УДК 67.05
DOI 10.47367/0021-3497_2025_5_372

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И МОНТАЖ КУЛАЧКА ПРОГРАММОНОСИТЕЛЯ ТКАЦКОЙ МАШИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ И МАТЕРИАЛОВ

DESIGN, MANUFACTURING AND INSTALLATION OF A WEAVING MACHINE PROGRAM CARRIER CAM USING INNOVATIVE METHODS AND MATERIALS

А.А. ГУДКОВ, Н.С. ФЕДЬКИН, Д.Ю. ЗАПОРОЖАН, А.В. КАНАТОВ

A.A. GUDKOV, N.S. FEDKIN, D.YU. ZAPOROZHAN, A.V. KANATOV

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(The Kosygin State University of Russia)

E-mail: nickit.fedkin@yandex.ru

В статье исследуется возможность применения цифрового моделирования и аддитивных технологий в машиностроении, в частности для машин и агрегатов текстильной промышленности, на примере разработки кулачка для зевообразовательного механизма ткацких станков. Представлен анализ ограничений материалов, которые традиционно используются в аддитивном производстве, а также выполнен первичный поиск характеристик инновационных материалов и определены возможности их применения в качестве наполнителя для улучшения физико-механических свойств изделий. В условиях санкционных ограничений имеются трудности с поставкой запчастей современного технологического оборудования, поэтому процесс изготовления эксплуатантом отдельных элементов конструкции машин в единичных экземплярах или мелкой серии в настоящее время является важным и востребованным. Особое внимание при проектировании уделяется отечественному программному обеспечению Компас-3D, которое дает возможность конструировать параметрические модели. Методология включает в себя процесс разработки цифрового двойника требуемого изделия от этапа анализа технического задания до процесса 3D-моделирования и подготовки модели к производству методом послойного наплавления FDM. Результаты исследования показывают, что настройки профиля печати и конфигурации слайсера в значительной степени влияют на качество готового изделия. Успешное прототипирование кулачка ткацкой машины подтверждает экономический эффект, заключающийся в снижении себестоимости и затрат времени на производство детали без потери ее точности. По результатам исследования можно сделать вывод о пер-

спективности интеграции 3D-печати и цифровых двойников в технологический процесс создания элементов оборудования текстильного машиностроения с последующим переходом к концепции Индустрии 4.0. Современные инженерные разработки все чаще применяют цифровые двойники для оптимизации процессов проектирования, тестирования и производства новых конструкторских решений, которые могут быть дорогостоящими в условиях традиционной разработки, создания и проверки. Данный процесс позволяет уменьшить затраты на физическое прототипирование и получить высокоточные объемные модели, которые обладают реальными параметрами и свойствами создаваемого изделия. Статья посвящена созданию цифровых моделей с помощью CAD/CAE-систем для применения к отдельным компонентам машин и агрегатов легкой и текстильной промышленности.

The article explores the possibility of using digital modeling and additive technologies in mechanical engineering, in particular for machines and aggregates of the textile industry, using the example of developing a cam for the gaping mechanism of looms. An analysis of the limitations of materials that are traditionally used in additive manufacturing is presented, as well as a primary search for the characteristics of innovative materials is performed and the possibilities of their use as a filler to enhance the physical and mechanical properties of products are determined. Under the conditions of sanctions restrictions, it is difficult to supply spare parts for modern technological equipment, therefore, the issues of manufacturing individual elements of the machine structure by the operator in single copies or small series are currently important and in demand. During the design, special attention is paid to the domestic software – KOMPAS-3D which makes it possible to design parametric models. The methodology includes the process of developing a digital twin of the required product from the stage of technical specification analysis to the process of 3D modeling and preparing the model for production using the FDM method. The results of the study show that the settings of the printing profile and the configuration of the slicer significantly affect the quality of the finished product. The successful prototyping of the cam of the weaving machine confirms the economic effect, which consists in reducing the cost and time spent on production without losing the accuracy of the part. Based on the results of the study, it can be concluded that the integration of 3D printing and digital twins into the technological process of creating elements of textile engineering equipment with the subsequent transition to the concept of Industry 4.0 is promising. Modern engineering developments are increasingly using digital twins to optimize the processes of designing, testing and manufacturing new design solutions, which can be expensive in the context of traditional development, creation and verification, this process allows reducing the cost of physical prototyping and obtaining high-precision volumetric models that have real parameters and properties of the product being created. This article is devoted to the creation of digital models using CAD/CAE systems for application to individual components of machines and aggregates in the light and textile industries.

