо предлагают учитывать затраты не только на изготовление, но и на постобработку деталей.

Экономическая целесообразность использования аддитивных технологий в изготовлении зубчатых колёс может быть дополнительно повышена за счёт снижения расхода материала: в условиях субтрактивного изготовления шестерён уменьшение объема заготовки обычно сопровождается усложнением конструкции и, следовательно, ростом стоимости фрезерных, сверлильных и других операций. В рамках аддитивного производства возможно изготовление сложной по геометрии детали с отверстиями без существенного снижения прочностных характеристик зубьев. Затраты на материалы можно снизить на 10–40%, при этом

незначительно ухудшая механические параметры зубчатых колёс [18–20].

Практически во всех случаях исследователи так или иначе добиваются удовлетворительных результатов изготовления зубчатых колес с помощью 3D-принтеров. Известны работы по моделированию создания целых коробок из зубчатых колёс, изготовленных по различным технологиям 3D-печати — FDM, SLA, SLS, SLM. Однозначных советов по тому, какой способ аддитивного производства шестерёнок лучше, нет, кроме лазерного спекания металлических порошков, которое позволяет получить несопоставимо более высокие механические характеристики зубчатых колес. В остальных случаях качество во многом определяется параметрами 3D-печати, постобработкой и навыками 3D-печатника.

Однако из критического анализа литературных источников можно сделать общий вывод: несмотря на доступность среды, изготовление зубчатых колёс с помощью аддитивных технологий требует инженерных навыков в 3D-моделировании и 3D-сканировании, а также серьёзной подготовки в области 3D-печати. Упростить эти процессы — значит сделать 3D-печать шестерёнок более доступной, а именно это и являлось задачей данных исследований, направленных на использование простых и доступных средств и уже имеющихся характеристик 3D-печати в изготовлении зубчатых колёс.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Зубчатые колёса, предназначенные для передачи крутящего момента на валы машины для нанесения печати, изготовлены с помощью стереолитографического 3D-принтера Anycubic Photon M3 Max. Характеристики принтера: технология печати — SLA; материал печати — фотополимерная смола; рабочее пространство — 298 × 300 × 164 мм; минимальная толщина слоя — 10 мкм (при печати изделий — 50 мкм); длина волны источника света — 405 нм; программное обеспечение — Anycubic Photon Workshop; формат файла — STL. Для постобработки зубчатых колёс применялась система Washang Cure Max с рабочим объёмом мойки и засветки — 305 × 165 × 300 мм, угол распылка — 360°. В процессе промывки использовались концентрированный изопропиловый спирт (≈100%) и вода. 3D-моделирование зубчатых колёс проводилось в САД-программе, которая выдавливала область-основание зубчатого колеса и без учёта отверстия для его крепления. Для формирования

области был использован 2D-сканер HP SmartTank 530. Предварительно зубчатые колёса, которые необходимо было изготовить, покрывались матирующим спреем на основе талька, а фон при сканировании формировался с помощью бумаги чёрного цвета. Векторизация растрового изображения, полученного при сканировании, осуществлялась через онлайн-редактор, а калибровка размеров зубчатых колёс производилась с помощью обычной линейки и штангенциркуля.

В работе использовалось оборудование, закупленное в рамках совместного Российско-Белорусского проекта, а зубчатые колёса являлись важной и необходимой запасной частью печатной машины, которая расположена на территории предприятия-партнёра проекта. Работа проводилась в рамках реализации совместного Российско-Белорусского Гранта, финансируемого Комитетом по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга и Государственным комитетом науки и технологии Республики Беларусь.¹

¹ Совместный научный и научно-технический проект, выполняемый образовательными и научными организациями, расположенными на территориях Санкт-Петербурга и Республики Беларусь на тему: «Модель машинно-аналитического комплекса



