

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

ISSN:2618-8201

№ 2 (42)
2026

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

№ 2(42)

2026

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2026

*Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»*

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2026 г. №2 (42)

Сборник научных трудов. Издание основано в 2016 году. Периодичность - 4 номера в год.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

*Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
и размещается в научной электронной библиотеке (Elibrary.ru)*

*Свидетельство о регистрации в национальном центре ISSN и присвоение международного стандартного номера
серийного издания (International Standard Serial Number) 2618-8201 от 06.07.2018 г.*

В сборнике научных трудов публикуются статьи по следующим научным специальностям:

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

2.5.6. Технология машиностроения.

2.6.17. Материаловедение.

2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта.

4.3.3. Пищевые системы.

Состав редколлегии:

Главный редактор – Братан С.М., д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО СевГУ, г. Севастополь.

Заместитель главного редактора – Покинтелица Н.И., д.т.н., профессор ФГАОУ ВО СевГУ, г. Севастополь.

Научный редактор – Харченко А.О., к.т.н., профессор, ФГАОУ ВО СевГУ, г. Севастополь.

Ответственный секретарь – Вожжов А.А., к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО СевГУ, г. Севастополь.

Технический секретарь – Стадник Т.В., к.т.н., ФГАОУ ВО СевГУ, г. Севастополь.

Члены редакционной коллегии:

– Абдулгасис У.А., д.т.н., профессор, ГБОУ ВО РК КИПУ имени Февзи Якубова, г. Симферополь;

– Бабицкий Л.Ф., д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО КФУ им. В.И. Вернадского, г. Симферополь;

– Бохонский А.И. д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО СевГУ, г. Севастополь;

– Дуюн Т.А., д.т.н., профессор, БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород;

– Козлов А.М., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО ЛГТУ, г. Липецк;

– Куликов Д.А., к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ», г. Москва;

– Лебедев В.А., к.т.н., профессор, ФГБОУ ВО ДГТУ, г. Ростов-на-Дону;

– Леонов С.Л., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО АГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул;

– Лобанов Д.В., д.т.н., доцент, ФГБОУ ВО ЧГУ им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары;

– Михайлов А.Н., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО ДонНТУ, г. Донецк;

– Носенко В.А., д.т.н., профессор, ВПИ (филиал) ВолгГТУ, г. Волжский;

– Обжерин Ю.Е. д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО СевГУ, г. Севастополь;

– Соколов С.А., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО ДонНТУ, г. Донецк;

– Суслов А.Г., д.т.н., профессор ФГБОУ ВО БГТУ, г. Брянск;

– Федонин О.Н., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО БГТУ, г. Брянск;

– Федянин Е.А., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО ВГТУ, г. Волгоград;

– Юшина Ю.К., д.т.н., профессор, ФГБНУ ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, г. Москва;

– Якубов Ч.Ф., к.т.н., доцент, ГБОУ ВО РК КИПУ имени Февзи Якубова, г. Симферополь;

– Ярошенко А.А., д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО СевГУ, г. Севастополь.

Мнение авторов статей, представленных в сборнике научных трудов, может не совпадать с мнением редакции.

Все статьи проходят обязательное рецензирование и проверку сервисом «Антиплагиат».

Издание осуществлено на средства авторов и распространяется бесплатно.

Дата выхода в свет: 27.05.2026 г.

Тираж: 25 экз.

Адрес редакции: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 222, <http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>;

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150; e-mail: vst@sevsu.ru

Адрес издателей: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября, д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация; ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация.

Адрес типографии: г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Крыжановская Л.В., Рыжков А.И. Совершенствование экструдера МК8.....	4
Харченко А.О., Тищенко И.В., Леонова Е.А., Владецкая Е.А. Прогрессивное оборудование для получения новых конструкций мелкогабаритных метчиков	12
Халилов С. Р. Разработка комплексной методики оценки влияния технологических факторов на качество лазерной резки листовой стали.....	21

РАЗДЕЛ II. АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Карташов Л.Е., Казак А.С. Экономически обоснованный подход к обучению студентов: замена физических панелей оператора на программные GUI-решения.....	26
--	----

РАЗДЕЛ III. ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Веляев Ю.О., Дерюгин С.В., Осокин А.Р., Графова А.Е., Покинтелица Н.И., Еременко В.Г. Изучение структурных изменений жирных кислот, происходящих при их термической обработке.....	39
Калашников М.С., Карлов А.Г. Критерии выбора и анализ применения упаковочного картона из соломы, тростника и грибного мицелия в пищевых производствах. Сравнение с традиционным гофрокартоном.....	51

РАЗДЕЛ IV. ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА.

Абдулгасис А. У., Абдулгасис У. А., Зийнединов Э. И. Пространственная модель контакта с дорогой неподвижного колеса автомобиля.....	68
---	----

РАЗДЕЛ V. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Гавриш В. М., Паничкин Т. А., Чайка Т. В., Гавриш О. П., Сидоров Д. Е. К вопросу учета каталитических свойств наночастиц при разработке новых реактопластов для аддитивной печати на примере модификации PETG наночастицами карбида вольфрама...	75
--	----

РАЗДЕЛ I. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 338:27:004

Совершенствование экструдера МК8

Любовь Владиславовна Крыжановская¹,

Александр Игоревич Рыжков², к.т.н.,

^{1,2} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹ shilenok.online@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3824-0691>

² nik.pokintelitsa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0277-9252>

Аннотация. Статья посвящена повышению стабильности подачи филамента в экструдерах боуденовского типа на примере широко распространённой модели МК8, используемой в большинстве бюджетных FDM-принтеров. Актуальность работы обусловлена тем, что качество послойного синтеза напрямую зависит от жёсткости и предсказуемости работы экструдера, а существующие программные методы компенсации (Linear Advance, Pressure Advance) не устраняют механические причины неустойчивости — микроперемещения, неравномерное контактное давление и паразитные колебания.

В ходе анализа конструкции стандартного экструдера МК8 выявлен ключевой недостаток: совмещение силовых и позиционирующих функций в крепёжных элементах узла прижимного рычага. В частности, крепление рычага длинным винтом М3×20 в короткое резьбовое отверстие корпуса двигателя (глубиной 4,5 мм) создаёт консольный эффект, снижающий жёсткость соединения и вызывающий неустойчивость прижима. На основе этого предложены конструкторские изменения: разделение функций путём введения прецизионных втулок (для оси рычага и оси прижимного ролика), обеспечивающих гладкое вращение и точное позиционирование, а также применение пружинных шайб для стопорения резьбовых соединений от вибраций. Дополнительно введена принимающая воронка для снижения риска застревания филамента при автоматической заправке. Для обоснования выбора прижимной пружины разработана математическая модель, учитывающая геометрические ограничения (внутренний диаметр не менее 5 мм, наружный — не более 9 мм) и требуемые усилия. Методом последовательного подбора определены оптимальные параметры пружины. Построена линейная характеристика пружины, подтверждающая её работоспособность в заданном диапазоне. Предложенные изменения устраняют совмещение функций в креплении, повышают жёсткость узла прижима и снижают паразитные колебания, что в совокупности с рассчитанными параметрами пружины обеспечивает стабильное контактное давление на филамент. Результаты могут быть использованы при модернизации существующего парка 3D-принтеров с экструдерами МК8 без их полной замены, а также в качестве основы для проектирования более совершенных узлов подачи в аддитивном производстве.

Ключевые слова: FDM печать, аддитивные технологии, FDM-печать, экструдер МК8, боуденовская подача, прижимной механизм, пружина сжатия, стабильность подачи филамента, математическое моделирование, 3D-печать.

Improvement of the mk8 extruder

Luibov V. Kryzhanovskay¹,

Aleksander I. Ryzhkov², PhD (Eng),

^{1,2} Sevastopol State University, Sevastopol, Russia)

¹ shilenok.online@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3824-0691>

² nik.pokintelitsa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0277-9252>

Abstract. This paper addresses the improvement of filament feed stability in Bowden-type extruders using the widely used MK8 model, found in most budget FDM printers, as an example. The relevance of the work stems from the fact that the quality of layer-by-layer synthesis directly depends on the rigidity and predictability of the extruder's operation, while existing software compensation methods (Linear Advance, Pressure Advance) do not eliminate the mechanical causes of instability — micro-displacements, uneven contact pressure, and parasitic oscillations.

An analysis of the standard MK8 extruder design revealed a key drawback: the combination of force and positioning functions in the fastening elements of the idler lever assembly. Specifically, attaching the lever with a long M3×20 screw into a short threaded hole in the motor housing (4.5 mm deep) creates a cantilever effect, reducing joint rigidity and causing clamping instability. Based on this finding, design modifications are proposed: separation of functions by introducing precision bushings (for the lever axis and the idler roller axis) to ensure smooth rotation and accurate positioning, as well as the use of spring washers to lock threaded connections against vibrations. Additionally, a filament receiving funnel is introduced to reduce the risk of filament jamming during automatic loading. To justify the choice of the clamping spring, a mathematical model was developed considering geometric constraints (inner diameter not less than 5 mm, outer diameter not more than 9 mm) and the required forces. The optimal spring parameters were determined by sequential selection. A linear spring characteristic was constructed, confirming its operability within the specified range. The proposed modifications eliminate the combination of functions in the fasteners, increase the rigidity of the clamping assembly, and reduce parasitic oscillations, which, together with the calculated spring parameters, ensures stable contact pressure on the filament. The results can be used for upgrading existing fleets of 3D printers with MK8 extruders without complete replacement, as well as a basis for designing more advanced feed assemblies in additive manufacturing.

Keywords: FDM printing, additive manufacturing, FDM-printing, MK8 extruder, Bowden feed, idler mechanism, compression spring, filament feed stability, mathematical modeling, 3D printing.

Введение. Процесс послойного синтеза детали по технологии FDM (Fused Deposition Modeling) по своей физической сути является информационным: расплавленной полимерной нитью «записывается» траектория движения рабочих органов, в первую очередь — печатающей головки с экструдером. Любые погрешности базирования и позиционирования, вызванные, в частности, вибрациями и нежелательными перемещениями элементов конструкции, непосредственно переносятся в формируемый слой, увеличивая шероховатость поверхности, снижая точность геометрии и ухудшая межслойную адгезию. Как показано в работах, посвящённых анализу динамики FDM-устройств, негативные вибрации рамы и отдельных компонентов, возникающие при движении по осям, являются одним из основных факторов, ухудшающих качество изготавливаемых моделей, причём их влияние усиливается с ростом скорости печати [1]. Применение методов входного формования сигнала (input shaping) позволяет снизить амплитуду резонансных колебаний и, как следствие, уменьшить геометрические отклонения контура детали примерно на 20 % без внесения изменений в аппаратную часть принтера [2].

Исследования влияния технологических режимов на точность изделий подтверждают, что увеличение скорости 3D-печати приводит к росту доверительного интервала размеров и, как следствие, к снижению качества точности готовой детали [3]. Стремление повысить производительность без потери качества обуславливает необходимость как внедрения алгоритмов компенсации динамики экструзии, так и совершенствования механической части экструдеров для обеспечения максимальной жёсткости и предсказуемости подачи. К числу таких алгоритмов относится, в частности, метод Linear Advance, эффективность которого подтверждена экспериментально и теоретически [4]. В то же время анализ существующих подходов к ускорению FDM-печати показывает, что программные методы способны лишь частично компенсировать недостатки механической системы, не устраняя их первопричину [5].

В конструкции 3D-принтеров, работающих по технологии FDM, применяются две основные схемы подачи филамента: прямая (Direct) и боуденовская (Bowden) [6]. В боуденовской схеме, широко используемой в массовых и DIY-принтерах, приводной механизм с шаговым двигателем размещается на неподвижной раме, а филамент подаётся к печатающей головке (хотэнду) через гибкую направляющую трубку (Bowden-трубку). Такое решение позволяет существенно снизить массу подвижной каретки, уменьшить инерционные нагрузки на оси и, теоретически, повысить скорость и точность позиционирования. Однако боуденовская схема имеет и ряд принципиальных ограничений: упругая среда, образуемая филаментом внутри трубки, создаёт задержки реакции на команды подачи и ретракта, а также

способствует демпфированию усилия прижима, что может приводить к нестабильности экструзии, особенно при работе с гибкими материалами [7, 8]. Кроме того, анализ трендов развития печатающих головок указывает на постоянный поиск решений, направленных на повышение эффективности подачи эластичных и низкотемпературных полимеров, что требует пересмотра конструкции традиционных узлов подачи [9].

Среди экструдеров боуденовского типа одно из самых широких распространений получил экструдер МК8 [10], что обусловлено его конструктивной простотой, универсальностью и низкой стоимостью. Он применяется в большинстве бюджетных 3D-принтеров (например, серий Creality Ender и CR-10). Несмотря на массовое использование, конструкция стандартного экструдера МК8 содержит ряд особенностей, которые приводят к возникновению микроперемещений элементов, неравномерному распределению контактных нагрузок и паразитным колебаниям. Как известно из уровня техники, в традиционных устройствах подачи филамента, где валы приводного и прижимного колёс жёстко закреплены в корпусе, расстояние между ними остаётся постоянным. Это приводит к тому, что из-за вариаций толщины филамента, его упругих свойств или износа колёс подача материала становится нестабильной, возникают проскальзывания и перебои в экструзии. При высокоскоростной печати, когда требования к стабильности подачи многократно возрастают, недостатки механической части становятся критическими, что подтверждается патентными решениями, направленными на создание экструдеров с увеличенной площадью контакта и замкнутыми системами управления.

Указанные явления в экструдере МК8 проявляются в виде повышенного акустического шума, снижения повторяемости процесса экструзии и, как следствие, ухудшения качества поверхности деталей. Наличие подобных дефектов особенно критично при печати тонкостенных моделей или использовании материалов с низкой жёсткостью. Алгоритмы компенсации давления (Pressure Advance), успешно применяемые для коррекции неравномерности потока при ускорениях и замедлениях печатающей головки, не способны полностью устранить последствия механических люфтов и нестабильности прижима, поскольку их действие основано на предположении о линейной зависимости деформации филамента от приложенной силы, что нарушается при наличии паразитных перемещений в узле подачи [4].

Таким образом, актуальной научно-технической задачей является совершенствование конструкции экструдера МК8, направленное на устранение паразитных перемещений в узле прижима филамента и обеспечение обоснованного, стабильного режима подачи материала. Решение этой задачи позволит повысить качество FDM-печати на широком парке эксплуатируемого оборудования без его кардинальной замены.

Цель работы – совершенствование узла прижима экструдера МК8 для повышения равномерности подачи филамента на основе анализа недостатков конструкции и поиска возможных технических решений, способствующих снижению паразитных перемещений и оптимизации усилия прижима.

Материалы и методы. Объектом исследования является экструдер МК8 боуденовского типа, широко применяемый в FDM-принтерах.

Анализ конструкции стандартного экструдера МК8. В стандартной конструкции экструдера МК8 (рисунок 1) узел прижима филамента выполнен на основе подвижного рычага (1), крепёжные элементы которого одновременно выполняют функции позиционирования осей (винт 2), размещения подшипника (винт 3) и передачи усилия прижима через пружину 8 (винты 6, 7 и 11). Данное конструктивное решение приводит к совмещению силовой и позиционирующей функций в одном элементе. Как отмечено в патенте [11], фиксированное

расстояние между ведущим и прижимным колёсами без возможности адаптации к изменениям толщины филамента или износу является одной из причин нестабильной подачи.

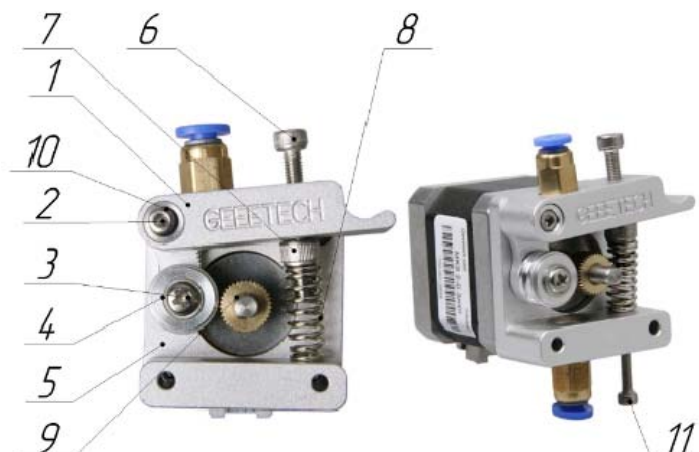


Рис. 1. Экструдер МК8. Внешний вид.

Рычаг прижима 1 крепится непосредственно к корпусу двигателя винтом 2 (М3×20). Малая глубина резьбового отверстия в корпусе двигателя (4,5 мм) при значительной длине винта (20 мм) создает консольный участок, что снижает жесткость соединения и способствует возникновению микроперемещений под действием знакопеременных нагрузок. Следствием этого являются неравномерное контактное давление на филамент, паразитные колебания, а также снижение стабильности подачи материала. Подобные эффекты характерны для систем с ременными передачами и конечной жёсткостью, где динамика привода описывается многомассовыми моделями с учётом упругих деформаций [12].

В известных технических решениях предпринимались попытки усовершенствовать конструкцию подающих механизмов. Например, в патенте [13] (и выданном на его основе патенте [14]) предложен набор деталей для сборки 3D-принтера, в котором перемещение по осям X, Y и Z осуществляется с помощью реечных передач, выполненных из единого материала для снижения накопления допусков. В другом патенте [15] описана печатающая головка с системой жидкостного охлаждения, расположенной между узлом экструзии и приводом, что обеспечивает поддержание заданного температурного режима и предотвращает пропуск шагов двигателя. Несмотря на прогрессивность этих решений, они ориентированы на новые конструкции принтеров и не могут быть напрямую применены для модернизации уже эксплуатируемого парка устройств с экструдерами МК8.

Предлагаемые конструкторские изменения.

На рисунке 2 показаны конструкторские изменения экструдера. Рычаг прижима 1 соединяется с основанием 5 за счет втулки 12, данное решение позволяет разделить крепежную и вращательную функции, а также повысить плавность подачи за счет повышения точности обработки и замены исходной винтовой поверхности крепежного элемента на гладкую поверхность втулки 12. Также установлена пружинная шайба 13, предотвращающая самопроизвольное отвинчивание гайки от вибраций (более подробно на рисунке 3). Из-за изменения расстояния от оси рычага прижима 1 до места приложения силы были пересчитаны параметры пружины 8.

В новой системе роль прижимного ролика 4 выполняет подшипник 34 ГОСТ 8338-75, являющийся полным аналогом исходного импортного подшипника U041304. Установка подшипника производится на втулку 14, что позволяет также повысить плавность подачи филамента за счет повышения точности обработки и замены исходной винтовой поверхности

крепежного элемента на гладкую поверхность втулки 14 (более подробно на рисунке 4). Также установлена пружинная шайба 13, предотвращающая самопроизвольное отвинчивание гайки от вибраций.

В конструкцию добавлена принимающая воронка 15 для филамента, с помощью которой можно минимизировать риск застревания материала в экструдере при автоматической заправке.

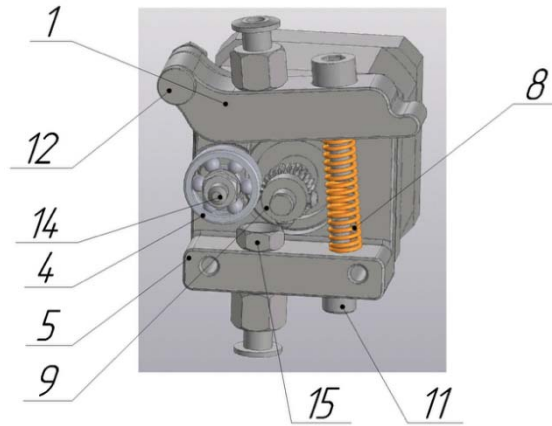


Рис. 2. Конструкторские изменения в МК8.

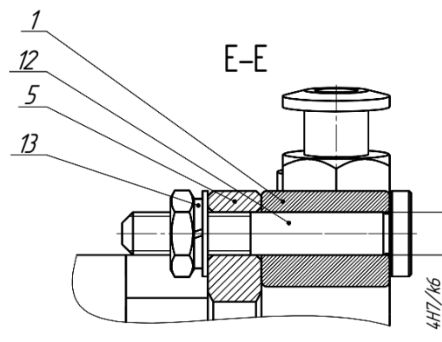


Рис. 3. Узел крепления прижимного рычага.