Ключевые слова: кулачок, ткацкая машина, аддитивные технологии, 3D-принтер, машины и агрегаты, FDM, 3D-печать, технологический процесс, программное обеспечение.

Keywords: cam, loom, additive technologies, 3D printer, machines and units, FDM, 3D printing, technological process, software.

Введение

Современное текстильное машиностроение охватывает широкий круг оборудования, например, прядильные машины, ткацкие станки, красильно-отделочное оборудование [1]. Все перечисленные виды машин и агрегатов нуждаются в высокоэффективных, точных и долговечных деталях и узлах. Перспективным направлением для изготовления компонентов машин и агрегатов ткацкого производства является 3D-печать.

Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 05.11.2020 г. №2869-р «Об утверждении Стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года» аддитивные технологии являются частью данной программы [2].

Наиболее популярные и распространенные материалы, применяемые в аддитивном производстве, не обладают требуемыми для оборудования текстильной промышленности физико-механическими характеристиками, обеспечивающими надежность и долговечность деталей, что ограничивает возможность изготовления большинства ответственных деталей, но это можно изменить применением дополнительного наполнителя в основной материал для получения новых образцов композитов, улучшающих свойства.

Технология 3D-печати позволяет использовать и различные композиты, а их сочетание обеспечивает создание изделий с пространственным армированием по заданным траекториям. Для улучшения физико-механических свойств печати используется полимерный композит, армированный непрерывным углеродным волокном [3]. Армированные углеродные материалы или полимеры со стекловолокном сочетают высокую механическую прочность с малым весом. Целью армирования является повышение прочности и жесткости деталей, которые обладают низкой прочностью между слоями. Это особенно важно для подвижных элементов текстильных машин, например, направляющих, кареток или роликов. Легкие детали снижают инерцию.

Армирование может осуществляться несколькими методами: пропиткой сухого армирующего волокна, например углеродного или стеклянного, непосредственно в процессе 3D-печати жидким связующим веществом – эпоксидными системами или высокоэффективными фотополимерами. Также широко распространен метод, который основан на использовании заранее пропитанного связующим веществом материала. Новыми решениями в аддитивном производстве является метод одновременной подачи связующего и термопластичного препрега для формирования готового изделия с последующим его нагревом лазером и уплотнением прижимным роликом [4].

Сочетание 3D-печати и композитов дает возможность получать полный контроль над расположением волокон во время процесса печати, что позволяет располагать 100% волокон в соответствии с требуемыми условиями эксплуатации изделия [5].

Для изготовления компонентов машин и агрегатов может использоваться и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), обладающий приемлемой прочностью, низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью, устойчивостью к химическим и другим агрессивным средам [6]. Такой материал уже применяется в машиностроении для создания узлов трения машин и механизмов, а также для изготовления медицинских ортопедических имплантатов.

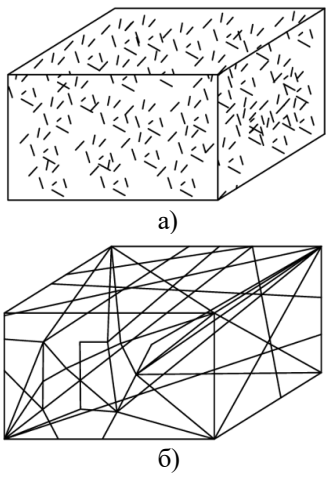


Рис. 1

Существует несколько видов композитов, различаемых по свойствам, с короткими (рис. 1, а) и непрерывными волокнами (рис. 1, б) [7]. Композиты с короткими

волокнами представляют собой филаменты с вкраплением микроволокон, которые имеют длину менее 1 мм и располагаются случайно. По сравнению с чистым полимером короткие волокна способны увеличить прочность и жесткость полученной многокомпонентной массы минимум на 20%, но свойства остаются изотропными. Композиты с непрерывными волокнами получаются в процессе укладывания в полимерную матрицу непрерывной углеродной нити, стекловолокна или кевлара. Данный материал является наиболее перспективным для изготовления высоконагруженных кулачков и других аналогичных деталей.