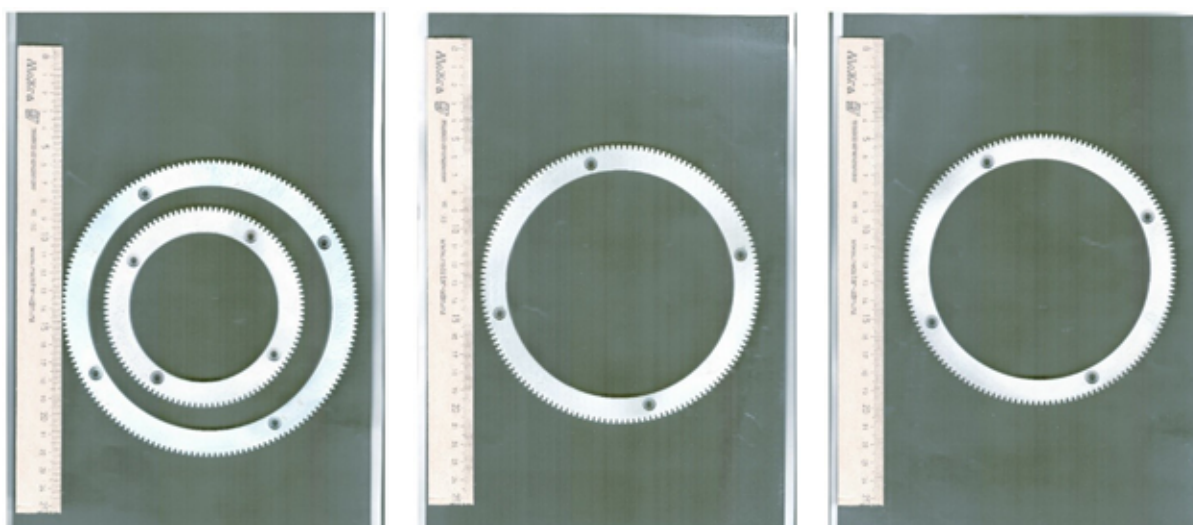


Рисунок 1. Результат сканирования поверхности зубчатых колёс, обработанных матирующим спреем

Figure 1. Surface scan result of gears treated with matting spray

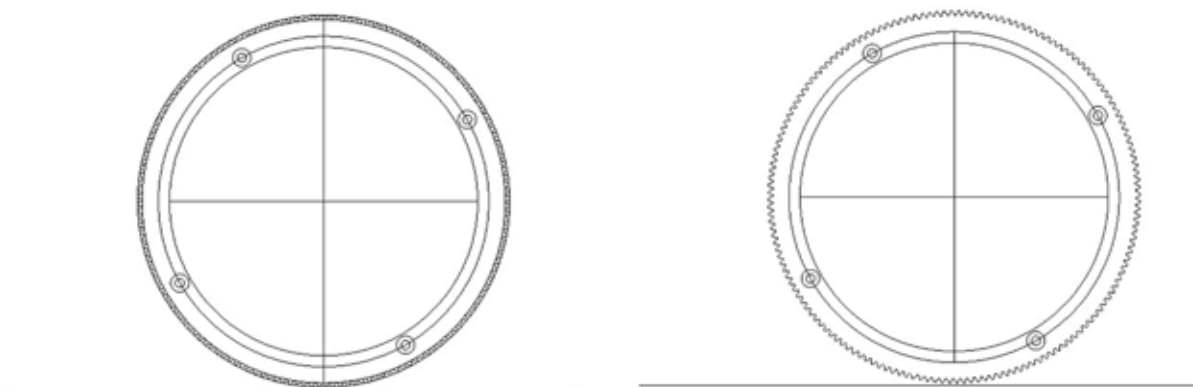


Рисунок 2. Векторизация области зубчатого колеса и отверстий для его крепления

Figure 2. Gear area and mounting holes vectorization

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первый этап создания зубчатых колёс связан со сканированием. Если зубчатое колесо имеет простую форму с обеих сторон, то нет необходимости в использовании дорогостоящих лазерных 3D-сканеров, доступ к которым не всегда имеется у небольшого предприятия. В таком случае можно использовать обычный офисный сканер, который обязательно нужно настроить для получения высококачественного изображения профиля зубчатого колеса. Для повышения контрастности требуется подготовка поверхности, подлежащей сканированию. На рисунке 1 представлен результат подготовки поверхности зубчатых колёс мелованным спреем. После

и её реализация на базе цифровых технологий при решении задач управления и прогнозирования качества в производстве целлюлозных композиционных материалов».