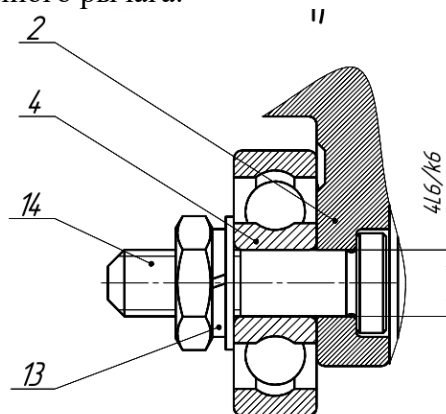


Рис. 4. Узел крепления прижимного ролика.

Моделирование работы прижимного механизма.

Для оценки работоспособности предложенных конструктивных изменений и обоснования выбора параметров прижимной пружины была разработана математическая модель системы. Расчёт пружины выполнен по методике, изложенной в классическом справочнике конструктора-машиностроителя [19]. Пружина предназначена для создания усилия прижима ролика к филаменту, при этом аддитивные технологии в целом и FDM в частности, как отмечено в пособии [20], требуют тщательного подбора технологических режимов для обеспечения точности и повторяемости изделий.

Пружина предназначена для создания усилия прижима ролика к филаменту, усилие предварительного поджатия $F_1 = 9,9$ Н при длине $L_1 = 25$ мм, рабочий ход до $L_2 = 18$ мм, габаритные ограничения ($D_{вн} \geq 5$ мм, $D_{нар} \leq 9$ мм).

Математическая модель пружины.

1. Уравнение характеристики пружины [5]:

$$F = C \cdot (L_0 - L), \quad (1)$$

где F – усилие пружины, Н; C – жесткость пружины, Н/мм; L_0 – свободная (ненагруженная) длина пружины, мм; L – длина пружины под нагрузкой, мм.

2. Жесткость пружины:

$$C = \frac{G \cdot d^4}{8D^3 \cdot n}, \quad (2)$$

где $G = 78,5$ ГПа – модуль сдвига для стали 65Г; d – диаметр проволоки, мм; D – средний диаметр пружины, мм; n – число рабочих витков.

3. Индекс пружины:

$$c = \frac{D}{d}. \quad (3)$$

Рекомендуемый диапазон: $4 \leq c \leq 10$.

4. Максимальное касательное напряжение:

$$\tau = \frac{8 \cdot F_{\max} \cdot D \cdot k}{\pi \cdot d^3} \leq [\tau], \quad (4)$$

где $k = \frac{4c-1}{4c-4} + 0,615$ – коэффициент формы, $[\tau] = 600$ МПа – предельно допускаемое напряжение для стали 65Г.

Алгоритм подбора параметров

Расчет выполняется методом последовательного подбора с проверкой условий:

1. Задание свободной длины L_0 из диапазона 30...40 мм.
2. Определение жесткости из начального условия:

$$C = \frac{F}{L_0 - L_1}.$$

3. Подбор диаметра проволоки d из стандартного ряда (0,8...2,0 мм).
4. Определение среднего диаметра $D = c \cdot d$ при различных значениях индекса c .
5. Проверка ограничений:
 - внутренний диаметр: $D - d \geq 5$ мм;
 - наружный диаметр: $D + d \leq 9$ мм;

- напряжение: $\tau \leq 600$ МПа;
- устойчивость: $\lambda \leq 5$.

6. Расчет числа витков: $n = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot C}$.

В результате автоматизированного подбора получены параметры пружины, указанные в таблице 1. Полученный график (рис. 5) иллюстрирует линейную зависимость усилия от деформации, соответствующую рассчитанной жесткости.

Таблица 1

Параметры пружины

Параметр		Значение
№	Наименование	
1.	Диаметр проволоки d, мм	1,2
2.	Средний диаметр D, мм	6,0
3.	Число рабочих витков n	5
4.	Свободная длина L ₀ , мм	30
5.	Жесткость C, Н/мм	1,98
6.	Усилие при L ₁ =25 мм, Н	9,9
7.	Усилие при L ₂ =18 мм, Н	23,8
8.	Максимальное напряжение τ , МПа	585
9.	Запас прочности	1,03

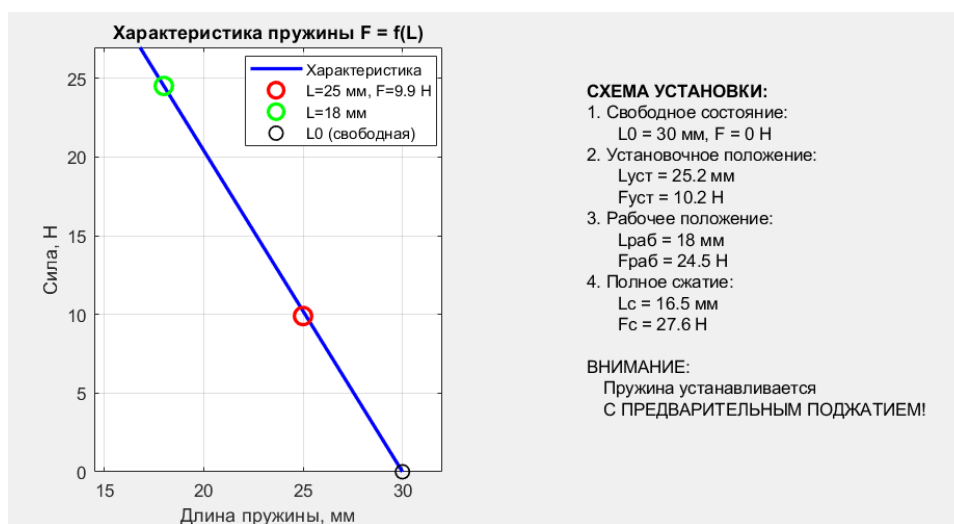


Рис. 5. График характеристики пружины.

Предложенные конструкторские изменения направлены на разделение силовых и позиционирующих функций в узле прижима экструдера МК8. Введение прецизионных втулок для оси рычага и оси прижимного ролика заменяет трение скольжения по резьбе на трение качения по гладкой поверхности, что снижает паразитные микроперемещения. Пружинные шайбы предотвращают самоотвинчивание от вибраций, характерных для FDM-принтеров при высоких скоростях печати. Рассчитанные параметры пружины обеспечивают требуемый диапазон усилий (9,9...23,8 Н) при соблюдении прочностных ограничений (максимальное напряжение 585 МПа при допуске 600 МПа). Запас прочности 1,03 достаточен для данного типа циклически нагружаемых элементов. Полученные результаты подтверждают работоспособность модернизированного узла прижима.

Заключение. 1. В результате анализа конструкции стандартного экструдера МК8 установлено, что основной причиной нестабильности подачи филамента является совмещение функций позиционирования и силового нагружения в крепежных элементах узла прижима, что приводит к микроперемещениям и снижению жесткости соединения.

2. Предложенная модернизация, основанная на разделении указанных функций путем введения прецизионных втулок и применения пружинных шайб, позволяет устранить паразитные колебания и повысить стабильность работы механизма.

3. На основе математического моделирования определены оптимальные параметры прижимной пружины (диаметр проволоки 1,2 мм, средний диаметр 6,0 мм, число рабочих витков 5, свободная длина 30 мм, жесткость 1,98 Н/мм), обеспечивающие требуемое усилие в рабочем диапазоне 9,9...23,8 Н при соблюдении прочностных ограничений.

Список литературы

1. Kaščák J. Multibody system simulation as a predictive tool for possible estimation of negative effects caused by vibrations of FDM device / J. Kaščák, M. Kočíško, L. Knapčíková, T. Coranič, J. Török // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1199. – Art. 012027. – DOI: 10.1088/1757-899X/1199/1/012027.
2. Lee Y.-W. Study on 3D Printer Vibration Control and Quality Improvement Using Input Shaping / Y.-W. Lee, M.-S. Jung, J.-K. Park // Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers. – 2026. – Vol. 25, No. 3. – P. 70–78.
3. Андрюшкин, А. Ю. Влияние скорости 3D-печати аддитивной установки по FDM-технологии на точность изделия / А. Ю. Андрюшкин, Е. Б. Буцикин, Ч. Ли // Аэрокосмическая техника и технологии. – 2023. – Т. 1, № 2. – С. 118-129.
4. Tronvoll S. A. Investigating pressure advance algorithms for filament-based melt extrusion additive manufacturing: theory, practice and simulations / S. A. Tronvoll, S. Popp, C. W. Elverum, T. Welo // Rapid Prototyping Journal. – 2019. – Vol. 25, No. 5. – P. 830–839. – DOI: 10.1108/RPJ-10-2018-0275.
5. Сазыкин, Д. Н. Анализ и разработка оптимального алгоритма для повышения скорости и эффективности FDM печати / Д. Н. Сазыкин // Системный администратор. – 2023. – № 3(244). – С. 78-82.
6. Кривчук, М. А. Устройство 3D-принтера / М. А. Кривчук // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 43. – С. 1094-1097.
7. Hoque M. M. Design and construction of a Bowden extruder for a FDM 3D printer uses 1.75mm filament / M. M. Hoque, M. H. Kabir, M. M. H. Jony // International Journal of Technical Research & Science. – 2018. – Vol. 3, Issue VIII. – Paper ID: IJTRS-V3-I8-010. – DOI: 10.30780/IJTRS.V3.I8.2018.010.

8. Wu P. Design, modeling and feedforward control of a hybrid extrusion system combining Bowden and direct drive extruders / P. Wu [et al.] // Additive Manufacturing. – 2024. – Vol. 67. – Art. 103267.
9. Калашникова, К. И. Выявление трендов развития печатающих головок для 3D-печати на основе патентного анализа и функционального анализа / К. И. Калашникова, Е. Д. Жихарева, П. А. Петров // Технологии аддитивного производства. – 2024. – Т. 2, № 3. – С. 47-54.
10. MK8 extruder feeder assembly [Электронный ресурс] : instruction // Geeetech. – Режим доступа: <https://www.geeetech.com/Documents/MK8%20extruder%20feeder%20assembly%20instruction.pdf> (дата обращения: 03.03.2026).
11. Патент US 2016/0107384 A1, МПК B29C 67/00. Drive device for a filament in a 3D printer / Enache E. H. ; заявитель и патентообладатель Leapfrog B.V. – № 14/884,043 ; заявл. 15.10.2015 ; опубл. 21.04.2016.
12. Патент US 12,304,138 B1, МПК B29C 64/118. High speed FDM 3D printer with closed loop motion system / Consalvi J. J. ; заявитель и патентообладатель Jacob J. Consalvi. – № 17/748,756 ; заявл. 19.05.2022 ; опубл. 20.05.2025.
13. "Севастопольский государственный университет", 2016. – С. 122-126.
14. Патент US 2019/0084289 A1, МПК B33Y 50/00. 3D printer, related set of parts and methods / Issa J. ; заявитель и патентообладатель Joseph Issa. – № 15/758,972 ; заявл. 11.09.2016 ; опубл. 21.03.2019.
15. Патент US 10,875,289 B2, МПК B33Y 50/00. 3D printer, related set of parts and methods / Issa J. ; заявитель и патентообладатель Joseph Issa. – № 15/758,972 ; заявл. 11.09.2016 ; опубл. 29.12.2020.
16. Патент US 2019/0184633 A1, МПК B29C 64/209. Print head for three-dimensional printing and the print head assembly / Sydow P. [et al.] ; заявитель и патентообладатель OMNI3D SP. Z O.O. – № 16/091,404 ; заявл. 03.04.2017 ; опубл. 20.06.2019.

УДК 624.924.8

Прогрессивное оборудование для получения новых конструкций мелкогабаритных метчиков

Александр Олегович Харченко¹, к.т.н.,

Иван Владимирович Тищенко²,

Елизавета Александровна Леонова³,

Екатерина Александровна Владецкая⁴, к.т.н.,

^{1,2,3} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

⁴ Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова

¹ aokharchenko@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1704-9380>

² ivtishchenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9208-6866>

³ elizavetabacaeva@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6766-4074>

⁴ vladetska@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2774-3088>

Аннотация. В статье рассмотрены и проанализированы способы формирования рабочей части метчиков путем предварительного профилирования заготовки с получением на её боковой поверхности рельефа и последующего профилирования радиальным обжимом полученной заготовки по локальным участкам. Также

предусматривается вариант при предварительном профилировании осуществления формирования резьбы по всей поверхности рабочей части заготовки и последующего профилирования с обжатием по участкам безрезьбовых зон. Анализ и разработка прогрессивных способов и оборудования для изготовления рабочей части пластически деформирующих метчиков позволяют повысить эффективность обработки внутренней мелкоразмерной резьбы в деталях из алюминиевых, цинковых, медных сплавов, конструкционных сталей и титановых сплавов. При этом трудоемкость изготовления и стоимость существенно ниже, чем по традиционной технологии метчиков со шлифованным резьбовым профилем, а их стойкость повышается в 2 раза.

Ключевые слова: мелкоразмерная резьбообработка, наружная резьба, рабочая часть пластически деформирующих метчиков, накатывание наружных резьб, способ формирования рабочей части, затылующее деформирование матрицей и пуансоном.

Advanced production equipment new small size tap designs

Alexander O. Kharchenko¹, PhD (Eng),

Ivan V. Tishchenko²,

Elizaveta A. Leonova³,

Ekaterina A. Vladetskaya⁴, PhD (Eng),

(^{1,2,3} Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

⁴ State Maritime University named after Admiral F.F. Ushakov)

¹ aokharchenko@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1704-9380>

² ivtishchenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9208-6866>

³ elizavetabacaeva@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6766-4074>

⁴ vladetska@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2774-3088>

Abstract. *Methods of forming working part of taps by preliminary profiling of workpiece with obtaining of relief on its side surface and subsequent profiling by radial crimping of obtained workpiece along local sections are considered and analyzed in article. There is also an option for preliminary profiling of thread formation along the entire surface of the working part of the workpiece and subsequent profiling with reduction along sections of unthreaded zones. The analysis and development of advanced methods and equipment for manufacturing the working part of plastically deforming taps make it possible to increase the efficiency of processing the inner small-sized thread in parts made of aluminum, zinc, copper alloys, structural steels and titanium alloys. At the same time labour input and cost are considerably lower than according to traditional technology of taps with ground threaded profile, and their resistance is increased by 2 times.*

Keywords: small-size threading, external thread, working part of plastically deforming taps, rolling of external threads, method of forming the working part, backing deformation by a matrix and a punch.

Введение. Одним из прогрессивных направлений в технологии и процессах обработки материалов является применение методов на основе пластической деформации, в частности при изготовлении наружных резьбовых поверхностей. Накатывание резьбы по сравнению с резьбонарезанием способствует повышению производительности труда, экономии металла и значительному повышению долговечности деталей [1].

В этой связи вопросы создания эффективной технологии и оборудования для изготовления мелкоразмерных метчиков методом пластического формирования резьбы являются актуальной задачей, решение которой связано с получением значительного экономического эффекта за счет повышения производительности обработки и улучшения качества инструмента.

Накатывание резьбы по сравнению с резьбонарезанием способствует повышению производительности труда, экономии металла и значительному повышению долговечности деталей [1-4].

Анализ процесса [5, 6] свидетельствует о том, что при обработке внутренних резьб малых диаметров во всех типах производства (рисунок 1) преобладает метод обработки резьб метчиками. Однако доля использования одного из наиболее перспективных методов – формообразования внутренних резьб пластически деформирующими (бесстружечными) метчиками в деталях из высокопластичных сталей, цветных металлов и их сплавов остается недопустимо низкой.

Сдерживающими факторами при этом являются: действующая технология изготовления резьбового профиля на метчиках, которая не всегда обеспечивает нормативную стойкость инструмента и качество рабочих поверхностей [7]; отсутствие эффективного оборудования и устройств для получения рабочей части мелкогабаритных пластически деформирующих (ПДМ) метчиков новых конструкций [8, 9].

Создание прогрессивного оборудования для получения рабочей части ПДМ новых конструкций также является актуальной задачей, решение которой связано с повышением производительности обработки и улучшения качества рабочей части инструмента.

Материалы и методы. Увеличение эксплуатационных характеристик пластически деформирующих метчиков (ПДМ) возможно на основе реализации прогрессивных способов получения на их рабочей части затылованного резьбового профиля.

Поперечное сечение рабочей части ПДМ рекомендуется выполнять трех- или четырехгранным. Четырехгранное поперечное сечение обладает повышенной прочностью и упрощает контроль исполнительных размеров рабочей части. На рабочей части ПДМ выполняется резьба по всему периметру поперечного сечения. Для обеспечения поступления смазки в зону деформации, а также выхода воздуха и смазки при образовании резьбы в глухих отверстиях на боковых сторонах рабочей части ПДМ выполняются канавки, параллельные оси метчика, ширина и радиус которых получаются автоматически одновременно с образованием резьбового профиля на рабочей части.

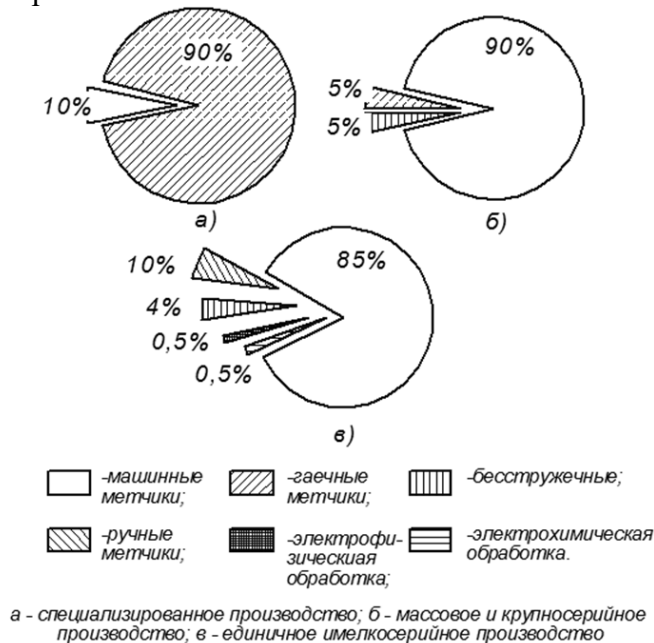


Рис. 1. Распределение различных методов обработки внутренних резьб

Форма поперечного сечения ПДМ определяется конфигурацией и размерами поперечного сечения заготовок (рисунок 2, а, б).

Образование резьбового профиля на ПДМ производится пластическим деформированием (накатыванием) и геометрия его обуславливается в основном геометрией накатного инструмента.

Формообразование резьбового профиля с одновременным его затылованием на рабочей части ПДМ осуществляется на универсальных токарно-винторезных станках резьбонакатными головками с пружинящим корпусом и головками специальных конструкций.

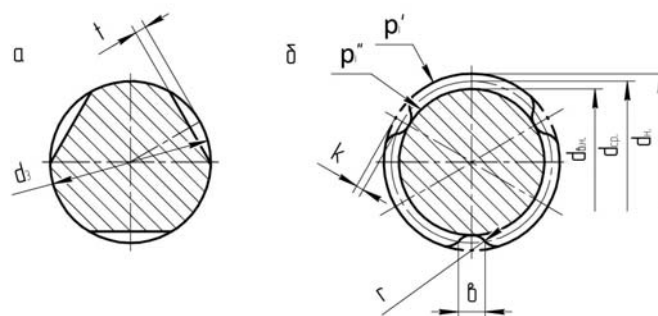


Рис. 2. Поперечные сечения рабочей части трехгранных заготовок ПДМ: а – начальное, перед формированием резьбового профиля; б – после накатывания резьбового профиля на рабочей части

Заготовке 1 (рисунок 3) ПДМ сообщают вращение, а резьбонакатной головке – продольное перемещение так, чтобы между этими движениями обеспечивалась жесткая кинематическая связь. Резьбонакатные ролики 2 в процессе накатывания постоянно контактируют с поверхностями рабочей части, периодически поднимаясь на вершины граней поперечного сечения и опускаясь во впадины граней. При этом течение металла происходит не только вдоль боковых поверхностей профиля резьбонакатных роликов, но и с вершин граней заготовки ПДМ во впадины. Образуется полный резьбовой профиль на вершинах граней, а впадины служат смазочными канавками по всей длине рабочей части.