Использование различных композитов, входящих в основу СВМПЭ, значительно отражается на механических свойствах материалов, основные виды которых представлены в табл. 1 [7].

Таблица 1

Компоненты	Плотность ρ, г/см^3	Твердость по Шору D	Модуль упругости E, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Предел прочности $\sigma_т$, МПа	Удлинение, %
СВМПЭ	0,934	57,7±0,6	711±40	21,6±0,6	42,9±3,1	485±28
СВМПЭ + РСВ	1,001	58,0±0,5	957±82	23,7±1,5	24,9±1,3	198±23
СВМПЭ + РСВ (отожженные)	0,999	58,8±0,5	1038±17	22,8±1,2	34,2±0,6	363±22
СВМПЭ + РСВ (аппрет – KH550)	1,000	61,4±0,5	1463±51	40±3,0	33,9±3,7	263±32
СВМПЭ + РСВ (аппрет – «Пента-1006»)	1,001	60,2±0,5	1483±51	28,4±0,9	37,7±2,5	337±45
СВМПЭ + РСВ (аппрет – ONS)	1,004	61,1±0,4	1543±99	28,1±1,5	38,5±1,3	337±32
Массовая доля РСВ – 10%						

Использование полимерных композитов, армированных непрерывными или короткими волокнами, представляет собой перспективное направление для повышения механических характеристик изделий, изготовленных методом FDM-печати.

Для расширения диапазона внедрения армированных термопластов в машиностроении необходимо обеспечить оснащение предприятий специализированным оборудованием, которое позволит осуществлять непрерывную подачу и укладку различных филаментов. Самыми популярными технологиями в серийных 3D-принтерах на данный момент являются непрерывное изготовление нити (Continuous Filament Fabrication – CFF) и коэкструзия композитной нити.

На рынке уже имеется оборудование, способное осуществлять коэкструзию термопастичных полимеров и углеродных волокон, – Raise 3D E2CF и Creality K1C. Использование данного специализированного оборудования обеспечивает пространственное армирование изделий, однако в настоящее время на рынке 3D-печати его не хватает. Такая ситуация возникла в результате наложенных на российские предприятия санкций, многим иностранным компаниям пришлось временно уйти с российского рынка и прекратить поставки [8].

Продолжающееся развитие цифровых технологий в промышленности существенно меняет производственные процессы. Связанные с четвертой промышленной революцией технологии, такие как промышленный интернет и аддитивное производство, оказывают глобальное влияние на технологический процесс на современных инновационных предприятиях отрасли [9].

К одной из таких технологий относится технология CAD/CAE-моделирования. На сегодняшний день на рынке существует

множество программ, которые могут использоваться для создания чертежей и виртуального моделирования [10]. К ним относятся: 3DMAX, Blender, AutoCAD, SolidWorks и Компас-3D, преимуществом последнего программного обеспечения является поддержка многочисленных форматов обмена данными, например, STEP, STL, что делает интеграцию ПО с другими системами более удобной [11].

Программное обеспечение Компас-3D активно применяется на промышленных машиностроительных предприятиях для инженерных расчетов и имеет ряд дополнительных функций и модулей, например, параметрическое моделирование изделий, гибкие средства для работы со сложной геометрией, совместимость с другими инструментами и приверженность российским стандартам. Функция настройки параметров моделей позволяет оперативно адаптировать рабочее пространство под изменяющиеся требования.

Целью данной работы является создание цифрового двойника кулачка для зевообразовательного механизма ткацкой машины, изначально созданного традиционным методом. Деталь является элементом кулачкового механизма, обеспечивающего формирование зева между нитями основы, через который проходит уточная нить при создании ткани [12]. Корректная работа всей системы требуется для обеспечения качества производимого тканого полотна, а также для избежания сбоев работы машины [13].

Кулачки различаются по форме и габаритным параметрам, их профиль рассчитывается под конкретный используемый в машине толкатель. Они могут быть использованы в различных типах механизмов, например, в возвратно-поступательных, качающихся и вращающихся парах.