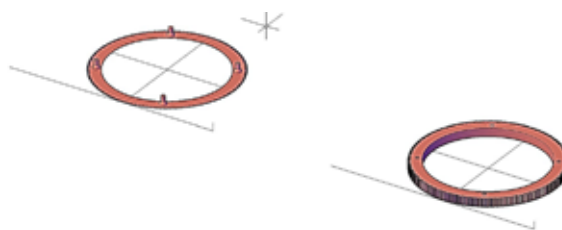


Рисунок 3. Результат команды «выдавить поверхность» в CAD-программе

Figure 3. Result of the "Extrude Surface" command in CAD software

нанесения спрея при сканировании слева устанавливается линейка, обеспечивающая метрическую калибровку масштаба разрабатываемой 3D-модели.

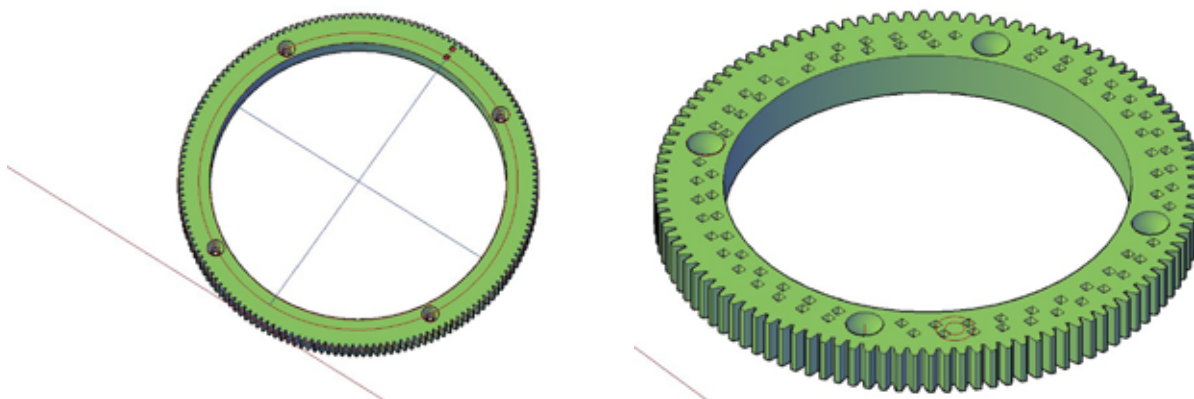


Рисунок 4. Снижение площади поверхности зубчатого колеса, которое контактирует с рабочим столом 3D-принтера

Figure 4. Reducing the contact surface area between the gear and the 3D printer build plate