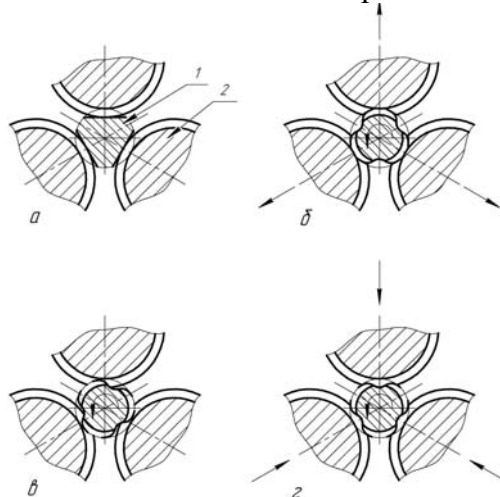


Рис. 3. Схема (авт. свид. SU 1065069) получения затылованного резьбового профиля на метчике: а – исходное состояние заготовки и резьбонакатных роликов; б – вращение заготовки и согласованное продольное перемещение резьбонакатной головки к вершинам граней; в –

продолжение указанных перемещений резбонакатной головки с обеспечением затылования профиля; г – продолжение указанных перемещений ко впадинам граней с формированием смазочных канавок

После того, как накатана вся рабочая часть, реверсируют движение и «свинчивают» резбонакатную головку с рабочей части ПДМ. Формообразование резьбового профиля накатыванием обеспечивает стабильность размеров резьбы рабочей части ПДМ, так как «лишний» металл перемещается в лыски заготовки ПДМ и при $f = 0,08$ (f – коэффициент, определяющий форму поперечного сечения рабочей части ПДМ) изменяется лишь ширина в смазочной канавке. Это позволяет расширить поле допусков на диаметры заготовок ПДМ.

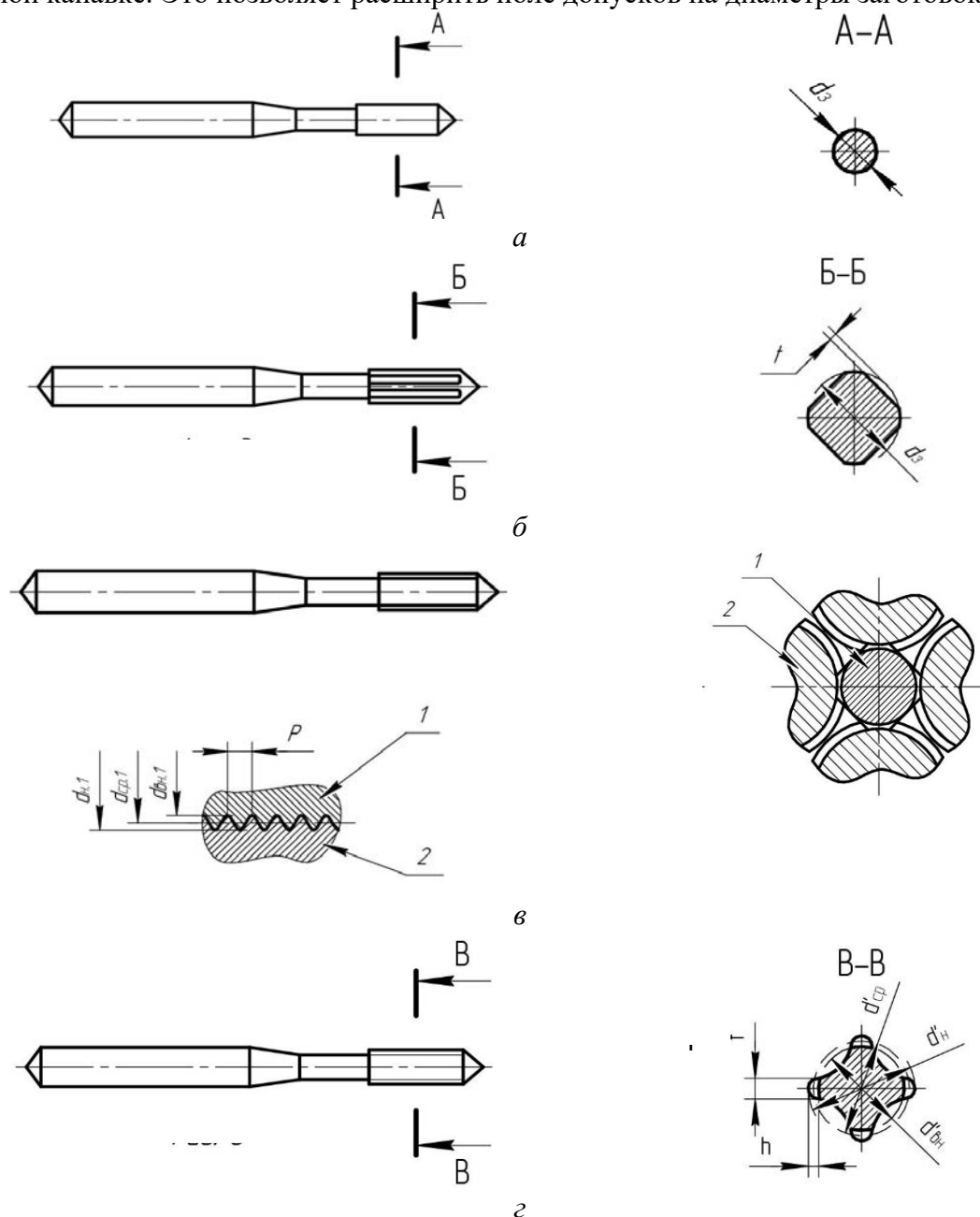


Рис. 4. Схема (авт. свид. SU 1340878) формирования метчика: а – заготовка с рабочей частью круглого поперечного сечения А-А; б – заготовка с поперечным сечением в виде правильного

многоугольника (сечение Б-Б); в – заготовка с накатанным резьбовым профилем с круглым поперечным сечением центральной части; г – окончательно сформированное сечение В-В рабочей части

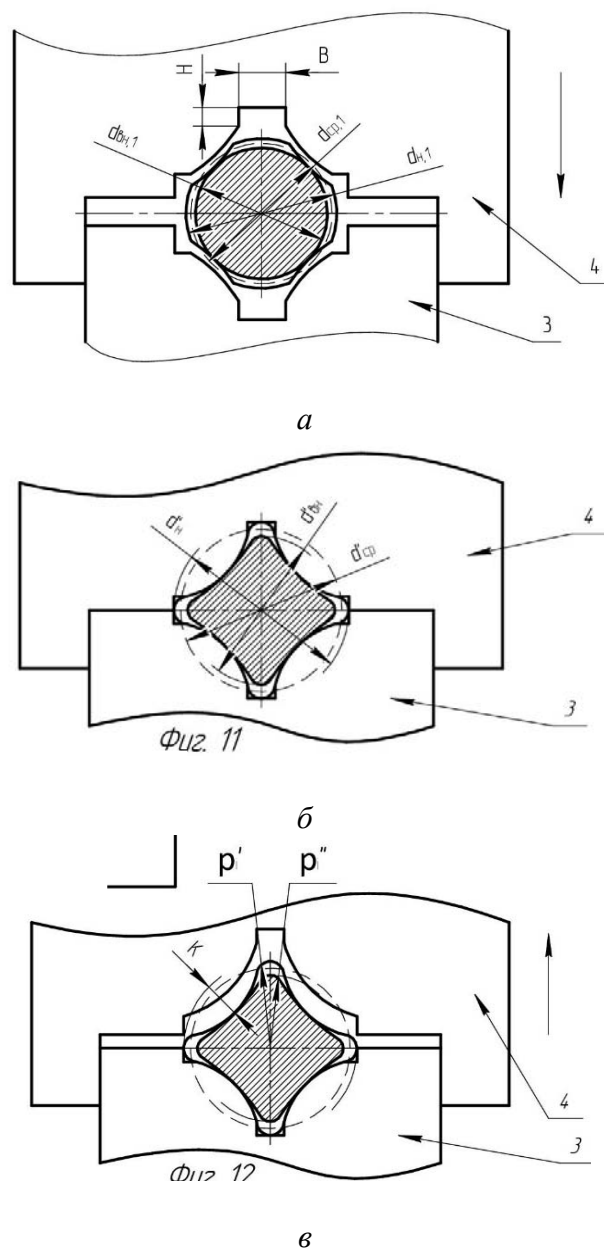


Рис. 5. Процесс окончательного формирования поперечного сечения рабочей части ПДМ матрицей 3 и пуансоном 4 устройства для деформирования: а – исходное положение; б – рабочее положение; в – окончание процесса

Другой способ формирования рабочей части ПДМ осуществляют путем предварительного профилирования заготовки с получением на её боковой поверхности рельефа и последующего профилирования радиальным обжимом полученной заготовки по локальным участкам. Также предусматривается вариант при предварительном профилировании осуществления формирования резьбы по всей поверхности рабочей части

заготовки и последующего профилирования с обжатием по участкам, соответствующим в готовом состоянии безрезбовым зонам [13].

На рисунке 4, а показана заготовка такого ПДМ, рабочая часть которого имеет круглое поперечное сечение А-А, на рисунке 4, б – заготовка с поперечным сечением рабочей части в виде правильного многоугольника (сечение Б-Б) с вершинами в виде дуг окружности, на рисунке 4, в – заготовка с накатанным резьбовым профилем с круглым поперечным сечением центральной части и схема накатки резьбы на заготовке 1 резьбонакатными роликами 2. На рисунке 4, г показан ПДМ с окончательно сформированным поперечным сечением В-В рабочей части. Указанное окончательное формирование поперечного сечения осуществляется прессованием в устройстве (рисунок 5) между матрицей 3 и пуансоном 4, форма рабочих поверхностей которых соответствует форме впадин поперечного сечения метчика. Между рабочими поверхностями выполнены канавки, ширина которых B равна длине зуба l в поперечном сечении метчика, а высота H превышает высоту зуба h метчика. При деформировании материал заготовки ПДМ перемещается в радиальном направлении от центра к вершинам граней, при этом происходит затылование зубьев по всему профилю.

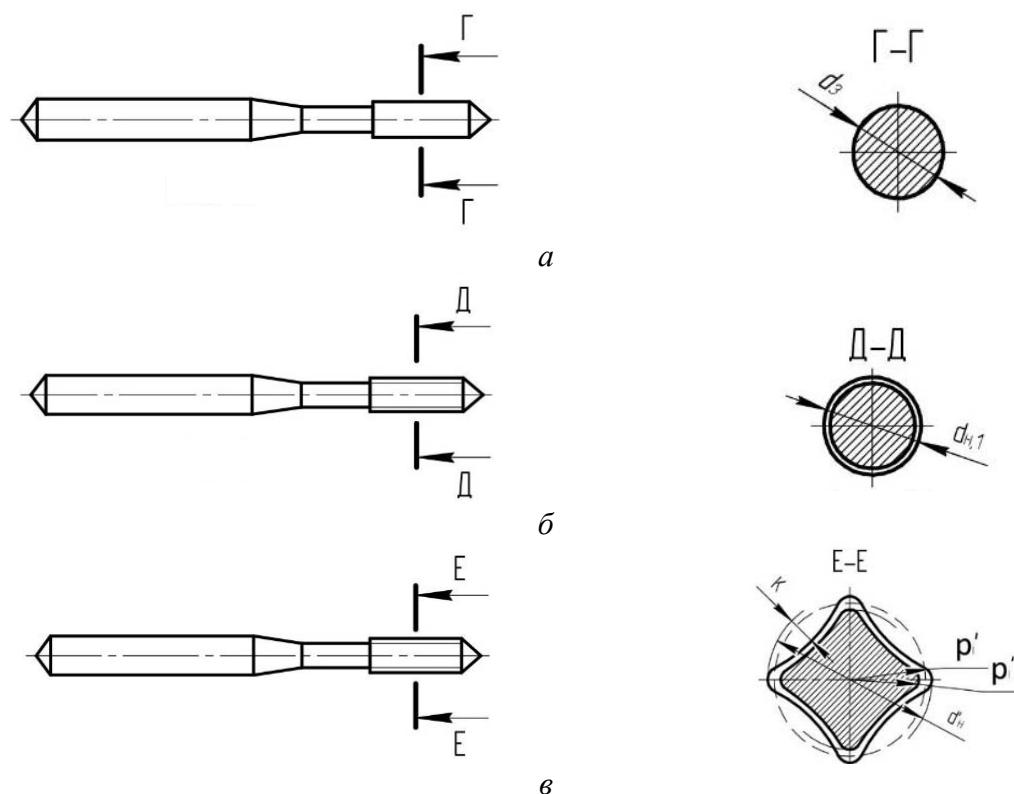


Рис. 6. Схема способа формирования рабочей части ПДМ с полным профилем резьбы по всему сечению: а – заготовка ПДМ с рабочей частью круглого поперечного сечения Г-Г; б – заготовка с полным профилем резьбы по всему сечению Д-Д рабочей части; в – ПДМ с окончательно сформированным поперечным сечением Е-Е

Изменением расстояния между матрицей 3 и пуансоном 4 можно обеспечивать требуемые размеры dnI и $dscrI$ метчика, а изменением диаметра заготовки d_3 и глубины лысок t обеспечивают необходимую величину затылования k . После этого окончательно

формируют резьбовой профиль пластическим деформированием до получения необходимых размеров d_n и d_{cp} .

Также возможен вариант выполнения способа (рисунок 6, а, б, в), при котором используют заготовку в виде стержня круглого сечения Г-Г и накатывания на нём незатылованного резьбового профиля по всему периметру Д-Д с шагом, равным шагу резьбы метчика, диаметрами d_{n1} , d_{cp1} и $d_{вн1}$.

Затем заготовку 5 (рисунок 7, а) с поперечным сечением Д-Д пуансонами 6 с резьбовым профилем, идентичным по форме в поперечных сечениях участкам нерабочих граней готового метчика, деформируют (рисунок 7, б) в радиальных направлениях. При этом происходит затылование всего резьбового профиля метчика по кривым переменного радиуса кривизны по наружной ρ_{II} и внутренней ρ_{III} поверхностям. Требуемая величина затылования обеспечивается настройкой величины рабочих перемещений пуансонов при деформировании поперечного сечения заготовки ПДМ.

После этого окончательно формируют резьбовой профиль в осевых сечениях рабочей части ПДМ по вершинам граней резьбонакатными головками до получения окончательных размеров d_n и d_{cp} .

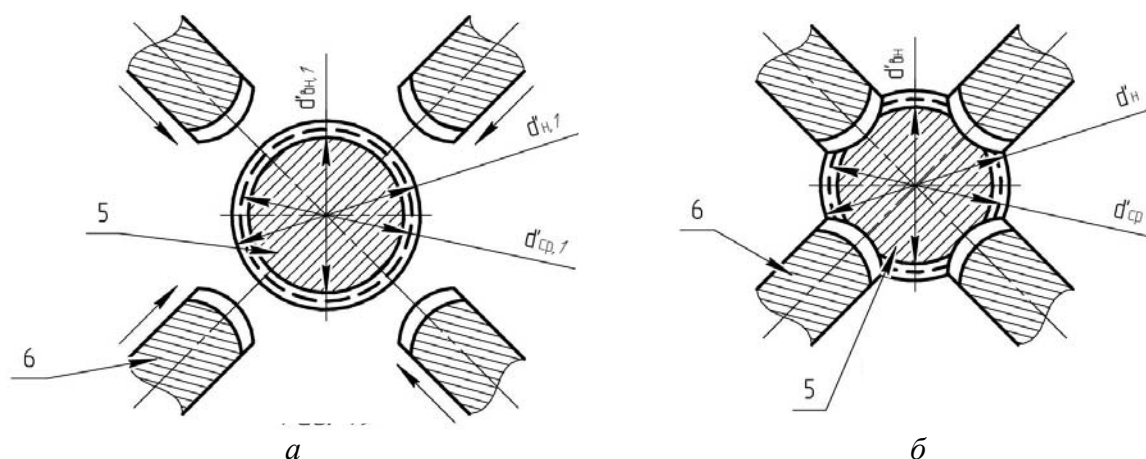


Рис. 7. Схема с пуансонами 6 с резьбовым профилем для затылования заготовок 5 метчиков: а – в исходном состоянии; б – в конечном положении

Результаты и их обсуждение. Разработанная в СевГУ технология изготовления ПДМ включает формообразование стержня ПДМ, поперечного сечения рабочей части, резьбового профиля и термообработку.

Стержни цельных ПДМ могут быть изготовлены на токарных станках с ЧПУ или автоматах продольного точения. Форму граненого поперечного сечения ПДМ получают фрезерованием, шлифованием или штамповкой соответственно на широкоуниверсальных, фрезерных, плоскошлифовальных станках или кривошипных прессах. Формообразование резьбового профиля с одновременным его затылованием на рабочей части ПДМ осуществляется на универсальных токарно-винторезных станках резьбонакатными головками с пружинящим корпусом и головками специальных конструкций. Термическая обработка ПДМ является окончательной операцией, после которой резьба должна быть чистой, без разъеданий и обезуглероживания, а размеры элементов резьбы должны находиться в пределах допустимых отклонений. Твердость резьбовых поверхностей ПДМ после закалки не должна

превышать заданной величины HRC 60...63, так как изгибающие усилия, возникающие на сторонах профиля витков, могут вызвать их выкрашивание.

Таким образом, анализ и разработка прогрессивного оборудования для изготовления мелкоразмерных метчиков позволяют повысить эффективность обработки внутренней резьбы в деталях из алюминиевых, цинковых, медных сплавов, конструкционных сталей и титановых сплавов. Изготовленные для размера М4 из заготовки круглого поперечного сечения рабочей части диаметром $d_3 = 3,34$ мм с фрезерованными четырьмя лысками глубиной $t = 0,2$ мм и последующим накатанным резьбовым профилем, а также затылуемым деформированием матрицей и пуансоном, готовые метчики с размерами рабочей части $d_n = 4,03$ мм и $d_{cp} = 3,67$ мм обеспечивают высокую точность и твердость рабочей части инструмента. При этом трудоемкость изготовления существенно ниже, чем по традиционной технологии, стоимость примерно на порядок меньше стоимости метчиков со шлифованным резьбовым профилем, а стойкость – выше в 2 раза. Внедрение прогрессивных способов получения мелкоразмерных ПДМ в производство существенно повышает производительность труда и снижает затраты на изготовление инструмента.

Список литературы

1. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики / В.М. Меньшаков, Г.П. Урлапов, В.С. Середа. – М.: Машиностроение, 1976. – 167 с.
2. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб / В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.
3. Миропольский Ю.А. Накатывание резьб и профилей / Ю.А. Миропольский, Э.П. Луговой. – М.: Машиностроение, 1976. – 178 с.
4. Рыжов Э.В. Раскатывание резьб / Э.В. Рыжов, О.С. Андрейчиков, А.Е. Стешков. – М.: Машиностроение, 1974. – 122 с.
5. Фрумин Ю.Л. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент / Ю.Л. Фрумин. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.
6. Якухин В.Г. Оптимальная технология изготовления резьб / В.Г. Якухин. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
7. Братан С.М. Повышение точности формообразования мелкоразмерных резьб метчиками в алюминиевых сплавах: монография / С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
8. Харченко А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: практикум / А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рошупкин. – М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.
9. Харченко А.О. Патентоведение и изобретательство. Практикум / А.О. Харченко, А.Г. Карлов, А.А. Харченко, К.Н. Осипов. – М.: Центркаталог, 2018. – 112 с.
10. Харченко А.О. Практикум по научно-исследовательской деятельности в машиностроении / А.О. Харченко, С.М. Братан, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая. – М.: Центркаталог, 2022. – 288 с.
11. Харченко А.О. Повышение эффективности формирования резьбы при изготовлении мелкоразмерных пластически деформирующих метчиков / А.О. Харченко, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2022. № 5 (355). – С.120-129. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-355-5-120-129.
12. Харченко А.О. Прогрессивное оборудования для получения рабочей части мелкоразмерных пластически деформирующих метчиков / А.О. Харченко, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и

- технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2022. № 5 (355). – С.158-164. DOI: 10.33979/2073-7408-2022-355-5-158-164.
13. А. с. SU 1340878 A1, МКИ В21 К 5/02. Способ формирования рабочей части бесстружечных метчиков / Канареев Ф.Н., Жаквич Б.Т., Харченко А.О. – № 3699584/31-27; Заявл. 13.02.1984; Оpubл. 30.09.1987, Бюл. №36 // Открытия. Изобретения. – 1987. – №36.
14. Харченко А.О. Практикум по научно-исследовательской деятельности в машиностроении /А.О. Харченко, С.М. Братан, А.А. Харченко, Е.А. Владецкая. – М.: Центркаталог, 2022. – 288 с.