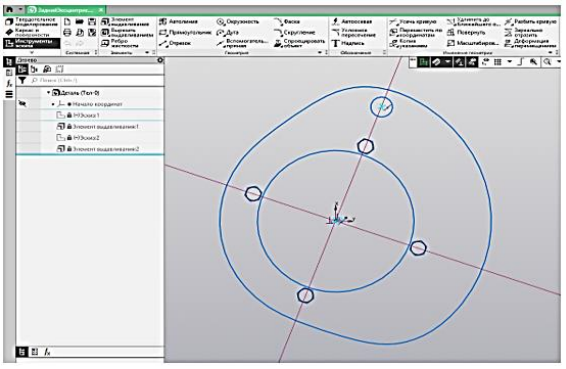
Основным преимуществом кулачковых механизмов является возможность воспроизведения произвольного закона движения исполнительного механизма, а также простота всей конструкции. Однако они имеют свои недостатки, например, высокую стоимость, которая связана с традиционным способом изготовления, требующим значительной доли механической обработки разрабатываемого изделия с высокой точностью и обязательное наличие парка металлорежущих станков с ЧПУ.

Чаще всего для производства кулачка используются высокопрочные материалы, такие как сталь, чугун или другие сплавы, которые также обладают износостойкостью и устойчивостью к коррозии. Заготовки кулачка обычно обрабатываются на современных станках с числовым программным управлением (ЧПУ) [14].

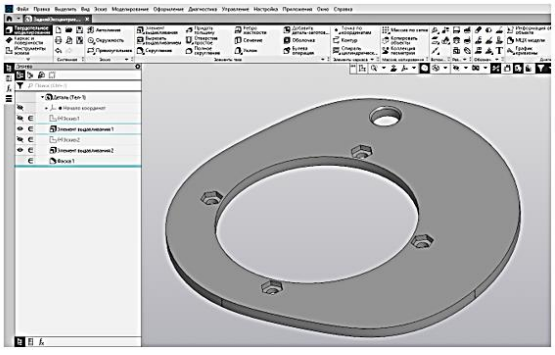
Повышение прочности и твердости поверхности кулачка осуществляется с помощью термической обработки – закалки, отпуска или нормализации. После термической обработки изделие проходит шлифование и полировку, что обеспечивает требуемую точность и необходимые значения шероховатости.

Методы

Основными этапами разработки цифровых двойников в Компас-3D являются сбор исходных данных о реальном объекте, создание цифрового 2D-эскиза изделия, выдавливание и создание объемной модели, детализация и подготовка к производству [15].



а)



б)

Рис. 2

На первом этапе осуществляется сбор технических чертежей, документации и рабочих параметров детали, которая подлежит изготовлению [16]. Числовые значения профиля кулачка представляют собой замкнутый контур с диапазоном угла от 0 до 360°, а построение и расчет ведется с точностью 1°. По полученным расчетным значениям, описывающим профиль кулачка, создается эскиз, отражающий основные геометрические параметры разрабатываемого изделия (рис. 2, а).

К созданному двухмерному контуру применяется операция «Выдавливание», которая позволяет преобразовать 2D-эскиз в объемный 3D-объект.

По завершении формирования основной конфигурации детали производится детальная ее доработка, включающая в себя создание мелких деталей и элементов, таких как отверстия, фаски, и прочие конструктивные особенности изделия (рис. 2, б).

Завершающим этапом является экспорт модели и преобразование в требуемый машиночитаемый формат для дальнейшего использования в производственных процессах. В данном случае планируется изготовление кулачка с применением 3D-принтера, для которого необходим STL-формат, используемый в настоящее время в большинстве программ для трехмерного моделирования [17].

Для изготовления детали выбрана технология гибридной FDM-печати, которая сочетает одновременное или последовательное использование нескольких материалов с разными свойствами.

При использовании двух и более материалов технологический процесс состоит из нескольких этапов: разделение цифрового двойника на разные зоны, работа в слайсере по настройке параметров подачи для каждого из материалов, обеспечение адгезии слоев [18…20].

Созданная объемная модель сохраняется в формате, необходимом для дальнейшей работы в слайсере. Слайсер (англ. *Slice* – срез) – это специальная компьютерная программа, которая преобразует виртуальную 3D-модель объекта в G-код, необходимый для управления процессом печати [21, 22]. В слайсере происходит настройка основных параметров печати: скорости печати, плотности заполнения, используемого материала, температуры экструдера, стола и т. д. [23].

Результаты и обсуждения

С учетом всех перечисленных особенностей и рекомендаций была разработана и произведена функциональная модель кулачка для зевообразовательного механизма ткацкой машины.