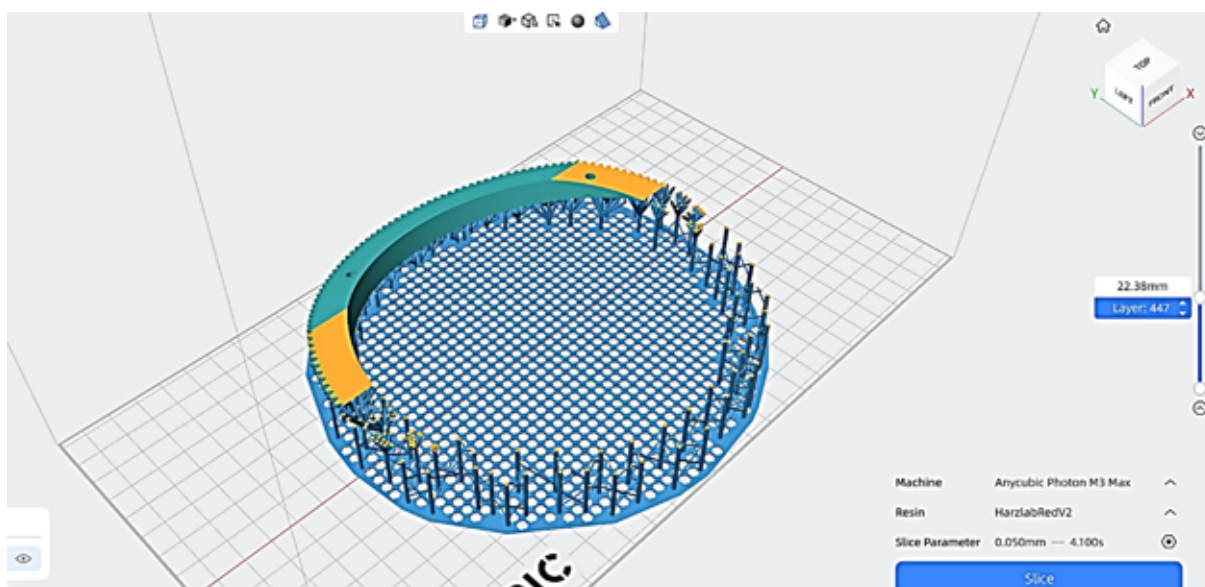


Рисунок 5. Расположение зубчатого колеса и опорных элементов при стереолитографической печати

Figure 5. Placement of the gear and support elements in stereolithography printing

Изображение высокого разрешения (не менее 600 dpi), выполненное как в чёрно-белом, так и в цветном вариантах, загружается в САД-программу векторного формата, где контур зубчатого колеса просто обводится. Принцип обводки зубчатых колес позволяет обойти сложное построение эвольвенты по расчетам. В отдельных случаях легче выполнить простую обводку, чтобы не искать параметры зуба и коэффициент смещения эвольвенты, которые могут быть неизвестны и сложно подбираемы. Поэтому в данном случае представлен самый простой и доступный метод: контур зубчатого колеса обводится, а затем, как показано на рисунке 2, определяются диаметры (внешний, внутренний, диаметры дополнительных отверстий).

Далее по этим контурам создается плоский эскиз, который затем переводится в поверхность (рисунок 3).

Следующим этапом является выдавливание векторизованной области. Как правило, зубчатые колеса имеют постоянный профиль по всей ширине (то есть одна торцевая поверхность зеркально повторяет другую), поэтому выдавливания области на высоту, равную ширине зубчатого колеса, достаточно для того, чтобы создать полноценную и удовлетворяющую всем запросам заказчика 3D-модель.

Одной из особенностей 3D-печати с помощью стереолитографического принтера является сложность отделения напечатанной модели от рабочей платформы после завершения процесса печати. Существует несколько



Рисунок 6. Геометрические характеристики элементов поддержки при печати зубчатых колёс

Figure 6. Geometric characteristics of support structures during gear printing

способов решения этой задачи. Одним из них является создание специальных отверстий в модели в месте её соприкосновения с платформой. Это снижает площадь контакта и упрощает снятие напечатанной детали с основы. На рисунке 4 такие отверстия представлены на модели зубчатого колеса. Важно таким образом расположить деталь при создании кода, чтобы поверхность с отверстиями плотно прилегала к поверхности рабочего стола 3D-принтера.

Описанный способ позволяет исключить необходимость изготовления опорных элементов при печати зубчатых колёс, поскольку использование опор увеличивает потребление фотополимерной смолы и повышает вероятность отслаивания изделия от платформы в процессе формирования слоя. На рисунке 4 демонстрируется конечный вид зубчатого колеса, отпечатанного без применения поддерживающих конструкций. В ситуации, когда размеры зубчатого колеса превышают габариты рабочей области 3D-принтера, изделие размещается под определённым углом таким образом, чтобы его ортогональная проекция вписывалась в границы печатной области, как это изображено на рисунке 5.

При значительных размерах зубчатого колеса важно рационально спроектировать систему поддержек,

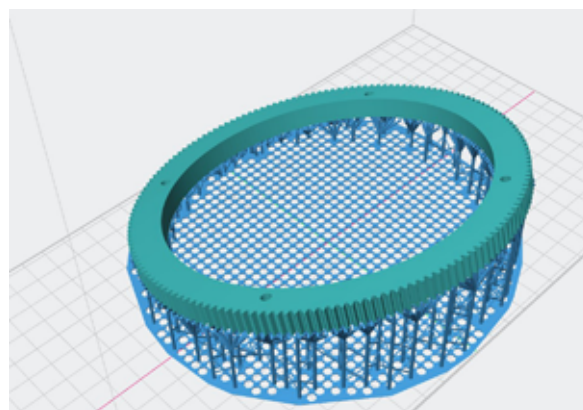


Рисунок 7. Расположение зубчатого колеса с опорными конструкциями под углом к поверхности рабочего стола