УДК 621.91.01:621.375.826

Разработка комплексной методики оценки влияния технологических факторов на качество лазерной резки листовой стали

Сеитметмет Реуфович Халилов¹,

¹ Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,
Симферополь, Россия

¹ seitmemet24@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0795-5853>

Аннотация. В статье представлен обзор современных методов повышения качества лазерной резки листовых материалов. Проведен анализ физических основ взаимодействия лазерного излучения с металлами, классифицированы основные виды дефектов при лазерной резке, такие как грат, шероховатость, перпендикулярность и зона термического влияния. Определены входные (управляемые) и выходные (контролируемые) параметры технологического процесса. Систематизированы существующие подходы к повышению качества резки: фокусирующие, энергетические, газодинамические, аппаратные и программные методы. Обоснована необходимость применения комплексного подхода с использованием методов планирования эксперимента для количественной оценки степени влияния различных факторов на качество реза. Предложена методика полного факторного эксперимента типа 2² для определения влияния мощности излучения и скорости резки на ширину реза и высоту графа при лазерной резке нержавеющей стали AISI 304 на волоконном лазерном комплексе MetalTec 1530. Статистическая обработка результатов включает проверку воспроизводимости, значимости коэффициентов и адекватности модели, что позволяет количественно оценить вклад каждого фактора. Сформулированы цель и задачи экспериментального исследования, позволяющие ранжировать факторы и разработать практические рекомендации по выбору оптимальных режимов резки.

Ключевые слова: лазерная резка, нержавеющая сталь, качество реза, ширина реза, грат, факторный анализ, планирование эксперимента, волоконный лазер, дефекты, технологические факторы.

Development of a comprehensive methodology for assessing the influence of technological factors on the quality of laser cutting of sheet steel

Seitmemet R. Khalilov¹,

(¹ Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov,
Simferopol, Russia)

¹ seitmemet24@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0795-5853>

Abstract. The article presents an overview of modern methods for improving the quality of laser cutting of sheet materials. An analysis of the physical principles of laser radiation interaction with metals is carried out, and the main types of defects in laser cutting, such as burr, roughness, non-perpendicularity, and heat-affected zone, are classified. The input

(controlled) and output (monitored) parameters of the technological process are determined. Existing approaches to improving cutting quality are systematized: focusing, energy, gas-dynamic, hardware and software methods. The need for an integrated approach using experimental design methods for a quantitative assessment of the influence of various factors on cut quality is substantiated. A technique for a full factorial experiment of type 2^2 is proposed for determining the effect of radiation power and cutting speed on the cut width and burr height during laser cutting of AISI 304 stainless steel on a MetalTec 1530 fiber laser system. Statistical processing of the results includes checking reproducibility, coefficient significance, and model adequacy, which allows for a quantitative assessment of the contribution of each factor. The aim and objectives of the experimental study are formulated, allowing us to rank factors and develop practical recommendations for selecting optimal cutting modes.

Keywords: laser cutting, stainless steel, cut quality, cut width, burr, factor analysis, experimental design, fiber laser, defects, technological factors..

Введение. Лазерная резка листовых материалов является одной из наиболее востребованных технологий в современном машиностроении, приборостроении, авиа- и судостроении, автомобильной промышленности. Высокая точность, минимальная зона термического влияния, возможность обработки широкой номенклатуры материалов и высокий уровень автоматизации делают лазерные технологические комплексы эффективным инструментом раскроя как металлических, так и неметаллических материалов [1–5].

Качество лазерной резки характеризуется комплексом показателей: шириной реза, шероховатостью поверхности, отклонением от перпендикулярности, наличием грата (заусенцев) и величиной зоны термического влияния. Эти показатели определяются совокупностью технологических факторов, среди которых можно выделить энергетические параметры (мощность излучения, скорость резки), параметры фокусировки (положение фокальной плоскости, фокусное расстояние), газодинамические параметры (тип, давление и расход вспомогательного газа), а также аппаратные факторы (состояние оптики, центровка сопла) [6, 7].

Значительный вклад в развитие теоретических основ лазерной обработки материалов внесли работы А.Г. Григорьянца, Н.Н. Рыкалина, А.А. Соколова и других авторов [6, 7]. В работах [8, 9] исследованы особенности лазерно-кислородной резки низкоуглеродистых сталей и установлены критериальные зависимости для оптимизации режимов. В диссертационном исследовании А.А. Голышева предложен количественный критериальный подход к оптимизации режимов лазерной резки, основанный на безразмерных параметрах подобия (число Пекле, безразмерная удельная мощность). Показано, что для получения высококачественного реза необходимо поддерживать удельные энергозатраты на уровне 24–28 Дж/мм³ [10].

Производственные компании, в частности Mitsubishi Electric, разработали самостоятельные инженерные методики борьбы с дефектами, включающие контроль центровки сопла, калибровку датчика высоты, методы ступенчатой фокусировки и импульсной модуляции [11]. Однако эти методики носят эмпирический характер и привязаны к конкретному оборудованию. В работе Р. Саркара [12] выполнен сравнительный анализ методов поверхности отклика (RSM) и роя частиц (PSO) применительно к лазерной резке титанового сплава и оцинкованной стали. Показано, что эвристические методы позволяют получить лучшие решения по сравнению с классическими градиентными.

Постановка проблемы. Основная проблема, с которой сталкиваются технологи при настройке процессов лазерной резки, заключается в нестабильности точности и качества при изменении внешних условий (температурные колебания, износ оптики, неоднородность материала). Наиболее существенными факторами, ухудшающими качество, являются: неоптимальная настройка фокусирующей системы; неправильный выбор режимов резки (мощность, скорость, давление газа); тепловые деформации заготовки и элементов лазерного

комплекса. При этом отсутствует системный подход к оценке вклада каждого из факторов в итоговое качество реза. В большинстве исследований влияние факторов рассматривается изолированно, без учёта их взаимодействия.

Целью работы является разработка комплексной методики оценки влияния технологических факторов на качество лазерной резки листовой стали с обоснованием выбора приоритетных параметров настройки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить физические основы взаимодействия лазерного излучения с листовыми материалами, выявив особенности поглощения, нагрева и разрушения материала применительно к нержавеющей стали AISI 304.

2. Классифицировать дефекты, возникающие при лазерной резке, установив связь между видами дефектов (грат, шероховатость, неперпендикулярность, зона термического влияния) и технологическими параметрами процесса.

3. Определить входные (управляемые) и выходные (контролируемые) параметры технологического процесса лазерной резки.

4. Провести систематический обзор существующих методов повышения качества лазерной резки.

5. Разработать методику экспериментальных исследований с использованием методов планирования эксперимента (полный факторный эксперимент типа 2^2), позволяющую оценить степень влияния различных технологических факторов на показатели качества реза.

6. Разработать практические рекомендации по выбору режимов лазерной резки листовой нержавеющей стали, обеспечивающих стабильное качество реза.

Материалы и методы. Традиционный подход к исследованию влияния технологических факторов на качество обработки предполагает метод «один фактор за раз»: изменяется один параметр при фиксированных остальных, затем делается вывод о его влиянии. Однако данный подход обладает существенными недостатками: требует большого количества опытов; не позволяет оценить эффекты взаимодействия факторов (например, когда влияние скорости резки зависит от уровня мощности); не даёт количественной оценки степени влияния каждого фактора.

Для преодоления этих недостатков в технических и технологических исследованиях широко применяются методы планирования эксперимента и математического моделирования. Как отмечено в работе В.П. Тарасика [13], математическое моделирование позволяет формализовать процесс исследования и получить количественные зависимости между входными и выходными параметрами системы при минимальных затратах ресурсов. Основные преимущества подхода: минимизация числа опытов, оценка взаимодействий, количественная оценка процесса (коэффициенты регрессии показывают значимость каждого фактора), ранжирование факторов.

Для начального этапа исследований, когда необходимо выявить наиболее значимые факторы, наиболее эффективным является полный факторный эксперимент типа 2^k [13].

В эксперименте типа 2^k каждый фактор варьируется на двух уровнях (нижнем «-1» и верхнем «+1»), а число опытов равно 2^k , где k – число факторов. Для двух факторов ($k=2$) число опытов составляет 4, что позволяет при минимальных затратах получить уравнение регрессии вида:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (1)$$

где y – функция отклика (показатель качества); x_1, x_2 – кодированные значения факторов; a_0, a_1, a_2, a_{12} – коэффициенты регрессии [13].

В качестве экспериментальной базы для проведения исследований выбран промышленный волоконный лазерный комплекс MetalTec 1530, оснащенный лазерным источником мощностью до 1500 Вт и системой ЧПУ с программным обеспечением RU CUT V.2. Основные технические характеристики станка: рабочее поле 1530×3050 мм, максимальная скорость резки до 30 м/мин, точность позиционирования $\pm 0,03$ мм.

Объектом исследования является листовая нержавеющая сталь марки AISI 304 (российский аналог 08X18H10) толщиной 3 мм. Данный материал широко применяется в машиностроении, пищевой и химической промышленности.

На основе анализа литературных источников [3–11] и технических возможностей оборудования в качестве основных варьируемых факторов выбраны:

- 1) мощность лазерного излучения P (диапазон 80–100 % от номинальной);
- 2) скорость резки v (диапазон 30–50 мм/с).

Остальные параметры зафиксированы на оптимальных значениях, предложенных в технической документации по эксплуатации лазерного комплекса: положение фокальной плоскости (на поверхности материала); давление азота (14 бар); фокусное расстояние линзы (200 мм); диаметр сопла (1,5 мм).

В качестве функций отклика являющимися выходными параметрами качества выбраны: ширина реза b (мм) и высота грата h_g (мм).

После определения управляемых факторов (P , v) и их уровней (таблица 1) следующим этапом разработки методики является построение матрицы планирования эксперимента. Такая матрица представляет собой таблицу 2, в которой для каждого опыта указывается комбинация уровней факторов в кодированных или натуральных значениях. В полном факторном эксперименте 2^2 это все возможные сочетания двух уровней двух факторов, что обеспечивает получение данных, достаточных для вычисления не только главных эффектов, но и эффекта парного взаимодействия.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор		Обозначение	Нижний уровень (–1)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования
№	Наименование				
1.	Мощность излучения, %	$x_1 (P)$	80	100	10
2.	Скорость резки, мм/с	$x_2 (v)$	30	50	10

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	$x_1 (P)$	$x_2 (v)$	$x_1 \times x_2$
1	–1	–1	+1
2	+1	–1	–1
3	–1	+1	–1
4	+1	+1	+1

Для двух факторов ПФЭ 22 включает 4 опыта, каждый из которых повторяется 5 раз для обеспечения статистической достоверности.

После проведения эксперимента предполагается выполнить: оценку воспроизводимости по критерию Кохрена; вычисление коэффициентов уравнения регрессии; проверку значимости коэффициентов по критерию Стьюдента; проверку адекватности модели по критерию Фишера. На основе сравнения абсолютных значений коэффициентов a_1 и a_2 будет выполнено ранжирование факторов, что позволит получить количественные оценки вклада каждого фактора в формирование качества реза и разработать практические рекомендации по выбору оптимальных режимов резки.

Заключение. 1. В результате проведённого анализа установлено, что существующие методы повышения качества лазерной резки можно разделить на шесть основных групп: фокусируемые, энергетические, газодинамические, аппаратные, программные и статистические. Однако ни один из них не позволяет в комплексе оценить степень влияния различных технологических факторов на качество реза.

2. Предложена комплексная методика оценки влияния технологических факторов, основанная на применении полного факторного эксперимента типа 2^2 . В качестве варьируемых параметров выбраны мощность излучения и скорость резки; выходные показатели – ширина реза и высота грата. Экспериментальные исследования планируется провести на волоконном лазерном комплексе MetalTec 1530 при резке листовой нержавеющей стали AISI 304.

3. Реализация предложенной методики позволит получить количественные оценки вклада каждого фактора в формирование качества реза, выполнить их ранжирование и разработать практические рекомендации по выбору оптимальных режимов резки. Полученные результаты могут быть использованы на машиностроительных предприятиях, внедряющих лазерные технологии раскроя листовых материалов. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением диапазона варьируемых факторов (включение положения фокальной плоскости и давления газа) и исследованием влияния толщины материала на качество реза.

Список литературы

1. ГОСТ Р 71837-2024. Оптика и фотоника. Резка лазерная тонколистовых металлов и сплавов. Технологический процесс. – М.: Стандартинформ, 2024. – 12 с.
2. ГОСТ Р ИСО 9013-2022. Резка термическая. Классификация резов. Геометрические характеристики изделий и допуски по качеству. – М.: Стандартинформ, 2022. – 20 с.
3. Лазеры: применения и приложения / А. С. Борейшо, В. А. Борейшо, И. М. Евдокимов [и др.] ; под редакцией А. С. Борейшо. — 1-е изд. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 520 с. — ISBN 978-5-8114-9797-3.
4. Антонов, А. А. Роботизация сварочных и родственных технологий : учебное пособие для вузов / А. А. Антонов. — Санкт-Петербург : Лань, 2026. — 420 с. — ISBN 978-5-507-54481-3.
5. Богданов, А. В. Волоконные технологические лазеры и их применение / А. В. Богданов, Ю. В. Голубенко. — 5-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 236 с. — ISBN 978-5-507-47811-8.
6. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная обработка неметаллических материалов. – М.: Высшая школа, 1988. – 191 с.
7. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
8. Ковалев О.Б., Фомин В.М. Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 256 с.
9. Оришич А.М., Фомин В.М. Актуальные проблемы физики лазерной резки металлов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 176 с.

10. Голышев А.А. Сравнительное исследование энергетики лазерной резки стали волоконным и СО2-лазером : диссертация ... кандидата технических наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 156 с.
11. Mitsubishi Electric. Laser Cutting Technical Guide. – Mitsubishi Electric Corporation, 2016. – 87 p.
12. Sarkar R. Comparative analysis of RSM and PSO for optimization of laser cutting parameters / R. Sarkar // Journal of Advanced Manufacturing Systems. – 2022. – Vol. 21. – No. 3. – P. 425–442.
13. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем : учебник / В.П. Тарасик. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2022. – 592 с.

РАЗДЕЛ II. АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.51. 004.514

Экономически обоснованный подход к обучению студентов: замена физических панелей оператора на программные GUI-решения

Леонид Евгеньевич Карташов¹, к.т.н.,
Александр Сергеевич Казак²,

^{1, 2} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹lekartashov@sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9608-7578>

²kazak6000@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7159-7700>

Аннотация. Рассмотрен вопрос изучения и разработки панелей оператора в учебном процессе, проанализированы функции человеко-машинного интерфейса в системах управления технологическим оборудованием. На основе анализа производимых в настоящее время панелей оператора сделан вывод, что из-за высокой стоимости и сложности освоения они не всегда подходят для учебного процесса. Предложено использовать программы, позволяющие на основе использования библиотек графического интерфейса пользователя разрабатывать панели оператора технологическим оборудованием. Приведен пример программы, реализующей управление через терминал, рассмотрено использование библиотеки Tkinter для языка Python. Приведена программная реализация панели оператора с использованием данной библиотеки, рассмотрены существующие среды разработки графического интерфейса. Для реальной задачи управления мехатронным модулем линейного перемещения на основе библиотеки PySide и среды Qt Widgets Designer разработана панель оператора, позволяющая осуществлять ручное управление данным модулем. В результате разработанных программных интерфейсов показано, что данный подход будет эффективен в учебном процессе и может также использоваться при разработке промышленных образцов систем управления технологическим оборудованием.

Ключевые слова: панели оператора, системы управления, терминал, графический интерфейс пользователя, библиотека Tkinter, библиотека PySide.

Economically sound approach to student education: replacing physical operator panels with software GUI solutions

Leonid E. Kartashov¹, PhD (Eng),
Aleksandr S. Kazak²,

(^{1, 2}Sevastopol State University, Sevastopol, Russia)

¹lekartashov@sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9608-7578>

²kazak6000@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-7159-7700>

Annotation. The issue of studying and developing operator panels in the educational process is considered, the functions of the human-machine interface in control systems of technological equipment are analyzed. Based on the analysis of the currently produced operator panels, it is concluded that due to the high cost and complexity of mastering, they are not always suitable for the educational process. It is proposed to use programs that make it possible to develop control panels for technological equipment based on the use of graphical user interface libraries. An example of a program implementing terminal management is given, and the use of the Tkinter library for Python is considered. A software implementation of the operator panel using this library is presented, and existing GUI development environments are considered. For the real task of controlling a linear displacement mechatronic module based on the PySide library and the Qt Widgets Designer environment, an operator panel has been developed that allows manual control of this module. As a result of the developed software interfaces, it is shown that this approach will be effective in the educational process and can also be used in the development of industrial designs of control systems for technological equipment.

Keywords: operator panels, control systems, terminal, graphical user interface, Tkinter library, PySide library

Введение. При обучении студентов в рамках дисциплин, рассматривающих вопросы разработки и проектирования систем управления автоматизированным оборудованием, незаслуженно мало уделяется внимание разработке панелей оператора. Это вызвано как объективными, так и субъективными причинами, которые попытаемся проанализировать.

Панели управления или панели оператора (HMI-панели, от англ. Human-Machine Interface – человеко-машинный интерфейс) представляют собой устройства, обеспечивающие взаимодействие оператора с автоматизированным оборудованием в составе систем промышленной автоматизации (АСУ ТП).

Основные функции, которые реализуются с помощью панели оператора:

Управление – запуск/остановка оборудования, выбор режимов работы, ввод новых параметров технологического процесса.

Визуализация технологического процесса – отображение состояния оборудования и параметров его работы в текстовом или графическом виде.

Мониторинг и оповещение – отображение аварийных сообщений, уведомлений, регистрация времени и даты их возникновения.

Архивация данных – протоколирование технологических процессов, формирование отчётов.

Обмен данными – связь с компонентами АСУ ТП (ПЛК, датчиками, SCADA-системами) через промышленные протоколы (Modbus, Profibus, Ethernet/IP).

Автоматизация задач – выполнение команд по расписанию с поддержкой дополнительных функций.

Панели классифицируют по различным критериям, наиболее существенным из которых является тип управления. По типу управления панели бывают:

Кнопочные – оснащены физическими кнопками и ЖК-дисплеем или индикаторами. Они обеспечивают тактильную обратную связь, надёжны при вибрациях, но ограничены в функциональности.

Сенсорные – с интерактивным экраном, чувствительным к касаниям. Они интуитивно понятны, поддерживают динамическое изменение интерфейса и жесты.

Комбинированные – сочетают сенсорный экран с физическими кнопками для критически важных функций (аварийная остановка или подтверждение операций).

Следует упомянуть и о панельных контроллерах, которые объединяют функции HMI и ПЛК в одном устройстве.

При проектировании систем управления, и панелей оператора в частности, рекомендуется ориентироваться на ГОСТы [1, 2] они обязательны при разработке документации. Однако первый из них достаточно невнятен и ориентирует инженеров на использование готового промышленного оборудования, во втором даны четкие и обоснованные рекомендации построения графических интерфейсов, но информация страдает лаконичностью.

Проблема проектирования панели оператора студентами в учебном процессе имеет еще один аспект. Если проанализировать рынок данных устройств в настоящее время, как это сделано в [3], то цена панелей колеблется от 23 000 до 180 000 рублей. В настоящее время ознакомить студентов с большинством из представленной номенклатуры изделий не представляется возможным. Вторая проблема заключается в многообразии используемых интерфейсов – присутствуют Ethernet, Wi-Fi, USB, Bluetooth, CAN, RS-232, RS-485. Для изучения всех протоколов требуется значительный объем часов. Третья проблема – использование SCADA-систем производителей, что ведет к рассмотрению работы конкретного программного обеспечения, а идеология разработки и понятие взаимодействия между пультом оператора и оборудованием ускользает.