Определено, что скорость печати влияет на качество нанесения материала и его адгезию. Данная характеристика подбирается в зависимости от технических характеристик используемого оборудования и свойств применяемого материала. Установлено, что неправильно подобранные значения скорости могут не только привести к браку самого изделия, но и вывести из строя 3D-принтер.

В зависимости от используемого материала, а также количества и качества дополнительных присадок (филаментов) меняются прочностные характеристики произведенной детали. Для изготовления изделий, в частности деталей устройств, чаще всего используют термопластики в виде прутков, например ABS (акрилонитрилбутадиенстирол) [24]. ABS является термопластичным полимером, состоящим из акрилонитрита, бутадиена и стирола. Данный вид материала обладает высокой прочностью и жесткостью, а также устойчивостью к ударным нагрузкам и критическому износу. Машинная рабочая температура варьируется в районе 80…90°C. Подходит для печати объектов, которые будут подвергаться воздействию высоких температур, устойчив к большинству видов химических веществ. Акрилонитрилбутадиенстирол не биоразлагаемый, но перерабатываемый, при печати имеет специфический запах. Данный материал обладает худшей адгезией по сравнению с PLA-пластиком, что осложняет его использование.

Если сравнивать материалы, то надо отметить, что полиактидная кислота (PLA) содержит кукурузный крахмал или сахарный тростник, состоящий из молекул молочной кислоты. Материал обладает средними значениями прочности и возможной хрупкостью. Рабочая температура пластика в районе +60°C, и он не подходит для пе-

чати объектов, которые будут подвергаться воздействию высоких температур. Также PLA менее устойчив к химическим воздействиям, но биоразлагаемый и компостируемый, а также не имеет запаха при печати [25].

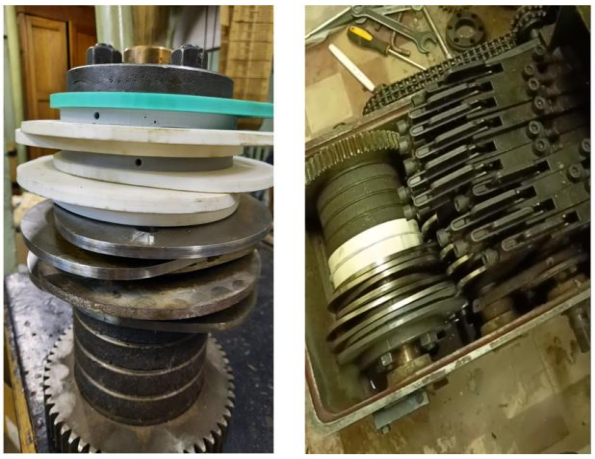
Плотность заполнения модели оказывает влияние на конечное изделие. Высокая степень заполнения увеличивает прочность и массу. Низкая плотность подходит лишь для тех элементов, которые не подвергаются значительным нагрузкам. Важным фактором является также термостойкость: при высокой плотности заполнения меньшее количество пустот позволяет лучше удерживать тепло, что актуально для теплоизоляционных свойств.

Важным компонентом получения качественного образца являются условия хранения используемого материала. В соответствии с рекомендациями производителя он должен храниться в сухом месте в герметичных контейнерах и в местах, исключающих длительное воздействие УФ-излучения. Кроме этого, необходимо соблюдать специальный температурный режим – для большинства видов пластика это положительный диапазон температур t в интервале 15…25°C.

Разработанная функциональная модель кулачка для зевообразовательного механизма ткацкой машины представлена на рис. 3.

Рис. 3

После изготовления деталь кулачка (рис. 4, а) и проставочное кольцо (рис. 4, б) были установлены в ткацкую машину на свои посадочные места. Проверка механизма на работоспособность показала, что произведенный кулачок отвечает всем требованиям и может использоваться в конструкции агрегата.



а) б)

Рис. 4

ВЫВОДЫ

Использование Компас-3D при создании цифровых двойников открывает новые возможности для ускорения проектирования и улучшения его точности. Пример разработки и тестирования кулачка зевообразовательного механизма демонстрирует, что 3D-моделирование и аддитивные технологии могут быть применены для решения сложных инженерных задач. Внедрение таких подходов способствует повышению эффективности производства и сокращению временных затрат на подготовку продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Атакишиев М.М.* Основы машиностроения в текстильной промышленности // Символ науки: международный научный журнал. 2025. № 3-2. С. 39…40. – EDN NIMOOO.