Figure 7. Gear and support structures oriented at an angle to the build platform surface



Рисунок 8. Зубчатые колёса, изготовленные с помощью стереолитографического 3D-принтера

Figure 8. Gears produced with a stereolithography 3D printer

обеспечивающих стабильность процесса печати. Перед началом процедуры осуществляется выбор материала для печати. В рассматриваемом примере применялись две разновидности фотополимерной смолы: первый образец представляет собой стандартный материал марки «Резина» производства фирмы Anycubic, второй же относится к премиальному классу — HARZ Labs Basic Red V2, характеризующемуся интенсивным розово-красным оттенком, повышенной прочностью и жёсткостью, а также пригодностью для высокоточной 3D-печати изделий сложной геометрии (рисунок 6).

На рисунке 7 демонстрируется оптимальная схема размещения зубчатого колеса, габариты которого превышают область печати, поэтому модель расположена под заданным углом с использованием вспомогательных опорных элементов.

Использование поддерживающих элементов требует тщательного контроля стабильности их фиксации в течение всего цикла печати. Нарушение целостности хотя бы одной опоры приводит к появлению фрагментов конструкции в жидкой фазе полимера, вызывая дефекты в последующих слоях формируемого изделия. Подобная ситуация вынуждает оператора 3D-принтера провести процедуру полной замены жидкости в ванне, включая фильтрацию отработанной смолы перед возобновлением производственного процесса заново. Данный этап занимает значительное количество времени и вызывает неудобства, вследствие чего рекомендуется проектировать опоры достаточной толщины, предотвращающей их отрыв. Вместе с тем увеличение поперечного сечения опор осложняет последующее удаление готовых изделий, что обуславливает необходимость механической постобработки. На рис. 8 приведены два образца зубчатых колес: первое изготовлено без опор и обладает небольшими габаритами (красного оттенка); второе выполнено с применением наклонённых поддерживающих элементов ввиду увеличенных размеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проанализированы ключевые аспекты проектирования и реализации зубчатых передач методами стереолитографической 3D-печати. Предлагаемый способ позволяет значительно ускорить производственный цикл благодаря применению принципов импортозамещения. Данная технология устраняет зависимость от зарубежных поставок компонентов, нередко сопровождающихся существенными временными задержками и удорожанием продукции, вызванными промежуточными поставками через третьи государства. Экспериментальные образцы зубчатых колёс, созданные в рамках исследования, успешно прошли эксплуатационные испытания, продемонстрировав свою

функциональность. Их себестоимость существенно снизилась по сравнению с аналогичными серийными компонентами, а продолжительность производственного цикла сократилась с обычных сроков доставки от поставщика продолжительностью около двух-трёх недель до интервала порядка двух-трёх суток. Тем не менее задача повышения эффективности работы и качества 3D-печатных деталей требует постоянного улучшения технологий моделирования, выбора оптимальной ориентации изделия, точности позиционирования и условий печати. Примером этому служит внедрение специализированных конструктивных решений, таких как применение отверстий для снижения площади сцепления с подложкой и выбор правильных параметров опорных структур. Использование предложенной методики способствует решению проблем импортозамещения либо продлению срока эксплуатации устаревшего оборудования, компоненты которого больше не производятся промышленностью, однако продолжают функционировать.

Список литературы

1. ГОСТ Р 57 558–201. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. М.: ИПК Издательство стандартов, 2017. 11 с.
2. Мидуков Н. П., Литвинов М. А. Инженерная и компьютерная графика. Технологии 3D-печати, сканирования и моделирования деталей сложной формы: учебное пособие, СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. 80 с.
3. Федоскин И. А., Мидуков Н. П., Петрова Е. А., Мельникова Д. А., Чудаков Г. К., Куров В. С. Технология и дизайн при изготовлении рабочего колеса центробежного насоса с помощью 3D-технологий // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 3. С. 85–89.
4. Мидуков Н. П., Куров В. С. Использование 3D-печати для создания элементов оборудования химической технологии // Известия вузов. Технология легкой промышленности. 2021. № 3. С. 132–137.
5. Иванова И. Ю., Мидуков Н. П. Критический анализ способов 3D-сканирования для обратного инжиниринга деталей оборудования массоподготовительного отдела бумажного производства // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 4. С. 77–84.
6. Томилова О. В., Тверитина А. В., Вечерина А. А., Шабров К. Д. Современные методы расчета технологических машин и оборудования: учебное пособие. СПб.: СПбГУПТД, 2022. 153 с.
7. Levente C., Gábor R. Geometrical Analysis of 3D-Printed Polymer Spur Gears // Machines. 2025. No. 13. Pp. 422–431.
8. John K., Dimitrios C., Nectarios V., Konstantinos S., Nikolaos V. Key parameters controlling surface quality and