Следует также отметить, что в подавляющем большинстве случаев для первоначального обучения используется платформа Arduino, иногда используются системы на базе STM или Raspberry Pi.

Методы и инструменты для решения должны быть простыми и недорогими. Поставим следующую задачу: на основе простой и дешевой микропроцессорной системы разработать панель оператора для управления различными технологическими процессами.

Целесообразно в рамках учебного процесса ставить задачи и применять инструменты для решения задач по мере их усложнения. Поэтому рассмотрим простейшую задачу: имеется плата Arduino, через терминал необходимо подавать 4 команды. При подаче первой встроенный светодиод должен загореться, при подаче второй – мигать с периодом 1 с, при подаче третьей – мигать с периодом 0,5 с, при подаче четвертой – погаснуть. В данном случае нам не потребуется дополнительное оборудование, и разработка программы ведется только в среде Arduino IDE. Листинг программы приведен ниже.

```
const int ledPin = 13; // Встроенный светодиод подключён к пину 13
int command = 0;      // Переменная для хранения команды
unsigned long previousMillis = 0; // Время последнего переключения светодиода
bool ledState = false; // Текущее состояние светодиода (включён/выключен)
int blinkInterval = 0; // Интервал мигания в миллисекундах

void setup() {
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // Настраиваем пин светодиода как выход
  Serial.begin(9600);      // Инициализируем последовательный порт для связи с терминалом
  digitalWrite(ledPin, LOW); // Изначально гасим светодиод
}

void loop() {
  // Проверяем, есть ли данные в последовательном порту
  if (Serial.available() > 0) {
    command = Serial.parseInt(); // Считываем команду (целое число)

    // Обработываем команды
    switch (command) {
      case 1: // Светодиод горит постоянно
        blinkInterval = 0;
```

```

    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    break;
case 2: // Мигает с периодом 1 секунда (1000 мс)
    blinkInterval = 1000;
    previousMillis = millis();
    break;
case 3: // Мигает с периодом 0,5 секунды (500 мс)
    blinkInterval = 500;
    previousMillis = millis();
    break;
case 4: // Гаснет
    blinkInterval = 0;
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    break;
default: // Некорректная команда – игнорируем
    break;
}
}
// Если установлен интервал мигания, выполняем мигание
if (blinkInterval > 0) {
    unsigned long currentMillis = millis();
    if (currentMillis - previousMillis >= blinkInterval / 2) { // Переключаем каждые полпериода
        previousMillis = currentMillis;
        ledState = !ledState; // Меняем состояние на противоположное
        digitalWrite(ledPin, ledState ? HIGH : LOW);
    }
}
}
}

```

Дадим пояснения к данной реализации поставленной задачи. В функции `setup` пин 13, к которому подключён встроенный светодиод, настраивается на вывод сигналов, затем инициализируется последовательный порт (скорость передачи 9600 бод) для приёма команд из терминала, светодиод изначально гасится.

В основном цикле `loop` программа проверяет, поступили ли данные из терминала и если команда есть, считывает её и обрабатывает через `switch-case`, для режимов мигания используется функция `millis()`, которая возвращает количество миллисекунд с момента запуска программы. Это позволяет мигать светодиодом без блокировки выполнения остальной программы (в отличие от любимой студентами команды `delay()`).

Преимущества такой реализации заключаются в следующем:

Простота и понятность кода – логика чётко разделена, приём команд в `loop()`, обработка в `switch`, мигание – через проверку времени; код легко читается и поддерживается и, следовательно, подходит для обучения программированию Arduino.

Легко добавить новые режимы, например, мигание с частотой 2 Гц или плавное затухание через расширение `switch-case`.

Минимальные требования к ресурсам – не используются прерывания или дополнительные библиотеки и задействованы только базовые функции Arduino.

Надёжность, поскольку инициализация в `setup` гарантирует известное начальное состояние светодиода, и обработка некорректных команд через `default` – программа не зависает при получении случайного числа.

Однако следует указать и недостатки:

Пользователь не получает обратной связи («команда 2 принята»). При ошибках связи (шум, потеря байтов) непонятно, выполнялась ли команда.

При увеличении числа команд `switch-case` становится громоздким.

Основной недостаток – отсутствует графический интерфейс.

Вывод: реализация оптимальна для учебных и простых практических задач – она надёжна, понятна и достаточно эффективна.

Следующий шаг – разработка графического интерфейса. Следует учесть, что методы разработки проектов часто не считаются с необходимостью разработки интерфейса. Разработка интерфейсов осуществляется в проекте слишком поздно, когда возможности улучшения качества взаимодействия между пользователем и продуктом уже потеряны. Интерфейсом же удобнее всего заниматься именно на начальных стадиях разработки [4].

Для создания графического интерфейса следует выбрать язык программирования высокого уровня, в качестве которого подойдет Python. Этот выбор обусловлен тем, что практически все студенты уже изучали его и, кроме того, он имеет большое количество библиотек для создания графического интерфейса. Для начального ознакомления наиболее подходит использование библиотеки Tkinter, которая достаточно хорошо описана в [5, 6]. Попытаемся обосновать причины такого выбора:

Наглядность для обучения: показывает связь между действием пользователя (нажатием кнопки) и реакцией системы (включение или мигание светодиода), подходит для демонстрации принципов автоматизации и последовательной связи.

Интуитивность для неподготовленных пользователей: интерфейс понятен без инструкции, прекрасно подходит для демонстраций работы, обучения и создания прототипов.

Быстрота разработки: создание базового GUI занимает несколько десятков строк кода и нет необходимости изучения более сложных фреймворков.

Автономность интерфейса: GUI запускается как отдельное приложение (не нужно открывать терминал, настраивать скорость порта и т.д.).

Гибкость настройки внешнего вида: изменение цветов, шрифтов, размеров элементов, поддержка тем оформления и возможность локализации.

Расширяемость интерфейса: легко добавить новые элементы, такие как ползунок для плавной регулировки частоты мигания, поле лога с историей команд, график состояния светодиода во времени.

Визуальная обратная связь: можно отображать текущее состояние светодиода (например, менять цвет кнопки), добавить индикатор статуса соединения с Arduino, выводить сообщения об ошибках.

Кроссплатформенность: Tkinter работает на Windows, macOS, Linux без изменений кода.

Tkinter является оптимальным выбором, если нужен понятный интерфейс для пользователей без технических навыков, планируется расширение функционала (добавление новых команд или настроек) и, что особенно важно, проект используется для обучения или демонстрации возможностей.

Вариант реализации поставленной задачи приведен на листинге ниже.

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk, messagebox
import serial
import serial.tools.list_ports

class ArduinoController:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("Управление светодиодом Arduino")
        self.root.geometry("400x300")
        # Переменная для хранения соединения с Arduino
        self.ser = None
        self.setup_ui()
```

```

self.find_arduino()

def setup_ui(self):
    """Создание пользовательского интерфейса"""
    # Заголовок
    title_label = ttk.Label(self.root, text="Управление светодиодом Arduino",
                            font=("Arial", 14, "bold"))
    title_label.pack(pady=10)
    # Информация о статусе
    self.status_label = ttk.Label(self.root, text="Статус: Не подключено",
                                  foreground="red")
    self.status_label.pack(pady=5)

    # Кнопка для поиска и подключения
    connect_btn = ttk.Button(self.root, text="Найти и подключить Arduino",
                             command=self.find_arduino)
    connect_btn.pack(pady=5)
    # Рамка для кнопок управления
    control_frame = ttk.Frame(self.root)
    control_frame.pack(pady=20)
    # Кнопки управления светодиодом
    ttk.Button(control_frame, text="1 - Горит постоянно",
               command=lambda: self.send_command(1)).grid(row=0, column=0, padx=5, pady=5)
    ttk.Button(control_frame, text="2 - Мигает (1 сек)",
               command=lambda: self.send_command(2)).grid(row=0, column=1, padx=5, pady=5)
    ttk.Button(control_frame, text="3 - Мигает (0.5 сек)",
               command=lambda: self.send_command(3)).grid(row=1, column=0, padx=5, pady=5)
    ttk.Button(control_frame, text="4 - Выключен",
               command=lambda: self.send_command(4)).grid(row=1, column=1, padx=5, pady=5)
    # Индикатор состояния светодиода
    self.led_indicator = ttk.Label(self.root, text="Светодиод: ВЫКЛ",
                                   background="gray", foreground="white",
                                   font=("Arial", 12), width=20)
    self.led_indicator.pack(pady=10)

def find_arduino(self):
    """Поиск и подключение к Arduino"""
    try:
        # Поиск всех доступных COM-портов
        ports = list(serial.tools.list_ports.comports())
        arduino_port = None

        for port in ports:
            if "Arduino" in port.description or "USB" in port.hwid:
                arduino_port = port.device
                break

        if arduino_port:
            self.ser = serial.Serial(arduino_port, 9600, timeout=1)
            self.status_label.config(text=f"Статус: Подключено к {arduino_port}", foreground="green")
            messagebox.showinfo("Успех", f"Подключено к Arduino на порту {arduino_port}")
        else:
            messagebox.showwarning("Предупреждение", "Arduino не найден. Проверьте подключение.")

    except Exception as e:
        messagebox.showerror("Ошибка", f"Не удалось подключиться: {str(e)}")

def send_command(self, command):

```



```

"""Отправка команды на Arduino"""
if self.ser and self.ser.is_open:
    try:
        # Отправляем команду с переводом строки
        self.ser.write(f"{command}\n".encode())
        # Обновляем индикатор состояния
        self.update_led_indicator(command)
    except Exception as e:
        messagebox.showerror("Ошибка", f"Ошибка отправки команды: {str(e)}")
    else:
        messagebox.showwarning("Предупреждение", "Arduino не подключено!")

def update_led_indicator(self, command):
    """Обновление индикатора состояния светодиода"""
    states = {
        1: ("Горит", "green"),
        2: ("Мигает (1с)", "yellow"),
        3: ("Мигает (0.5с)", "orange"),
        4: ("Выключен", "gray")
    }
    text, color = states.get(command, ("Неизвестно", "red"))
    self.led_indicator.config(text=f"Светодиод: {text}", background=color)

def on_closing(self):
    """Действия при закрытии окна"""
    if self.ser and self.ser.is_open:
        self.ser.close()
    self.root.destroy()

# Запуск приложения
if __name__ == "__main__":
    root = tk.Tk()
    app = ArduinoController(root)

    # Обработчик закрытия окна
    root.protocol("WM_DELETE_WINDOW", app.on_closing)

    root.mainloop()

```

В результате получим диалоговое окно панели оператора, представленное на рисунке 1. В данной реализации значительно расширен функционал программы: осуществляется автоматический поиск порта и подключение к нему, в случае отсутствия подключения в отдельном окне выводится сообщение о необходимости подключения Arduino, при выборе кнопки она изменяет цвет, что значительно улучшает условия работы оператора и уменьшает возможность ошибки при вводе команд по сравнению с работой через терминал.

Единственным существенным недостатком использования Tkinter при создании коммерческих приложений, на наш взгляд, является отсутствие встроенной среды разработки интерфейса, что увеличивает время проектирования. Конечно, можно воспользоваться сторонними программами, такими, как PAGE [7], Pygubu, wxGlade и ряд других, но в этом случае требуется изучение самой среды разработки, подключение дополнительных библиотек в ряде случаев, отсутствию кроссплатформенности. Отметим, что для коммерческих приложений рекомендуют использовать библиотеку Qt [8], однако она не является бесплатной.

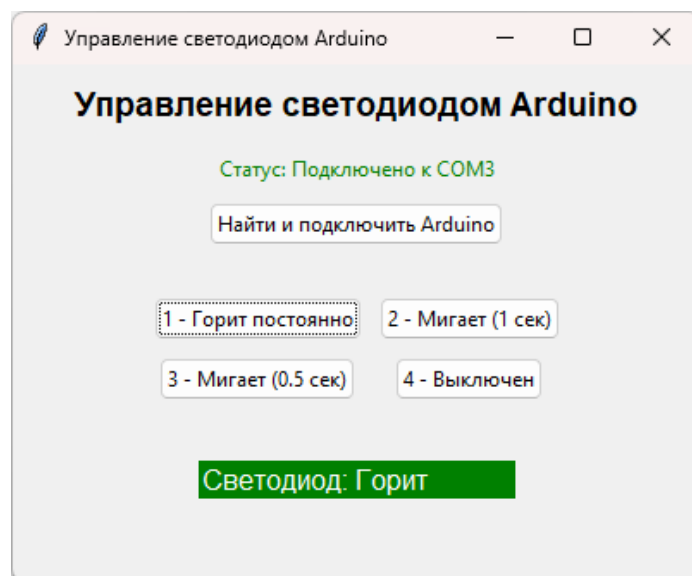


Рис. 1. Диалоговое окно панели оператора

Рассмотрим реальную задачу разработки панели оператора на основе графического интерфейса. В ходе проектирования мехатронного модуля линейных перемещений с шаговым двигателем потребовалось осуществлять ручное управление с заданием различных скоростей и перемещений.

В данной реализации для разработки графического интерфейса пользователя применяется библиотеки PySide [9], с более современным визуальным наполнением и расширенным функционалом, также большим количеством виджетов и возможность создавать собственные элементы, так и устанавливать их. PySide является бесплатным ответвлением библиотеки PyQt, которая разработана на языке C++, что обеспечивает более высокую производительность. В комплекте с библиотекой устанавливается встроенная среда разработки Qt Widgets Designer [10].

Данная среда применяет методику Drag-n-drop, что позволяет пользователю, в отличие Tkinter, разрабатывать графический интерфейс без расчета координат расположения виджетов и описания их свойств. При этом происходит разделение логики управления и собственно интерфейса: интерфейс хранится в файле «.ui», а код в файле «.py», причем Python не является единственным языком для генерации программы, например, возможно генерировать код для C++. Недостатком применения библиотеки является значительно более высокий уровень вхождения, разработчику требуется изучить библиотеку Qt.

Итак, требуется реализовать панель оператора для ручного управления шаговым двигателем мехатронного модуля. Основными параметрами задаваемые с панели являются угловая скорость, задаваемая как частота подаваемых импульсов и расстояние, задаваемое как количество шагов, которые требуется пройти. В модуле используется шаговый двигатель 28BYJ-48 и драйвер шагового двигателя ULN2003.

На рисунке 2 предоставлена панель оператора, разработанная в среде Qt Widgets Designer.

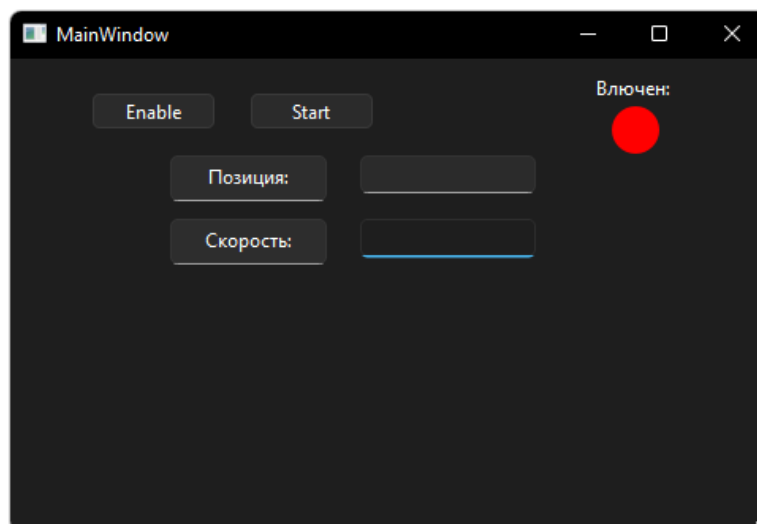


Рис. 2. Панель оператора, разработанная в среде Qt Widgets Designer

На панели реализованы поля ввода позиции и скорости для шагового двигателя, также кнопки «Enable» и «Start», первая необходима для предотвращения самопроизвольного включения шагового двигателя, так как в реальных условиях управления мехатронным модулем на производстве требуется обеспечить контроль и безопасность оборудования. Вторая кнопка при нажатии запускает работу двигателя на исполнение, после задания скорости и перемещения. В выключенном состоянии кнопка «Enable», блокирует кнопку «Start», предотвращая какие-либо произвольные срабатывания, и кроме этого, может остановить текущую задачу.

Листинг программы для Arduino представлен ниже:

```
float pos = 0.0;
float vel = 0.0;
#define in1 8
#define in2 9
#define in3 10
#define in4 11

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(in1, OUTPUT);
  pinMode(in2, OUTPUT);
  pinMode(in3, OUTPUT);
  pinMode(in4, OUTPUT);
}

void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    String recvData = Serial.readStringUntil('\n');
    recvData.trim();
    int sepIdx = recvData.indexOf(',');
    if (sepIdx != -1) {
      String recvPos = recvData.substring(0, sepIdx);
      String recvVel = recvData.substring(sepIdx + 1);
    }
  }
}
```

```
pos = recvPos.toFloat();
vel = 20 - recvVel.toFloat();

Serial.print("Received: Pos=");
Serial.print(pos);
Serial.print("Received: Vel=");
Serial.print(vel);

blinkLED(pos,vel);
// motorMove(pos,vel);
}
}
if(pos > 0 && vel > 0){
  while(pos > 0){
    digitalWrite(in1, HIGH);
    digitalWrite(in2, LOW);
    digitalWrite(in3, LOW);
    digitalWrite(in4, HIGH);
    delay(vel);
    digitalWrite(in1, HIGH);
    digitalWrite(in2, HIGH);
    digitalWrite(in3, LOW);
    digitalWrite(in4, LOW);
    delay(vel);
    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, HIGH);
    digitalWrite(in3, HIGH);
    digitalWrite(in4, LOW);
    delay(vel);

    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, LOW);
    digitalWrite(in3, HIGH);
    digitalWrite(in4, HIGH);
    delay(vel);
    pos = pos - vel;
  }
}
}

void blinkLED(float pos, float vel){
  if (pos > 0 && vel > 0){
    digitalWrite(13,HIGH);
    delay(vel*10);
    digitalWrite(13, LOW);
    delay(vel*10);
  }
  else {
    digitalWrite(13, LOW);
  }
}
```

Листинг программы вызова интерфейса на Python представлен ниже:

```
import serial
import time
import sys
import serial.tools.list_ports
```

```

from ExampleOfMotorControl import *
class MainWindow(QMainWindow):
    def __init__(self, parent=None):
        QMainWindow.__init__(self)

        self.ui = Ui_MainWindow()
        self.ui.setupUi(self)
        self.ui.tglButtonEnb.toggled.connect(self.mtrEnb)
        self.ui.pushButtonStart.clicked.connect(self.start)
        self.ui.pushButtonStart.clicked.connect(self.position)
        self.ui.pushButtonStart.clicked.connect(self.velocity)
        self.is_enb = False
        self.user_name = None
        self.show()
        self.arduino = None
        self.connectToArduino()

    def connectToArduino(self):
        try:
            # Поиск всех доступных COM-портов
            ports = list(serial.tools.list_ports.comports())
            arduino_port = None
            for port in ports:
                if "Arduino" in port.description or "USB" in port.hwid:
                    arduino_port = port.device
                    break
            if arduino_port:
                print("Связь: установлено")
                self.arduino = serial.Serial(arduino_port, 9600, timeout=1)
            else:
                messagebox.showwarning("Предупреждение", "Arduino не найден. Проверьте подключение.")
        except Exception as e:
            messagebox.showerror("Ошибка", f"Не удалось подключиться: {str(e)}")

    def sendToArduino(self, command):
        if self.arduino and self.arduino.is_open:
            try:
                self.arduino.write((command + '\n').encode())
                response = self.arduino.readline().decode().strip()
                print("Ответ Уст: {response}")
                return response
            except Exception as e:
                return None
        else:
            print("Соединение прервано")
            return None

    def updateLight(self, is_on):
        if is_on:
            """print("indeed");"""
            self.ui.light1.setStyleSheet("""
            background-color: #4CAF50;
            border-radius: 15px;
            min-width: 30 px;
            min-height: 30 px;
            max-width: 30 px;
            max-height: 30 px;
            """)

```