2. *Саночкина Ю.В.* Методы управления инновационным развитием отрасли. СПб.: Петрополис 2021. 162 с. – ISBN 978-5-9676-1371-5. – EDN BNHMBZ.

3. *Денискина Г.Ю.* Оптимизация выбора схемы 3D-печати функциональных объектов из композиционных материалов // Моделирование и анализ данных. 2023. Т. 13, № 2. С. 7…35. – DOI 10.17759/mda.2023130201. – EDN BEFSFG.

4. *Торубаров И.С., Дроботов А.В., Плотников А.Л., Гущин И.А.* Развитие технологии 3D печати с армированием непрерывным волокном // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 8(255). С. 81…86. – DOI 10.35211/1990-5297-2021-8-255-81-86. – EDN ZPIGFL.

5. *Денискина Г.Ю.* CAD/CAM/CAE-система для изготовления конструкций из волокнистых композиционных материалов методом 3D-печати // Труды МАИ. 2022. № 126. С. 1…27. – DOI 10.34759/trd-2022-126-21. – EDN LBGNMV.

6. *Васильев А.П., Данилова С.Н., Дьяконов А.А., Охлопкова А.А.* Триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ и термообработанного ПТФЭ // Полимерные композиты и трибология: тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2022. С. 127. – EDN QPBVRY.

7. *Алексенко В.О., Буслович Д.Г., Хуан Ц.* Механические и триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ с микронаполнителями // Наука. Технологии. Инновации: сб-к науч. тр. В 10 ч. Ч. 3. Новосибирск: НГТУ, 2017. С. 113…117. – EDN YTACYI.

8. *Яблокова Е.А., Канатов А.В., Кулаков А.А.* Перспективы развития текстильного оборудования и аддитивных технологий в легкой промышленности на примере 3D-принтера «паук» // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности. Т. 6. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2023. С. 235…238. – EDN NCNVMV.

9. *Лола И.С., Бакеев М.Б.* Цифровая трансформация в отраслях обрабатывающей промышленности России: результаты конъюнктурных обследований // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2019. Т. 35, № 4. С. 628…657. – DOI 10.21638/spbu05.2019.407. – EDN FPYRAM.

10. *Каршакова Л.Б., Кушниров Д.К., Груздева М.А., Захаркина С.В.* Цифровое проектирование аксессуаров костюма средствами современных трехмерных технологий // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 5(413). С. 253…258. – DOI 10.47367/0021-3497_2024_5_253. – EDN UZSXOR.

11. *Мареев А.С., Вервекин В.Г.* Компьютерное 3D-моделирование, сложности при печати 3D-моделей и полученные результаты // Информационно-коммуникационные технологии в педагогическом образовании. 2016. № 9(47). С. 53…58. – EDN YSRSBV.

12. *Коколоева У.У., Садиева А.Э.* Особенности кинематического исследования кулачкового механизма со сложным толкателем // Основы проектирования машин / под ред. Л.Т. Дворникова и И.А. Жукова. Новокузнецк: СибГИУ, 2015. С. 41…46. – EDN UXSLHF.

13. *Гудков А.А., Канатов А.В, Журавлева О.С.* Особенности компьютерного проектирования конструктивных элементов зевообразовательного механизма // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 470…474. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-4-470-471. – EDN AARAGC.

14. *Федькин Н.С., Канатов А.В.* Исследование особенностей работы настольных фрезерных станков с ЧПУ и цифровых технологий для создания деталей простого и сложного контура // Матер. докл. 56-й Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов. В 2 т. Т. 2. Витебск: ВГТУ, 2023. С. 42…45. – EDN HGUSXM.

15. *Болотеин А.Н.* Автоматизированное проектирование кулачковых механизмов с использованием API Компас 3D // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2022. № 13. С. 112…116. – DOI 10.26160/2309-8864-2022-13-112-116. – EDN DXWXWF.

16. *Сторожилов М.А., Рябцев А.С., Тришина Т.В.* Определение минимального радиуса кулачковых механизмов // Инновационные технологии и технические средства для АПК. Воронеж: ВГАУ им. Петра I, 2024. С. 402…406. – EDN RKGRRA.