- dimensional accuracy: A critical review of FFF process. // *Mater. Manuf. Process.* 2022. No. 37. 963–984.
9. Hanon M. M., Zsidai L., Ma Q. Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors. // *Mater. Today Proc.* 2021. No. 42. Pp. 3089–3096.
 10. Vidakis N., Petousis M., Kechagias J. D. Parameter effects and process modelling of Polyamide 12 3D-printed parts strength and toughness // *Mater. Manuf. Process.* 2022. No. 37. Pp. 1358–1369.
 11. Sapieta M., Dekýš V., Drvárová B., Kaco M., Pástor M., Sapietová A. Investigation of the Mechanical Properties of Spur Involute Gearing by Infrared Thermography // *Applied Science*. 2023. No. 13. 5988–5999.
 12. Majko J., Vaško M., Handrik M., Sága M. Tensile properties of additively manufactured thermoplastic composites reinforced with chopped carbon fibre. // *Materials*. 2022. No. 15. Pp. 4224–4235.
 13. Vaško M., Sága M., Majko J., Vaško A., Handrik M. Impact Toughness of FRTP Composites Produced by 3D Printing // *Materials*. 2020. No. 13. 5654–5665.
 14. Nguyen V. D. Experimental investigation of 3d printed gears // *TNU Journal of Science and Technology*. Vol. 10. No. 230. Pp. 463–470.
 15. Hasan M. R., Davies I. J., Pramanik A., John M., Biswas W. K. Technical assessment of 3D-printed spur gears produced from recycled PLA // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2024. 42 p.
 16. Gupta K. Recent developments in additive manufacturing of gears: A review // In *Advances in Manufacturing Technology XXXII*. IOS Press: Amsterdam, The Netherlands. 2018; pp. 131–136.
 17. Basak A. K., Ghasseb J., Pramanik A. Performance of Gears Manufactured Through Additive Manufacturing // *Metals*. 2025. No. 15. Pp. 1–63.
 18. Veiga F., Arizmendi M., Villanueva P., Rodriguez D., Moriones I., Jime'nez A., Uralde V., Michaud P. Moving toward high-performance additive manufacturing: lightweight gear production // *Advances in Mechanical Engineering*. 2025. Vol. 17. No. 11. Pp. 1–11.
 19. Montemurro M., Bertolino G., Roiner T. A general multi-scale topology optimisation method for lightweight lattice structures obtained through additive manufacturing technology. *Compos. Struct.* 2021. Vol. 258, No. 15. Pp. 1–33.
 20. Devshette A. R., Mehta P., Zambare S., Patil G., Chaudhari V. Modeling and fabrication of 5-speed gearbox using 3d printing with optimum weight // *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 2023 Vol. 8. No. 1. Pp. 213–219.
 - modeling of complex parts: a tutorial, St. Petersburg: VShTE SPbGUPTD, 2022. 80 p.
 3. Fedoskin I. A., Midukov N. P., Petrova E. A., Melnikova D. A., Chudakov G. K., Kurov V. S. Technology and design in the manufacture of a centrifugal pump impeller using 3D technologies // *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4. Industrial technologies*. 2020. No. 3. Pp. 85–89.
 4. Midukov N. P., Kurov V. S. Using 3D printing to create elements of chemical engineering equipment // *News of universities. Light industry technology*. 2021. No. 3. Pp. 132–137.
 5. Ivanova I. Yu., Midukov N. P. Critical Analysis of 3D Scanning Methods for Reverse Engineering of Equipment Parts in the Stock Preparation Department of Paper Production // *Bulletin of the Saint Petersburg State University of Technology and Design. Series 4. Industrial Technologies*. 2022. No. 4. Pp. 77–84.
 6. Tomilova O. V., Tveritina A. V., Vecherina A. A., Shabrov K. D. Modern Methods for Calculating Technological Machines and Equipment: A Tutorial. St. Petersburg: SPb-GUPTD, 2022. 153 p.
 7. Levente C., Gábor R. Geometrical Analysis of 3D-Printed Polymer Spur Gears // *Machines*. 2025. No. 13. Pp. 422–431.
 8. John K., Dimitrios C., Nectarios V., Konstantinos S., Nikolaos V. Key parameters controlling surface quality and dimensional accuracy: A critical review of FFF process // *Mater. Manuf. Process.* 2022. No. 37. Pp. 963–984.
 9. Hanon M. M., Zsidai L., Ma Q. Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors // *Mater. Today Proc.* 2021. No. 42. Pp. 3089–3096.
 10. Vidakis N., Petousis M., Kechagias J. D. Parameter effects and process modeling of Polyamide 12 3D-printed parts strength and toughness // *Mater. Manuf. Process.* 2022. No. 37. Pp. 1358–1369.
 11. Sapieta M., Dekýš V., Drvárová B., Kaco M., Pástor M., Sapietová A. Investigation of the Mechanical Properties of Spur Involute Gearing by Infrared Thermography // *Applied Science*. 2023. No. 13. 5988–5999.
 12. Majko J., Vaško M., Handrik M., Sága M. Tensile properties of additively manufactured thermoplastic composites reinforced with chopped carbon fibre // *Materials*. 2022. No. 15. Pp. 4224–4235.
 13. Vaško M., Sága M., Majko J., Vaško A., Handrik M. Impact Toughness of FRTP Composites Produced by 3D Printing // *Materials*. 2020. No. 13. Pp. 5654–5665.
 14. Nguyen V. D. Experimental investigation of 3d printed gears // *TNU Journal of Science and Technology*. Vol. 10. No. 230. Pp. 463–470.
 15. Hasan M. R., Davies I. J., Pramanik A., John M., Biswas W. K. Technical assessment of 3D-printed spur gears produced from recycled PLA // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2024. 42 p.
 16. Gupta K. Recent developments in additive manufacturing of gears: A review // In *Advances in Manufacturing Technology XXXII*. IOS Press: Amsterdam, The Netherlands. 2018. Pp. 131–136.