```
else:
    self.ui.light1.setStyleSheet("""
background-color: #F44336;
border-radius: 15px;
min-width: 30 px;
min-height: 30 px;
max-width: 30 px;
max-height: 30 px;
""")

def mtrEnb(self, checked):
    self.is_enb = checked
    self.updateLight(checked)
    if checked:
        response = self.sendToArduino("enbOn")
        if response == "ardOn":
            print("Устройство включено")
            print("Motor: ENB_ON")
    else:
        response = self.sendToArduino("enbOff")
        if response == "ardOff":
            print("Устройство выключено")
            print("Motor: ENB_OFF")
            pos = 0
            vel = 0
            dataSend = f"{pos},{vel}\n"
            self.arduino.write(dataSend.encode())

def start(self):
    if not self.is_enb:
        print("Мотор не включен")
        return
    else:
        #if self.arduino and self.arduino.is_open:
        try:
            pos = float(self.ui.lineEditPos.text().strip())
            vel = float(self.ui.lineEditVel.text().strip())
            dataSend = f"{pos},{vel}\n"
            self.arduino.write(dataSend.encode())
            print("Отправлено: {dataSend}")
        except Exception as e:
            print("Ошибка связи:{e}")
            return None

def position(self):
    if self.is_enb:
        text = self.ui.lineEditPos.text()
        try:
            self.user_number = float(text)
            print(f"Позиция: {self.user_number} ,мм")
        except ValueError:
            print("Ошибка: введено некорректное значение")

def velocity(self):
    if self.is_enb:
        text = self.ui.lineEditVel.text()

        try:
            self.user_number = float(text)
```

```
print(f"Скорость: {self.user_number} ,мм/с")
except ValueError:
    print("Ошибка: введено некорректное значение")