17. *Щеголев А.В., Сердюк А.И., Сергеев А.И.* Проблема передачи геометрической информации через STL-формат // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн. Тамбов: ТГТУ, 2015. С. 47…51. – EDN TUOJPR.

18. *Костяков А.Е.* Анализ применения различных типов 3D-принтеров в машиностроении // Интерактивная наука. 2023. № 8(84). С. 7…13. – DOI 10.21661/r-560722. – EDN MCTIGU.

19. *Романов П.С., Янковский Д.В.* Быстрое прототипирование и 3D-печать в машиностроении // Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона. 2014. № 2(5). С. 85…89. – EDN TLAPLX.

20. *Paul N.* Autodesk Maya 2013 Essentials – Hoboken, 2012. P. 6…25. – ISBN 9781118226377.

21. *Лисяк В. В.* Обзор слайсеров для 3D-печати // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 3 (227). С. 60…74. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-60-74. – EDN WKCEQR.

22. *Попов С.Ю., Зеленина А.Н., Токарева Н.М.* Программное обеспечение подготовки 3D-моделей к 3D-печати // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2019. № 2(29). С. 33…39. – EDN SQVRZQ.

23. *Митин В.Ю.* Обзор оборудования, программного обеспечения, возможностей и этапов трехмерной печати // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2018. – № 2(41). С. 67…74. – DOI 10.17072/1993-0550-2018-2-67-74. – EDN XUOIQH.

24.*Chen L., He Y., Yang Y., Niu S., Ren H.* The research status and development trend of additive manufacturing technology // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. V. 89. № 9-12. P. 3651…3660.

25. *Dhinesh S.K., Arun P.S., Senthil K.K.L., Megalingam A.* Study on flexural and tensile behavior of PLA, ABS and PLA-ABS materials // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. P. 1175…1180. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.03.546. – EDN XEMNPC.

R E F E R E N C E S

1. *Atakishiyev M.M.* Fundamentals of Mechanical Engineering in the Textile Industry // Symbol of Science: International Scientific Journal. 2025. No. 3-2. Pp. 39…40. – EDN NIMOOO.

2. *Sanockina Yu.V.* Methods of Managing Innovative Development of the Industry. St. Petersburg: Petropolis, 2021. 162 p. – ISBN 978-5-9676-1371-5. – EDN BNHMBZ.

3. *Deniskina G. Y.* Optimization of the choice of a 3D printing scheme for functional objects from composite materials // Modeling and data analysis. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 7...35. – DOI 10.17759/mda. 2023130201. – EDN BEFSFG.

4. *Torubarov I.S., Drobotov A.V., Plotnikov A.L., Guschin I.A.* Development of 3D printing technology with continuous fiber printing // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. № 8(255). P. 81...86. – DOI 10.35211/1990-5297-2021-8-255-81-86. – EDN ZPIGFL.

5. *Deniskina G.Y.* CAD/CAM/CAE-a system for manufacturing structures from fibrous composite materials by 3D printing // Proceedings of MAI. 2022. No. 126. P. 1...27. – DOI 10.34759/trd-2022-126-21. – EDN LBGNMV.

6. *Vasiliev A.P., Danilova S.N., Dyakonov A.A., Okhlopkova A.A.* Tribotechnical properties of composites based on UHMWPE and heat-treated PTFE // Polymer composites and tribology: Abstracts of the international scientific and technical conference. Gomel: IMS NAS of Belarus, 2022. P. 127. – EDN QPBVRY.

7. *Aleksenko V.O., Buslovich D.G., Huang Ts.* Mechanical and tribotechnical properties of UHMWPE-based composites with microfillers // Science. Technologies. Innovations: collection of scientific papers: in 10 parts. Part 3. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2017. P. 113...117. EDN YTACYI.

8. *Yablokova E.A., Kanatov, A. V., Kulakov, A. A.* Prospects for the Development of Textile Equipment and Additive Technologies in the Light Industry: The Case of the "pauk" 3D Printer // Innovative Development of Engineering and Technology in Industry. Moscow: The Kosygin State University of Russia, 2023. P. 235…238. – EDN NCNVMV.