References

1. GOST R 57 558–201. Additive manufacturing processes. Basic principles. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2017. 11 p.
2. Midukov N. P., Litvinov M. A. Engineering and computer graphics. Technologies of 3D printing, scanning, and



17. Basak A. K., Ghassebi J., Pramanik A. Performance of Gears Manufactured Through Additive Manufacturing // Metals. 2025. No. 15. Pp. 1–63.
18. Veiga F., Arizmendi M., Villanueva P., Rodriguez D., Moriones I., Jimenez A., Uralde V., Michaud P. Moving toward high-performance additive manufacturing: lightweight gear production // Advances in Mechanical Engineering. 2025. Vol. 17. No. 11. Pp. 1–11.
19. Montemurro M., Bertolino G., Roiner T. A general multi-scale topology optimisation method for lightweight lattice structures obtained through additive manufacturing technology. Compos. Struct. 2021. Vol. 258. No. 15. Pp. 1–33.
20. Devshetty A. R., Mehta P., Zambare S., Patil G., Chaudhari V. Modeling and fabrication of 5-speed gearbox using 3d printing with optimum weight // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2023. Vol. 8. No. 1. Pp. 213–219.

■ Информация об авторах

Лезин Кирилл Алексеевич, студент Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4, 198095.

Мидуков Николай Петрович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов

химических технологий Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4, 198095; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-код 1021–6266, 694494, e-mail: mnp83@mail.ru.

■ Information about the authors

Lezin Kirill Alexeevich, student at the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095.

Nikolai Petrovich Midukov, Dr. Sci in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Processes and

Apparatuses of Chemical Technologies of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-code 1021–6266, 694494.