if __name__ == "__main__":
    app = QApplication(sys.argv)
    window = MainWindow()
    window.show()
    sys.exit(app.exec())
```

Заключение. Разработка и проектирование панелей оператора для автоматизированных систем является не менее важной задачей, чем разработка самой системы управления автоматизированным оборудованием.

Существующие промышленные панели оператора достаточно дороги и сложны в освоении.

Предлагаемый подход заключается в использовании недорогих контроллеров, сопряженных с персональным компьютером, на котором разрабатывается графический интерфейс пользователя панели оператора, который функционирует на персональном компьютере.

Обучение лучше осуществлять поэтапно, начиная рассмотрение с простейших решений, что позволит студентам ясно понимать назначение панелей оператора и добиться хорошего усвоения принципов и подходов при проектировании подобных устройств.

Возможно расширение данного подхода для реализации систем управления с панелями оператора для создания промышленных образцов, стоимость которых будет существенно ниже, чем реализуемых сейчас на рынке автоматизированного оборудования.

Список литературы

1. ГОСТ Р 71765–2024. Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Общие требования.
2. ГОСТ ИЕС 60447-2015 Интерфейс человеко-машинный. Принципы приведения в действие.
3. Как выбрать панель? ИНСАТ – интеллектуальные системы Автоматизации технологии. <https://insat.ru/hmi-panely-operatora-kak-vybrat-panel-operatora/> (дата обращения: 20.04.2026)
4. Раскин Д. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем. – Пер. с англ. – СПб: Символ-Плюс, 2007. – 272 с., ил.
5. Alejandro Rodas de Paz. Tkinter GUI Application Development Cookbook. – Birmingham: Packt Publishing, 2018. – 448 p.
6. Alan D. Moore. Python GUI Programming with Tkinter. – Birmingham: Packt Publishing, 2018. – 617 p.
7. Gregory Walters. Python GUI Programming with PAGE. – London: BPB Online, 2023. – 320 p.
8. Williams Asiedu. Python GUI Development with PyQt. – Ouereila Publishing House, 2023. – 134 p.
9. Joshua M. Willman. Beginning PyQt. – New York: Apress, 2020. – 449 p.
10. Gopinath Jaganmohan, Venkateshwaran Loganathan. PySide GUI Application Development. – Birmingham: Packt Publishing, 2016. – 144 p.

РАЗДЕЛ III. ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 544.4:547.915

Изучение структурных изменений жирных кислот, происходящих при их термической обработке

Юрий Олегович Веляев¹, к.т.н.,
Сергей Васильевич Дерюгин²,
Александр Рузвельтович Осокин³,
Анастасия Евгеньевна Графова⁴,
Николай Иванович Покинтелица⁵, д.т.н.,
Василий Геннадьевич Еременко⁶,

^{1,2,3,4,5,6} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹ velyaevyo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0372-2458>

² kremenchyk474@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3389-1183>

³ ruzvelt1@ya.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5962-1899>

⁴ eagrafova@sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7288-0850>

⁵ nik.pokintelitsa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0277-9252>

⁶ vgeremenko@sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9192-6285>

Аннотация. Термическая обработка пищевых жиров сопровождается сложными химическими превращениями жирных кислот, характер и глубина которых определяются температурой и продолжительностью нагрева. Целью данной работы являлось изучение структурных изменений жирных кислот, происходящих при различных режимах термического воздействия, и выработка на основе полученных данных рекомендаций по оптимизации кулинарной обработки жиросодержащих продуктов. Объектом исследования служила техническая олеиновая кислота, которую подвергали нагреву при температурах 100, 160 и 180 °C с выдержкой 30 минут, а также при 160 °C с выдержкой 30, 60 и 90 минут. Анализ образцов выполняли методом газовой хромато-масс-спектрометрии после предварительной дериватизации жирных кислот в метиловые эфиры. Мониторинг изменения состава проводили по динамике содержания ключевых компонентов, включая олеиновую, стеариновую, пальмитиновую, линолевую и элаидиновую кислоты, а также продуктов окислительной деструкции – эпоксисоединений и азелаиновой кислоты. Установлено, что при температурах ниже 160 °C доминирующими процессами являются цис-транс-изомеризация и внутримолекулярное окисление, в то время как при превышении 180 °C и длительной выдержке преобладает глубокая деструкция молекул с образованием полимерных продуктов. Показано, что линолевая кислота разрушается значительно быстрее олеиновой, а насыщенные кислоты сохраняют стабильность на протяжении всего эксперимента. Полученные результаты демонстрируют, что контроль температуры и продолжительности нагрева является ключевым фактором сохранения биологической ценности жиров и минимизации накопления вредных транс-изомеров и продуктов окисления. Сформулированы практические рекомендации по выбору режимов кулинарной обработки, позволяющие снизить образование нежелательных соединений в готовых блюдах.

Ключевые слова. Жирные кислоты, термическая деструкция, олеиновая кислота, цис-транс-изомеризация, элаидиновая кислота, окисление липидов, эпоксисоединения, газовая хромато-масс-спектрометрия (ГХ-МС), азелаиновая кислота, трансжиры.

Study of structural changes in fatty acids occurring during their heat treatment

Yuriy O. Velyaev¹, PhD (Eng),
Sergei V. Deryugin²,
Alexander R. Osokin³,
Anastasiia E. Grafova⁴,

Nikolay I. Pokintelitsa⁵, D (Eng),
Vasili G. Eremenko⁶,

(^{1,2,3,4,5,6} Sevastopol State University, Sevastopol, Russia)

¹ velyaevyo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0372-2458>

² kremenchyk474@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3389-1183>

³ ruzvelt1@ya.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5962-1899>

⁴ eagrafova@sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7288-0850>

⁵ nik.pokintelitsa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0277-9252>

⁶ vgeremenko@sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9192-6285>

Abstract. Thermal processing of dietary fats is accompanied by complex chemical transformations of fatty acids, the nature and depth of which are governed by both temperature and heating duration. The aim of the present study was to investigate the structural changes occurring in fatty acids under different thermal treatment regimes and, based on the obtained data, to develop recommendations for optimizing the culinary processing of fat-containing foods. Technical-grade oleic acid was used as the model system and subjected to heating at temperatures of 100, 160, and 180 °C for 30 min, as well as at 160 °C for 30, 60, and 90 min. Sample analysis was performed by gas chromatography–mass spectrometry following preliminary derivatization of fatty acids into their corresponding methyl esters. The monitoring of compositional changes was carried out by tracking the dynamics of key components, including oleic, stearic, palmitic, linoleic, and elaidic acids, as well as oxidative degradation products, namely epoxy compounds and azelaic acid. It was established that at temperatures below 160 °C, cis–trans isomerization and intramolecular oxidation are the predominant processes, whereas at temperatures exceeding 180 °C and under prolonged holding times, deep molecular destruction accompanied by the formation of polymeric products becomes prevalent. Linoleic acid was shown to degrade substantially faster than oleic acid, while saturated fatty acids retained their stability throughout the experiments. The obtained results demonstrate that controlling both temperature and heating duration is a key factor in preserving the biological value of fats and minimizing the accumulation of harmful trans isomers and oxidation products. Practical recommendations are formulated for selecting culinary processing regimes that reduce the formation of undesirable compounds in finished dishes.

Keywords. Fatty acids, thermal degradation, oleic acid, cis-trans isomerization, elaidic acid, lipid oxidation, epoxy compounds, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), azelaic acid, trans fats.

Введение. Пищевые жиры представляют собой сложные смеси [1,2], чей состав определяет не только их кулинарные свойства, но и биологическое воздействие на организм. В основу пищевых жиров входят жирные кислоты, которые различаются между собой по степени насыщенности (насыщенные, моновенасыщенные и полиненасыщенные), что напрямую связано с их происхождением и физическим состоянием продукта. Насыщенные жирные кислоты [3,4], не имеющие двойных связей в углеродной цепи, характеризуются высокой термической стабильностью и твёрдой консистенцией при комнатной температуре. Они преобладают в животных жирах – свином сале, говяжьем жире, сливочном масле, а также в некоторых растительных маслах тропического происхождения, таких как кокосовое и пальмоядровое масло. Эти жиры традиционно используются в кулинарии для высокотемпературной обработки именно благодаря своей устойчивости к окислению. Моновенасыщенные жирные кислоты [5-7], главным представителем которых является олеиновая кислота с одной двойной связью, составляют основу оливкового масла, а также в значительных количествах содержатся в авокадо, орехах и арахисовом масле. Высокоолеиновые сорта подсолнечника и рапса специально культивируются для получения масел с повышенным содержанием этой кислоты, поскольку она сочетает относительную стабильность с биологической ценностью. Полиненасыщенные жирные кислоты [8-10], содержащие две и более двойных связей, подразделяются на несколько семейств, в частности это омега-3 (ω -3) и омега-6 (ω -6). Они являются незаменимыми, то есть должны поступать с пищей. Линолевая кислота (омега-6, 18:2 ω -6) широко представлена в подсолнечном, кукурузном и соевом маслах. Линоленовая кислота (омега-3, 18:3 ω -3) в значительных

количествах содержится в льняном масле, а её длинноцепочечные производные – эйкозапентаеновая (омега-3, 20:5 ω -3, ЭПК, англ. EPA) и докозагексаеновая кислоты (омега-3, 22:6 ω -3, ДГК, англ. DHA) – накапливаются в жирной морской рыбе [11]. Эти кислоты крайне нестабильны и определяют низкую дымность соответствующих масел.

Термическая обработка пищи запускает сложную цепь химических превращений [12,13], характер и глубина которых зависят от двух основных параметров – температуры и продолжительности нагрева. Понимание этих процессов позволяет осознанно выбирать режимы приготовления. Нагрев до 160-180 °С, характерный для большинства кулинарных операций, вызывает преимущественно цис-транс-изомеризацию. Под воздействием тепла часть природных цис-изомеров двойных связей переходит в термодинамически более устойчивые транс-формы. Содержание собственно олеиновой кислоты при этом снижается незначительно, а продукт сохраняет свои основные свойства, хотя и накапливает некоторое количество транс-изомеров. Полиненасыщенные кислоты, такие как линолевая, начинают разрушаться уже на этом этапе, что делает масла с их высоким содержанием наименее пригодными для жарки.

Превышение температурного порога в 180 °С коренным образом меняет картину. При достижении точки дымления запускаются интенсивные окислительные процессы. Кислород воздуха атакует двойные связи, образуя гидропероксиды, которые быстро трансформируются в эпоксиды – соединения с трёхчленным кислородсодержащим циклом. Дальнейшее углубление окисления ведёт к разрыву углеродной цепи с образованием дикарбоновых кислот, в частности азелаиновой. При длительной выдержке в таких условиях начинается полимеризация: молекулы жирных кислот сшиваются друг с другом, образуя высокомолекулярные соединения, которые увеличивают вязкость масла и могут осаждаться в виде лаков и плёнок. На фоне этой массовой полимеризации ненасыщенных компонентов относительное содержание насыщенных кислот в оставшейся жидкой фазе резко возрастает, что и наблюдалось в экстремальных временных экспериментах. Следует отметить, что процессы окисления происходят и при более низких температурах, в то же время при 180 °С и выше они становятся весьма заметны. Полиненасыщенные кислоты при этом разрушаются в первую очередь и даже при умеренном нагреве, что делает использование богатых ими масел для жарки нерациональным как с точки зрения потери пищевой ценности, так и с точки зрения накопления вредных продуктов деструкции.

Попадающие в организм изменённые формы жирных кислот не являются индифферентными соединениями. Многочисленные исследования показывают их способность вмешиваться в метаболические процессы, часто с негативными последствиями. Так транс-изомеры жирных кислот представляют собой наиболее изученную группу с точки зрения влияния на здоровье [14,15]. Их основное патогенетическое действие связано с вмешательством в липидный обмен. Транс-жиры повышают уровень липопротеинов низкой плотности, которые участвуют в формировании атеросклеротических бляшек, и одновременно снижают концентрацию липопротеинов высокой плотности, обладающих защитным действием. Такая двойная атака на липидный профиль делает их мощным фактором риска развития сердечно-сосудистых заболеваний. Кроме того, транс-изомеры способны встраиваться в клеточные мембраны, изменяя их текучесть и нарушая работу мембранных рецепторов и ферментов. Встраиваясь в структуры клеток нервной ткани, они потенциально могут влиять на передачу нервных импульсов. Эпидемиологические исследования также связывают высокое потребление транс-жиров с системным воспалением и эндотелиальной дисфункцией.

Эпоксиды жирных кислот представляют собой менее изученную, но не менее опасную группу соединений [16,17]. Образуясь при окислении ненасыщенных жирных кислот, они обладают высокой химической активностью благодаря напряжённому трёхчленному циклу.

Эта реакционная способность позволяет им алкилировать ДНК и белки, что придаёт им мутагенные и цитотоксические свойства. В экспериментальных исследованиях показана способность некоторых эпоксидов вызывать генетические повреждения. В отличие от трансизомеров, влияние которых накапливается годами, эпоксиды могут оказывать более острое токсическое действие, повреждая клетки печени, почек и других органов, участвующих в детоксикации. При интенсивном нагреве масел эпоксиды могут образовываться в значительных количествах за короткое время, и их содержание в перегретом масле должно прямо коррелировать с температурой и длительностью обработки [18].

С точки зрения гигиены питания, оба эти класса соединений, а именно трансизомеры и эпоксиды, представляют серьёзную опасность для здоровья человека. Если транс-жиры являются фактором долгосрочного хронического риска, системно подрывающим здоровье сосудов и метаболизма, то эпоксиды выступают как более острые токсиканты, способные вызывать прямое повреждение клеток и генетического аппарата. Именно поэтому профилактика их образования путём контроля температуры нагрева и выбора адекватных типов масел является важнейшей задачей как в промышленном производстве продуктов питания, так и в домашней кулинарии.

Таким образом, целью данной работы было изучение возможных структурных изменений жирных кислот, происходящих при их термической обработке и составление рекомендаций по приготовлению пищи, в состав которой входят жирные кислоты, с учётом полученных данных.

Материалы и методы Для изучения влияния температурного фактора на физико-химические изменения жирных кислот использовалась техническая олеиновая кислота (ТУ 9145-172-4731297-94), которая подвергалась влиянию разных температур (100, 160 и 180 °C) в течение 30 минут, а также при 160 °C выдерживалась в течение 30, 60 и 90 минут. Для исследования отбиралась навеска 50 мг, которая помещалась в алюминиевый тигель. Нагрев происходил в программируемой муфельной печи ЭКСП 5.

После термообработки навески кислот подвергались дериватизации с получением метиловых эфиров жирных кислот. Метилирование образцов проводилось растворением навески кислоты в 180 мкл диметилсульфоксида (ХЧ, АО «ЭКОС-1») и 20 мкл 25% метанольного раствора тетраметиламмония гидроксида (ХЧ, Sigma-Aldrich). Растворение проводилось при перемешивании в течение 2 минут, с последующей обработкой 30 мкл йодметаном (ХЧ, Sigma-Aldrich) [19-22]. Далее полученную смесь выдерживали в течение 20 минут при комнатной температуре, а затем добавляли гексан (ХЧ, АО «ЭКОС-1»). Затем пробу интенсивно перемешивали с помощью лабораторного шейкера ПЭ-6300 в течение 5 минут и центрифугировали на центрифуге-вортексе «Микроспин» FV-2400. Полученный гексановый экстракт, содержащий метилированные формы жирных кислот (в основном олеиновую, её изомер, а также примесные жирные кислоты), переносили в вial для проведения анализа.

Хромато-масс-спектрометрическое исследование проводилось в НИЛ «Молекулярная и клеточная биофизика» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» с использованием хроматографа «Хроматэк-Кристалл 5000» с масс-спектрометрическим детектором. Объём пробы, вводимой в хроматограф, составлял 1 мкл. Для разделения компонентов пробы использовали капиллярную колонку HP-5MS UI (Agilent) с неподвижной фазой, представляющую собой 5%-фенил-, 95%-метилполисиликсан. Длина колонки составляла – 30 м, а внутренний диаметр – 0,25 мм. Толщина неподвижной фазы – 0,25 мкм. В качестве газа-носителя использовали гелий марки 6,0, расход которого составлял 1 мл/мин. Температурный режим колонки - градиентный с начальной температурой 80 °C, изотермой 2,0 мин и нагревом 5 °C/мин до 280 °C. На испарителе деление потока соответствовало 20:1, температура 280 °C. Анализ проводили с использованием масс-спектрометрического детектора

с электронной ионизацией (70 эВ) и температурой ионного источника 230 °С. Температура переходной линии составляла 280 °С. Полученный спектр регистрировали в диапазоне масс от 30 до 650 m/z . Для обработки полученной хромато-масс-спектрометрической информации использовали программное обеспечение Хроматэк Аналитик 3.1 (сборка 3.1.2211.3), NIST MS Search v.3.0 и библиотека масс-спектров - NIST 2023 с базой данных от 18 апреля 2023 года. Каждая из липидных формул, представленная в результатах, была получена путем соотнесения ее метилового эфира, образующегося при этерификации карбоксильной группы, с исходной формулой кислоты с открытых баз данных. Дополнительно верификация полученных пиков производилась путём соотнесения их с данными полученными для аналитического стандарта смеси метиловых эфиров жирных кислот (37 штук) фирмы Supelco (CRM 47885). В качестве выходных данных представлено процентное содержание ионов, характерных для указанного соединения, в общем количестве поступающих в детектор ионов, рассчитанное исходя их площадей соответствующих пиков.

Таблица 1.

Изменение содержания жирных кислот в составе технической олеиновой кислоты при различных температурах выдержки её образцов.

Название кислоты	Липидная формула	Массовая доля (% , масс.) компонента в смеси при температуре обработки, °С			
		25	100	160	180
Азелаиновая	–	0.440	3.696	2.876	5.221
Пальмитиновая	16:0	10.767	15.610	15.047	15.832
Линолевая	18:2 ω -6	2.732	2.318	0.914	0.374
Олеиновая	18:1 ω -9(с)	68.880	65.720	55.839	52.134
Элаидиновая	18:1 ω -9(т)	4.222	2.421	5.042	3.780
Стеариновая	18:0	4.770	4.424	6.954	7.600
6,7-эпоксioктадекановая	–	–	–	1.242	1.902
Эпoxиолеиновая	–	–	0.017	2.118	3.675
13-эйкозоновая (цис)	20:1 ω -7(с)	3.517	2.469	4.260	4.687
Эйкозановая	20:0	0.512	0.361	0.927	1.066
13-докозановая (транс)	22:1 ω -9(т)	4.159	2.964	4.780	3.730

Результаты и их обсуждение. Судя по полученным данным, представленным в таблице 1 олеиновая кислота демонстрирует высокую термическую стабильность даже при 180 градусах, а процессы изомеризации и окисления протекают постепенно и предсказуемо. Прежде всего, обращает на себя внимание высокая устойчивость основного компонента, а именно метилового эфира олеиновой кислоты. При нагреве от 100 до 180 °С его содержание снижается весьма незначительно, %: с 65.7 при 100 до 55.8 при 160 и до 52.1 при 180. Это снижение всего на 13% в абсолютном выражении свидетельствует о том, что олеиновая

кислота как таковая не разрушается даже при достаточно жёстком термическом воздействии. Происходящие с ней изменения носят характер структурных перегруппировок, а не полной деструкции углеродного скелета. Классическим подтверждением этого служит динамика элаидиновой кислоты, которая представляет собой транс-изомер олеиновой. Её содержание растёт с повышением температуры, %: 2.4 при 100, 5.0 при 160 и 3.8 при 180. Рост до 160 градусов является прямой иллюстрацией процесса термической изомеризации, когда под воздействием тепла цис-конфигурация двойной связи переходит в более термодинамически выгодную транс-форму. Небольшое снижение её количества при 180 °С может объясняться тем, что элаидиновая кислота, будучи всё же ненасыщенной, начинает медленно втягиваться в процессы окисления.

Окислительные процессы, хотя и присутствуют, но не носят массового характера. Эпоксисоединения начинают появляться только при 160 °С и несколько нарастают к 180 °С, но их суммарное количество остаётся в пределах 5-6%. Это говорит о том, что кислородное окисление идёт, но не является доминирующим процессом. Содержание азелаиновой кислоты, являющейся маркером глубокого расщепления двойной связи, держится на уровне 3-5% процентов без резких скачков, что также подтверждает относительную целостность молекул.

Насыщенные кислоты, такие как пальмитиновая и стеариновая, ведут себя предсказуемо стабильно. Их содержание колеблется в небольших пределах, что и следовало ожидать от насыщенных структур, не склонных к окислению. Пальмитиновая кислота держится в районе 15-15,8%, а стеариновая – 4,4-7,6%. Небольшой рост содержания стеариновой кислоты при 180 °С может быть связан как с её собственной сохранностью, так и с возможными процессами гидрирования или переэтерификации.

Что касается линолевой кислоты, содержащей две двойные связи, она демонстрирует ожидаемую нестабильность. Её доля последовательно падает с 2,3% при 100 °С до 0,9 при 160 и до 0,37 при 180, подтверждая правило: чем выше степень ненасыщенности, тем ниже термическая устойчивость. Длинноцепочечные компоненты, а именно эйкозеновая и докозеновая кислоты, напротив, проявляют хорошую стабильность и даже демонстрируют некоторый рост относительного содержания, что, вероятно, связано с убылью других, менее стабильных фракций.

Таким образом, олеиновая кислота показывает себя как термически достаточно стабильный продукт. Даже при 180 °С она сохраняет свою основную массу, и наблюдаемые изменения сводятся главным образом к изомеризации цис-связей в транс-форму и к умеренному окислению. Нагревание при 180 °С, хоть и ведёт к заметному накоплению транс-изомеров и продуктов окисления, но не уничтожает олеиновую кислоту как таковую, что делает такой нагрев допустимым с точки зрения сохранения основного компонента, хотя и нежелательным, если требуется высокое качество продукта.

Анализ данных, приведённых в таблице 2 демонстрирует изменение содержания компонентов в течение таких промежутков времени как 30, 60 и 90 минут и позволяет проследить кинетику процессов окисления, деструкции и трансформации жирных кислот.

Прежде всего, обращает на себя внимание резкая деградация основного компонента – метилового эфира олеиновой кислоты. Его содержание заметно падает с 58,44% после 30 минут нагрева до 29,35% уже к 60 минутам. В дальнейшем, к 90 минутам, его доля остается на практически том же низком уровне (31,44%), что может свидетельствовать о достижении некоего равновесия либо о том, что большая часть реакционной способности олеиновой кислоты была исчерпана в первый час нагрева. Параллельно с убылью олеиновой кислоты наблюдается устойчивый рост содержания насыщенных компонентов, а именно пальмитиновой и стеариновой кислот. Поскольку насыщенные кислоты значительно более устойчивы к термическому окислению, их накопление может отражать как их собственную

сохранность на фоне разрушения ненасыщенных аналогов, так и возможные процессы распада более длинных углеродных цепей.

Таблица 2

Изменение содержания жирных кислот в составе технической олеиновой кислоты при различных температурах выдержки её образцов.

Название кислоты	Липидная формула	Массовая доля (% масс.) компонента в смеси при температурной обработке в течение времени, мин			
		0	30	60	90
Азелаиновая	–	0.440	3.016	20.355	20.152
Пальмитиновая	16:0	10.767	11.952	24.371	25.592
Линолевая	18:2 ω -6	2.732	0.978	–	–
Олеиновая	18:1 ω -9(с)	68.880	58.443	29.351	31.443
Элаидиновая	18:1 ω -9(т)	4.222	3.997	1.524	1.620
Стеариновая	18:0	4.770	7.112	9.284	9.808
6,7-эпоксиоктадекановая	–	–	1.037	3.305	1.928
Эпоксиолеиновая	–	–	1.755	4.525	2.883
13-эйкозеновая (цис)	20:1 ω -7(с)	3.517	5.215	3.557	2.701
Эйкозановая	20:0	0.512	0.915	1.551	1.504
13-докозановая (транс)	22:1 ω -9(т)	4.159	5.579	2.177	2.369

Прежде всего, обращает на себя внимание резкая деградация основного компонента – метилового эфира олеиновой кислоты. Его содержание заметно падает с 58,44% после 30 минут нагрева до 29,35% уже к 60 минутам. В дальнейшем, к 90 минутам, его доля остается на практически том же низком уровне (31,44%), что может свидетельствовать о достижении некоего равновесия либо о том, что большая часть реакционной способности олеиновой кислоты была исчерпана в первый час нагрева. Параллельно с убылью олеиновой кислоты наблюдается устойчивый рост содержания насыщенных компонентов, а именно пальмитиновой и стеариновой кислот. Поскольку насыщенные кислоты значительно более устойчивы к термическому окислению, их накопление может отражать как их собственную сохранность на фоне разрушения ненасыщенных аналогов, так и возможные процессы распада более длинных углеродных цепей.

Важнейшим индикатором окислительных процессов является появление и накопление эпоксисоединений, которые являются производными эпоксистеариновой кислоты. Их суммарное содержание резко возрастает к 60 минутам нагрева, что указывает на интенсивное присоединение кислорода по двойным связям. К 90 минутам доля эпоксидов несколько снижается, что может говорить об их дальнейшем превращении, которым, например, может быть участие в реакциях полимеризации или распаде с образованием вторичных продуктов

окисления. Еще одним маркером окислительной деструкции служит присутствие азелаиновой кислоты, которая образуется при расщеплении олеиновой кислоты по месту двойной связи. Интересно, что максимум азелаиновой кислоты приходится на 30-минутный рубеж, после чего её содержание снижается, уступая место другим процессам. Линолевая кислота разрушается практически мгновенно и уже после получаса нагрева присутствует лишь в следовых количествах. Длинноцепочечные мононенасыщенные кислоты, а именно эйкозеновая и докозеновая, также демонстрируют неуклонное снижение своих концентраций на протяжении всего эксперимента. Что касается элаидиновой кислоты, то её содержание, падает уже к 60 минутам, что, вероятно, объясняется её высокой реакционной способностью в условиях жесткого термического воздействия: она разрушается быстрее, чем успевает образовываться из цис-формы.

В целом, полученные данные показывают картину двухстадийного процесса. На первом этапе, до 60 минут, доминируют реакции окисления и деструкции: олеиновая кислота интенсивно расходуется на образование эпоксидов, продуктов распада, а также, возможно, участвует в реакциях полимеризации. На втором этапе, от 60 до 90 минут, скорость первичных окислительных процессов снижается, и состав начинает стабилизироваться на новом уровне, представляющем собой смесь устойчивых насыщенных кислот и вторичных продуктов окисления. Таким образом, если технологическая задача предполагает сохранение свойств, присущих именно олеиновой кислоте, нагрев продолжительностью более 30 минут является критическим и ведет к необратимой порче продукта, на что надо обратить особое внимание при приготовлении кулинарных изделий [23].

Сопоставляя данные двух серий экспериментов, можно отметить, что главное различие между этими двумя выборками заключается в судьбе концентрации основного компонента – олеиновой кислоты. В первой серии, где исследовалось влияние времени, мы наблюдали падение содержания олеиновой кислоты уже к 60 минутам. Это говорит о том, что при высоких температурах время становится критическим фактором, а именно достаточно часа, чтобы полностью разрушить структуру обрабатываемого объекта. Во второй серии, где изменялась температура, олеиновая кислота продемонстрировала относительную стабильность, снизившись всего на 13% даже при максимальном нагреве. Из этого следует вывод, что существует температурный порог, выше которого механизм разрушения меняется с плавной трансформации на лавинообразную деструкцию. На этот фактор следует обратить внимание не только при приготовлении кулинарных изделий, но и при других технологических операциях, в которых может быть задействована данная группа кислот, например, для промышленного или лабораторного получения модифицированных сорбентов на основе диоксида кремния, которые могут применяться в пробоподготовке и жидкостной хроматографии [24-28].