9. *Lola I.S., Bakeev M. B.* Digital Transformation in the Manufacturing Industries of Russia: an Analysis of the Business Tendencies Observations Results. St Petersburg University Journal of Economic Studies. 2019. Vol. 35, iss. 4, P. 628…657. – DOI 10.21638/spbu05. 2019.407. – EDN FPYRAM.

10. *Karshakova L.B., Kushnirov D.K., Gruzdeva M.A., Zakharkina S.V.* Digital design of costume accessories using modern three-dimensional technologies // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. № 5(413). P. 253…258. – DOI 10.47367/0021-3497_2024_5_253. – EDN UZSXOR.

11. *Mareev A.S., Vervekin V.G.* Computer 3D modeling, difficulties in printing 3D models and the results obtained // Information and communication technologies in pedagogical education. 2016. № 9(47). P. 53...58. – EDN YSRSBV.

12. *Kokoloeva U.U., Sadieva A.E.* Features of the kinetic study of a cam mechanism with a complex pusher // Fundamentals of machine design / edited by L.T. Dvornikov and I.A. Zhukov. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2015. pp. 41...46. – EDN UXSLHF.

13. *Gudkov A.A., Kanatov A.V., Zhuravleva O.S.* The features of computer-aided design of the shedding mechanism structural elements // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2024. № 4. P. 470…474. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-4-470-471. – EDN AARAGC.

14. *Fedkin N. S., Kanatov, A. V.* Study of the Operational Features of Desktop CNC Milling Machines and Digital Technologies for Creating Simple and Complex Contour Parts // Proceedings of the 56th International Scientific and Technical Conference of Teachers and Students. In 2 volumes, vol. 2. Vitebsk: Vitebsk State Technological University, 2023. P. 42…45. – EDN HGUSXM.

15. *Bolotein A.N.* Automated design of cam mechanisms using the Compass 3D API // Automated design in mechanical engineering. 2022. No. 13. P. 112...116. – DOI 10.26160/2309-8864-2022-13-112-116. – EDN DXWXWF.

16. *Storozhilov M.A., Ryabtsev A.S., Trishina T.V.* Determination of the minimum radius of cam mechanisms // Innovative technologies and technical means for agriculture. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great, 2024. P. 402...406. – EDN RKGRRA.

17. *Shchegolev A.V., Serdyuk A.I., Sergeev A.I.* The problem of transferring geometric information through the STL format // Virtual modeling, prototyping and industrial design. Tambov: Tambov State Technical University, 2015. P. 47...51. – EDN TUOJPR.

18. *Kostyakov A.E.* Analysis of the use of various types of 3D printers in mechanical engineering // Interactive science. 2023. № 8(84). P. 7…13. – DOI 10.21661/r-560722. – EDN MCTIGU.

19. *Romanov P.S., Yankovsky D.V.* Rapid prototyping and 3D printing in mechanical engineering // Kompleksnye problemy razvitiâ nauki, obrazovaniâ i èkonomiki regiona. 2014. № 2(5). P. 85…89. – EDN TLAPLX.

20. *Paul N.* Autodesk Maya 2013 Essentials – Hoboken, 2012. P. 6…25. – ISBN 9781118226377.

21. *Lisyak V.V.* Overview of 3D printing slicers // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2022. № 3 (227). P. 60…74. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-60-74. – EDN WKCEQR.

22. *Popov S.Yu., Zelenina A.N., Tokareva N.M.* Software for preparing 3D models for 3D printing // Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies. 2019. № 2(29). P. 33...39. – EDN SQVRZQ.

23. *Mitin V.Y.* Overview of hardware, software, capabilities and stages of three-dimensional printing // Bulletin of Perm University. The Ma-theme. Mechanics. Computer science. 2018. № 2(41). P. 67...74. – DOI 10.17072/1993-0550-2018-2-67-74. – EDN XUOIQH.

24. *Chen L., He Y., Yang Y., Niu S., Ren H.* The research status and development trend of additive manufacturing technology // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. V. 89. № 9-12. P. 3651…3660.

25. *Dhinesh S.K., Arun P.S., Senthil K.K.L., Megalingam A.* Study on flexural and tensile behavior of PLA, ABS and PLA-ABS materials // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. P. 1175…1180. – DOI 10.1016/j.matpr.2020.03.546. – EDN XEMNPC.

Рекомендована кафедрой технологических машин и мехатронных систем РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 22.05.25.