Поведение элаидиновой кислоты в обоих экспериментах подтверждает это предположение. В температурной серии мы видим классический рост трансизомера при нагреве, что является обратимым и ожидаемым процессом цис-транс изомеризации. Во временной серии содержание элаидиновой кислоты падает. Это означает, что в жестких условиях, соответствующих первому эксперименту, даже термически более устойчивая транс-форма разрушается и втягивается в процессы окисления и полимеризации. Там, где при умеренном нагреве мы видим лишь «переворачивание» молекулы, при перегреве начинается её разрушение [29,30].

Окислительные процессы также протекают по-разному. В умеренном температурном режиме эпоксиды и азелаиновая кислота накапливаются плавно, оставаясь в пределах 5-6%, что указывает на контролируемое окисление. Во временной серии содержание эпоксидов сначала резко увеличивается к 60 минутам, а затем снижается, уступая место вторичным реакциям, а азелаиновая кислота, достигнув пика к 30 минутам, также идет на убыль. То есть

первичные продукты окисления не накапливаются, а сразу вступают в дальнейшие превращения, образуя полимеры и высокомолекулярные соединения, которые уже не детектируются стандартными методами анализа [31,32].

Поведение насыщенных кислот также интересно, в мягком температурном эксперименте пальмитиновая и стеариновая кислоты ведут себя стабильно, лишь слегка флуктуируя. В жёстком временном эксперименте стеариновая и пальмитиновая кислоты демонстрируют рост, что вероятно обусловлено не столько химическими превращениями жирных кислот их углеродной группы, например, для стеариновой это олеиновая, элаидиновая и ленолевая, сколько, вероятно, общей деструкцией и полимеризацией кислот в более тяжёлые не определяемые фракции за счёт чего так и перераспределяется массовая доля компонентов в определяемой пробе [33-37].

По итогу можно выстроить следующую картину термической эволюции технической олеиновой кислоты. При температурах до 180 °C и даже при длительной выдержке основной процесс – это цис-транс изомеризация и умеренное окисление. Олеиновая кислота в основном сохраняется, и продукт остаётся узнаваемым. Однако при превышении критического температурного порога, включается механизм необратимой деструкции. В этом за первый час происходит массовое окисление и образование эпоксидов, а ко второму часу начинается доминирование полимеризации, превращающей масло в полимерный остаток, обогащённый насыщенными кислотами. Таким образом, температура определяет, пойдёт ли процесс по пути обратимых превращений или по пути необратимого разрушения, а время при запредельной температуре определяет глубину этого разрушения.

Закключение. 1. Температура нагрева кулинарных жиров не должна превышать 180 °C, поскольку при более высоких значениях начинается значительное разрушение исходного жирнокислотного состава: уже к 60 минутам высокотемпературного воздействия олеиновая кислота практически исчезает, уступая место насыщенным кислотам, эпоксидам и полимерам.

2. Следует минимизировать время теплового воздействия, так как даже при умеренных температурах длительное томление или жарка ведут к накоплению нежелательных транс-жиров за счёт процесса цис-транс-изомеризации. Накопление элаидиновой кислоты происходит пропорционально росту температуры, однако и в относительно щадящем температурном режиме содержание транс-изомеров увеличивается со временем.

3. Рекомендуются использовать жиры с высокой термической стабильностью, в частности топлёное масло, которое практически не образует транс-изомеров из-за отсутствия двойных связей в структуре, либо применять методы приготовления, исключая длительный нагрев жиров.

4. Необходимо ограничивать контакт масла с кислородом воздуха во время нагрева: использование закрытой посуды, минимальное перемешивание и отказ от повторного использования масла для жарки позволяют значительно снизить уровень окисленных соединений в готовом блюде.

5. Следует отказываться от повторного использования фритюрных масел, поскольку многократный нагрев одного и того же масла приводит к кумулятивному накоплению продуктов окисления и полимеризации, делая его непригодным для дальнейшего использования с точки зрения безопасности питания.

6. Оптимизация технологии приготовления пищи в целом должна строиться на соблюдении строгого контроля температуры, минимизации времени теплового воздействия при высоких температурах и осознанном выборе масла, изначально устойчивого к нагреву, что позволит сохранить пищевую ценность продуктов и избежать накопления вредных соединений, образующихся при термической деструкции жиров.

Список литературы

1. Parlat, S. S. Effects of dietary fats or oils supplementations on fatty acid composition of yolk of brown eggs / S. S. Parlat, O. B. Cital, I. Yildirim // *Asian Journal of Chemistry*. – 2010. – Vol. 22, No. 2. – P. 1445-1452. – EDN YCBNNV;
2. Dietary fats and membrane function: implications for metabolism and disease / A. J. Hulbert, N. Turner, L. H. Storlien, P. L. Else // *Biological Reviews*. – 2005. – Vol. 80, No. 1. – P. 155-169. – DOI 10.1017/S1464793104006578. – EDN HKYVDT;
3. Saturated Fatty Acids and Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids Improve Metabolic Parameters in Ovariectomized Female Mice / Ke. Sui, A. Yasrebi, N. Malonza [et al.] // *Endocrinology*. – 2023. – Vol. 164, No. 6. – DOI 10.1210/endo/bqad059. – EDN YBKCGY;
4. Zou, Qi. Enterococcus faecalis requires unsaturated fatty acids to overcome toxicity of environmental saturated fatty acids / Qi. Zou, H. Dong, J. E. Cronan // *Microbiology*. – 2025. – Vol. 171, No. 9. – DOI 10.1099/mic.0.001602. – EDN WADITT;
5. Distinct effects of saturated and monounsaturated fatty acids on β -cell turnover and function / K. Maedler, G. A. Spinas, D. Dyntar [et al.] // *Diabetes*. – 2001. – Vol. 50, No. 1. – P. 69-76. – DOI 10.2337/diabetes.50.1.69. – EDN LSSTGH;
6. Monounsaturated fatty acids and platelet aggregation in aged women / F. J. Sanchez-Muniz, J. Benedi, S. Rodenas [et al.] // *Atherosclerosis*. – 1995. – Vol. 115. – P. S109. – EDN AOPTKV;
7. Fatty Acids Quality in Middle Eastern Traditional Dishes, Arabic Sweets and Market Foods Frequently Consumed in Lebanon / M. Hoteit, E. Zoghbi, A. Rady [et al.] // *Nutrients*. – 2021. – Vol. 13, No. 7. – P. 2462. – DOI 10.3390/nu13072462. – EDN ERREBD;
8. Kolanowski, W. Enrichment of food products with polyunsaturated fatty acids by fish oil addition / W. Kolanowski, G. Laufenberg // *European Food Research and Technology*. – 2006. – Vol. 222, No. 3. – P. 472-477. – DOI 10.1007/s00217-005-0089-8. – EDN BQWHXR;
9. Functional food characteristics in organic food products—the perspectives of Italian consumers on organic eggs enriched with omega-3 polyunsaturated fatty acids / G. Migliore, G. Rizzo, A. Bonanno [et al.] // *Organic Agriculture*. – 2022. – Vol. 12, No. 2. – P. 149-161. – DOI 10.1007/s13165-022-00395-1. – EDN JHJRTM;
10. Modeling of fatty acid composition of combined food products / A. Kapiiko, N. Tkachenko, M. Mardar, D. Honcharov // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2021. – Vol. 3, No. 3(59). – P. 27-33. – DOI 10.15587/2706-5448.2021.235246. – EDN NUOHTX;
11. Comparative Bioavailability of DHA and EPA from Microalgal and Fish Oil in Adults / E. Bailey, J. Wojcik, M. Rahn [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2025. – Vol. 26, No. 19. – P. 9343. – DOI 10.3390/ijms26199343. – EDN FUIBSK;
12. Effect of heat treatment on micronutrients, fatty acids and some bioactive components of milk / M. Kilic-Akyilmaz, B. Ozer, T. Bulat, A. Topcu // *International Dairy Journal*. – 2022. – Vol. 126. – P. 105231. – DOI 10.1016/j.idairyj.2021.105231. – EDN KRKBW;
13. Effects of homogenization and heat treatment on fatty acids in milk from five dairy species / R. Fan, R. Shi, Zh. Ji [et al.] // *Food Quality and Safety*. – 2022. – Vol. 7. – DOI 10.1093/fqsafe/fyac069. – EDN OGHLBV;
14. Crupkin, M. Detrimental impact of trans fats on human health: Stearic acid-rich fats as possible substitutes / M. Crupkin, A. Zambelli // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. – 2008. – Vol. 7, No. 3. – P. 271-279. – DOI 10.1111/j.1541-4337.2008.00045.x. – EDN XWCDDU;

15. Fan, H. Rethinking nutritional villains: A trans-fatty acid identified to boost immunotherapy / H. Fan, F. Q. Zhang, J. Chen // *Clinical and Translational Medicine*. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – DOI 10.1002/ctm2.1537. – EDN JOIUSR;
16. Detection of omega-3 oxylipins in human plasma and response to treatment with omega-3 acid ethyl esters / G. C. Shearer, W. S. Harris, T. L. Pedersen, J. W. Newman // *Journal of Lipid Research*. – 2010. – Vol. 51, No. 8. – P. 2074-2081. – DOI 10.1194/M900193-JLR200. – EDN NZWNUB;
17. Oleate Epoxides Derived from Palm Oil as New Anticancer Agents: Synthesis, Cytotoxicity Evaluation, and Molecular Docking Studies Against FASN Protein / B. R. Fatmayanti, Jumina, B. Purwono [et al.] // *ChemistrySelect*. – 2024. – Vol. 9, No. 17. – DOI 10.1002/slct.202400752. – EDN VZCPXF;
18. Веляев, Ю. О. Физико-химические процессы, происходящие в процессе кулинарной обработки, и их влияние на свойства пищевых систем / Ю. О. Веляев. – Севастополь : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2025. – 189 с. – ISBN 978-5-6049375-6-3. – EDN КОНТJK.
19. Сезонная динамика липидов тканей двустворчатого моллюска *Cerastoderma glaucum* псевдолиторальной зоны / А. В. Бородина, К. А. Пименов, Ю. О. Веляев, А. Р. Осокин // *Техника и технология пищевых производств*. – 2024. – Т. 54, № 3. – С. 558-570. – DOI 10.21603/2074-9414-2024-3-2528. – EDN MZEMQB.
20. Изучение различных методологических подходов к извлечению жирнокислотной фракции из сложной биологической матрицы и идентификация её состава с помощью хромато-масс-спектрометрии / Ю. О. Веляев, А. В. Бородина, К. А. Пименов, А. Р. Осокин // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2025. – Т. 25, № 1. – С. 73-89. – DOI 10.17308/sorpchrom.2025.25/12796. – EDN VHIBFT.
21. Borodina, A. V. Features of Lipid Accumulation in Striped Venus Clam *Chamelea gallina* in the Sublittoral Zone of the Crimean Coast (Black Sea) / A. V. Borodina, Yu. O. Velyaev // *Annales. Series Historia Naturalis*. – 2025. – Vol. 35, No. 2. – P. 319-328. – DOI 10.19233/ASHN.2025.34. – EDN NYTWDQ.
22. Веляев, Ю. О. Методы исследования пищевых систем : Учебное пособие / Ю. О. Веляев. – Москва : ООО "Центркаталог", 2025. – 188 с. – ISBN 978-5-907825-17-8. – EDN GAGBIM.
23. Получение гелирующего агента для пищевой промышленности из отходов культивации красных водорослей Черноморского бассейна / Ю. О. Веляев, О. А. Мерненко, Н. И. Покинтелица [и др.] // *Пищевая промышленность*. – 2025. – № 1. – С. 6-10. – DOI 10.52653/PPI.2025.1.1.001. – EDN AYUKKQ;
24. Майоров, Д. В. Структурно-поверхностные и сорбционные свойства диоксида кремния, получаемого из нефелинсодержащего сырья / Д. В. Майоров, Ю. О. Веляев // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2022. – Т. 22, № 5. – С. 725-736. – DOI 10.17308/sorpchrom.2022.22/10715. – EDN EQQWZE;
25. Modification of Silica-Based Sorbent for Chromatographic Processes Using Nepheline Concentrate / Y. O. Velyaev, D. V. Mayorov, K. A. Pimenov, H. C. Silva // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2025. – Vol. 16, No. 6. – P. 2015-2020. – DOI 10.1134/S2075113325060012. – EDN BBFCYC;
26. Synthesis of Methylated Silica from Mineral Silicate Raw Materials / Y. O. Velyaev, D. V. Mayorov, K. A. Pimenov [et al.] // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2025. – Vol. 16, No. 6. – P. 1927-1934. – DOI 10.1134/S2075113325702235. – EDN XCQFSE;

27. Gan, Y. Increased stearic acid grafting density on silica nanoparticles via alumina-activation / Y. Gan [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2024. – Vol. 678. – P. 161077. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.161077
28. Azizova, L. R. The Role of Surface Complexes in Ketene Formation from Fatty Acids via Pyrolysis over Silica / L. R. Azizova [et al.] // *Journal of the American Chemical Society*. – 2023. – Vol. 145, No. 49. – P. 26592–26610. – DOI: 10.1021/jacs.3c06966
29. Wei, J. Mechanism of methyl elaidate on the thermal oxidation behavior / J. Wei, J. Cui, Y. Zhou [et al.] // *Food Research International*. – 2024. – Vol. 197, Pt. 1. – P. 115227. – DOI: 10.1016/j.foodres.2024.115227.
30. Determination of the Activation Energy of the Thermal Isomerization of Oleic Acid with Raman Spectroscopy and Partial Least Squares Regression / A. Watanabe, Y. Numata // *Spectroscopy Journal*. – 2025. – Vol. 3, No. 2. – P. 17. – DOI: 10.3390/spectroscj3020017.
31. Effects of high-temperature stages on the physicochemical properties and oxidation products formation of rapeseed oil with carnosic acid / Y. Zhu, Y. Luan, C. Chai [et al.] // *Food Chemistry*. – 2025. – Vol. 465, Part 1. – P. 141960. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.141960
32. Influence of frying conditions on quality attributes of frying oils: Kinetic investigation of polar compounds / J. Chen, L. Zhang, X. Guo [et al.] // *Food Chemistry: X*. – 2025. – Vol. 29. – P. 102673. – DOI: 10.1016/j.fochx.2025.102673
33. Khaled, B.M. Detection of the changes in fatty acid composition and physicochemical properties in selected edible oils heated at different degrees of time / B.M. Khaled, M. Biswas, A.A. Sina [et al.] // *Food Chemistry Advances*. – 2024. – Vol. 4. – P. 100716. – DOI: 10.1016/j.focha.2024.100716
34. Chen, J. Influence of triacylglycerol structure on the formation of lipid oxidation products in different vegetable oils during frying process / J. Chen, L. Zhang, X. Guo [et al.] // *Food Chemistry*. – 2025. – Vol. 468. – P. 141783. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.141783
35. He, C. Revealing the heat-induced cis-trans isomerization of unsaturated fatty acids in camellia oil / C. He, L. Qin, J. Yang, Y. Zhu // *LWT – Food Science and Technology*. – 2023. – Vol. 173. – P. 114293. – DOI: 10.1016/j.lwt.2022.114293
36. Cis-trans isomerism-driven thermal and phase transitions in oleic and elaidic acids and their derived polymers / M. Wang, H. Yu, J. Jiang [et al.] // *Polymer*. – 2025. – Vol. 317. – P. 127954. – DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127954
37. Гниломедова Н.В., Идентификация кристаллов тартратных солей в составе осадка вин // Гниломедова Н.В., Аникина Н.С., Весютова А.В., Олейникова В.А., Гавриш В.М., Чайка Т.В. // *Техника и технология пищевых производств*. 2022. Т. 52. № 3. С. 490-499.

УДК 664

Критерии выбора и анализ применения упаковочного картона из соломы, тростника и грибного мицелия в пищевых производствах. Сравнение с традиционным гофрокартоном

Антон Георгиевич Карлов¹, к.т.н.,
Максим Сергеевич Калашников²,

^{1,2} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹ agkarlov@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6238-3615>

² maksonselectro@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8680-3720>

Аннотация: В работе проведён сравнительный анализ упаковочного картона в пищевых производствах, изготовленного из нетрадиционных видов сырья, а именно пшеничной соломы, сахарного тростника и грибного мицелия с традиционным гофрокартоном. Рассмотрена роль упаковочных материалов в обеспечении сохранности пищевой продукции, удобства транспортировки, хранения и снижения экологической нагрузки. Проанализированы технологические процессы получения материалов, их физико-механические и экологические свойства. Особое внимание уделено таким критериям, как прочность, влагопоглощение, амортизационные свойства, биоразлагаемость, углеродный след, энергозатраты на производство и возможность контакта с пищевыми продуктами. Показано, что традиционный гофрокартон лидирует по механическим свойствам, однако альтернативные материалы обладают повышенными показателями биоразлагаемости и оставляют меньший углеродный след, что делает их перспективными для пищевого применения и производства гибридных композитов. Установлено, что картон из тростника наиболее близок к традиционным целлюлозным материалам по эксплуатационным характеристикам, картон из соломы перспективен для упаковки сухих пищевых продуктов, а мицелиевые композиты целесообразны для защитной упаковки хрупкой продукции. При этом альтернативные материалы обладают повышенными показателями биоразлагаемости и оставляют меньший углеродный след, что делает их перспективными для пищевого применения и производства гибридных композитов.

Ключевые слова: упаковочный картон, гофрокартон, солома, сахарный тростник, грибной мицелий, пищевые производства, биоразлагаемая упаковка, альтернативное сырьё, экологичность упаковки, критерии выбора.

Selection criteria and analysis of the use of packaging cardboard made of straw, reed and mushroom mycelium in food production. Comparison with traditional corrugated cardboard

Anton G. Karlov¹, PhD (Eng),
Maksim S. Kalashnikov²,

(^{1,2}Sevastopol State University, Sevastopol, Russia)

¹ agkarlov@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6238-3615>

² maksonselectro@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8680-3720>

Abstract: The work presents a comparative analysis of packaging paperboard used in food production and made from non-traditional raw materials, namely wheat straw, sugarcane bagasse and fungal mycelium, in comparison with traditional corrugated board. The role of packaging materials in ensuring food product preservation, convenient transportation and storage, and reducing environmental impact is considered. The technological processes for obtaining the materials, as well as their physical, mechanical and environmental properties, are analysed. Special attention is paid to such criteria as strength, moisture absorption, cushioning properties, biodegradability, carbon footprint, production energy consumption and the possibility of contact with food products. It is shown that traditional corrugated board leads in mechanical properties, versatility of application and technological maturity of production. It is established that sugarcane bagasse board is the closest to traditional cellulose-based materials in terms of performance characteristics, straw-based board is promising for packaging dry food products, and mycelium composites are suitable for protective

packaging of fragile products. At the same time, alternative materials have higher biodegradability and a lower carbon footprint, which makes them promising for niche applications and the production of hybrid composites.

Keywords: *packaging paperboard, corrugated board, straw, sugarcane bagasse, fungal mycelium, food production, biodegradable packaging, alternative raw materials, packaging sustainability, selection criteria.*

Введение. В пищевых производствах, промышленности упаковка выполняет следующие важные функции: сохранение качества и безопасности продуктов, обеспечение удобства транспортировки и хранения, а также информирование потребителя. Традиционный гофрокартон, изготавливаемый из первичной целлюлозы и макулатуры, широко используется благодаря высокой механической прочности, низкой стоимости и возможности вторичной переработки. Однако его производство связано с вырубкой лесов, высоким водопотреблением и значительным углеродным следом. В последние годы активно разрабатываются альтернативные виды упаковочного картона из сельскохозяйственных отходов, таких как солома, багасса сахарного тростника и даже из грибного мицелия. Эти материалы позиционируются как экологически более безопасные, однако их физико-механические и барьерные свойства, пригодность для прямого контакта с пищевыми продуктами, а также реальные области применения в пищевых производствах изучены недостаточно. Производители сталкиваются с проблемой выбора [1]: какой материал обеспечит необходимую прочность, влагостойкость, обеспечит большую экологичность. Поэтому цель данной статьи – разработать общие критерии выбора и провести сравнительный анализ применения упаковочного картона из соломы, тростника и грибного мицелия в пищевых производствах в сравнении с традиционным гофрокартоном.

Материалы и методы.

Стандартный картон. Перед оценкой и сравнением гофрокартона с иными видами упаковочного картона из альтернативных материалов проанализируем обычный картон. Картон представляет собой листовой материал растительного происхождения, изготавливаемый из волокон целлюлозы. Внешний вид стандартного листа картона представлен на рисунке 1. Чёткой границы между бумагой и картоном не существует. Согласно ГОСТ Р 536362009 в общем значении термин “бумага” также может быть применён для понятия “картон” [2]. Фактически, бумагой считается материал с массой квадратного метра до 250 г, тогда как картоном называют материал с большей толщиной и массой квадратного метра. На практике к картону относят материалы плотностью от 150–200 г/м² при толщине от 0,2 мм.



Рис.1. Внешний вид стандартного листа картона

Производство картона начинается с выбора сырья. Основными источниками целлюлозных волокон служат:

Первичная целлюлоза, получаемая из древесины хвойных и лиственных пород. Делится на белёную и небелёную;

Макулатура или же вторичное волокно;

Смеси первичного и вторичного волокна в различных пропорциях.

Технологический процесс включает несколько ключевых этапов [3-4]. Древесину измельчают и подвергают варке в щелочной среде для удаления лигнина – связующего вещества, скрепляющего волокна, который делает волокна жёсткими, хрупкими и вызывает

пожелтения. Полученную целлюлозу промывают, при необходимости отбеливают, затем смешивают с водой и подают на бумагоделательную машину. На этой машине происходит отлив, прессование и сушка полотна, внешний вид с указанием основных элементов представлен на рисунке 2. В зависимости от числа слоёв и способа их соединения получают однослойный или многослойный картон.

Картон классифицируют по нескольким признакам. По назначению выделяют упаковочный, полиграфический, строительный и технический картон. По производственным методам [5] и составу сырья различают несколько основных типов:

SBB/SBS (Solid Bleached Board) – твёрдый цельный картон из 2–4 слоёв белёной сульфатной целлюлозы, часто с мелованным покрытием. Обладает отличными печатными свойствами, используется для упаковки пищевых продуктов, табачных изделий, парфюмерии.

SUB (крафт-картон) – твёрдый картон из небелёной целлюлозы, имеет натуральный коричневый оттенок. Экологичен, так как не содержит химических примесей, но пригоден только для черно-белой печати.

FBB (Folding Boxboard) – многослойный картон с выбеленным наружным слоем и серо-коричневой основой из смеси древесной целлюлозы и макулатуры. Самый популярный коробочный материал.

WLC (White Lined Chipboard) – макулатурный картон из 3–4 слоёв с содержанием вторичного сырья не менее 60%. Прямой контакт с пищевыми продуктами без дополнительного барьерного слоя недопустим.

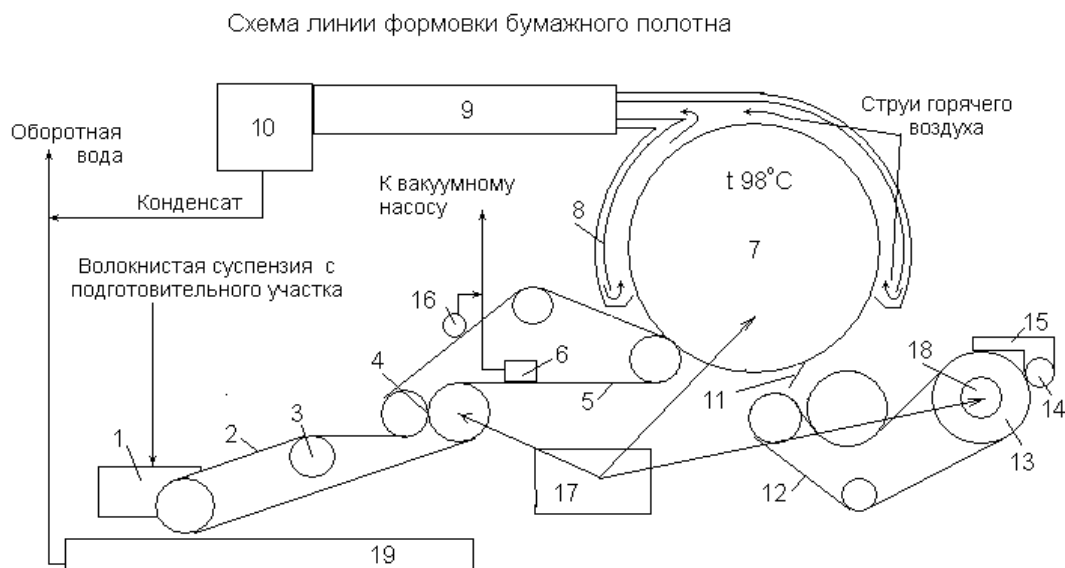


Рис. 2. Внешний вид бумагоделательной машины.

Наименования элементов, представленных на рис. 2: 1 – Наливной узел. 2 – Сеточный стол. 3 – Гранёный валик. 4 – Прессовый узел. 5 – Суконный транспортер. 6 – Вакуумная камера. 7 – Сушильный барабан (Янки-цилиндр). 8 – Колпак скоростной сушки. 9 – Теплообменник. 10 – Конденсатор. 11 – Нож-шабер. 12. Выходной конвейер. 13 – Разгрузочный барабан. 14 – Бумажный роль. 15 – Смоточный узел. 16 – Моечный узел. 17 – Электромеханический привод. 18 – Клиноременный вариатор. 19 – Лоток.

Картон по праву считается одним из наиболее экологичных упаковочных материалов. Основные факторы, определяющие его экологичность:

Возобновляемость сырья: картон производится из растительных волокон – возобновляемого природного ресурса.

Высокая степень переработки: в мире перерабатывается порядка 80% картонной тары. Макулатура активно используется как вторичное сырьё для производства новых картонных изделий.

Отсутствие токсичных веществ: картон не содержит токсичных компонентов, не разлагается на микропластик и не оказывает негативного воздействия на окружающую среду при утилизации.

Биоразлагаемость: в естественных условиях картон разлагается за несколько месяцев при достаточной влажности и доступе микроорганизмов.

В то же время производство первичной целлюлозы из древесины связано с вырубкой лесов, высоким водопотреблением и значительными выбросами парниковых газов. Углеродный след картона составляет, по разным оценкам, от 1,2 до 1,5 кг CO₂ – экв. на килограмм материала. Поэтому всё более широкое распространение получает картон из макулатуры, который позволяет снизить экологическую нагрузку.

В таблице 1 указаны основные свойства, которые являются обобщёнными средними значениями для картона типа FBB и крафт-картона или же стандартного упаковочного картона.

Таблица 1

Физико-механические и эксплуатационные свойства стандартного упаковочного картона

Показатель	Значение	Примечание
Плотность, г/м ²	200-400	В зависимости от типа и назначения
Толщина, мм	0,2-2,0	Для многослойных марок до 5 мм
Сопротивление продавливанию, кПа	600-1200	Определяется плотностью и степенью проклейки
Жёсткость при изгибе, Н/м ²	Высокая	Обеспечивает сохранение формы, зависит от длины волокон и каландрирования
Амортизация (поглощение удара)	Низкая	Уступает гофрированным и пористым материалам
Влагопоглощение (24 ч), %	30-45	Требует дополнительной обработки при контакте с жидкостью
Воздухопроницаемость, мкм/(Па×с)	1-10	Зависит от степени проклейки
Биоразлагаемость, дни	90-400	Зависит от условий
Углеродный след, кг CO ₂ – экв./кг	1,2-1,5	Выше при использовании первичной целлюлозы, ниже при высокой доле макулатуры
Энергозатраты на изготовление	Средние	Зависит от требований к картону, но основные затраты идут на варку целлюлозы и сушку

Благодаря сочетанию прочности, лёгкости, невысокой стоимости и экологичности картон используется в самых разных сферах: от упаковки продуктов питания и напитков [6] до производства коробок для бытовой техники и электроники. Картонные изделия могут быть

произведены из переработанной бумаги, что дополнительно повышает их экологическую привлекательность.

Ограничением картона является его чувствительность к влаге: без специальной пропитки или ламинирования он не подходит для упаковки жидких и сильно увлажнённых продуктов. Для жидких и влажных продуктов обычно используются комбинированные материалы (например, картон с полимерным покрытием), либо картон применяется для вторичной транспортной упаковки (ящики, лотки) широкого спектра товаров – от продуктов питания до промышленных изделий.

Гофрокартон. Гофрокартон представляет собой разновидность картона, отличающуюся слоистой структурой, в которой чередуются плоские и волнистые слои, то есть лайнер и флутинг [7-8]. Внешний вид гофрокартона и его структуры представлен на рисунке 3 а, б. Именно такая конструкция обеспечивает материалу уникальное сочетание высокой прочности, жёсткости, амортизирующих свойств и малого веса.

Структура и состав

Гофрокартон состоит из следующих элементов:

Лайнеры – гладкие внешние слои, изготовленные из плотной бумаги. Лайнеры могут быть двух типов: крафт-лайнер (80% чистой целлюлозы и 20% полуцеллюлозы или вторичного сырья) и тест-лайнер (более дешёвый, изготавливаемый в основном из макулатуры). Внешний вид лицевого слоя позволяет наносить полноцветную печать.

Флутинг – волнистая прослойка, обеспечивающая жёсткость, прочность и амортизацию. Флутинг может изготавливаться из натуральной целлюлозы (для высококачественной упаковки), из смеси полуцеллюлозы с макулатурой (для транспортной тары) или из 100% вторичного сырья (для недорогой тары).

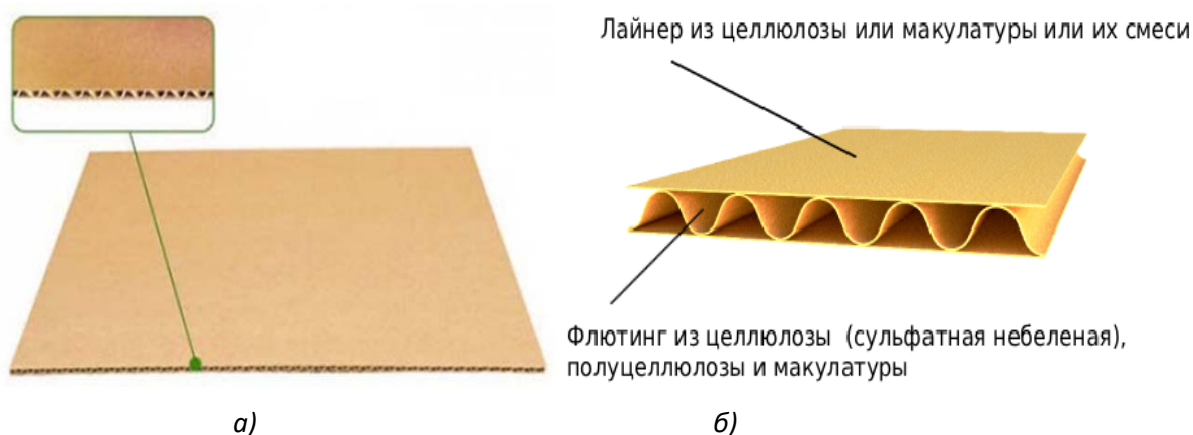


Рис. 3. Гофрокартон в а) общем виде и б) разрезе, с отображением структуры

По количеству слоёв различают следующие основные виды гофрокартона:

Двухслойный – состоит из одного плоского и одного гофрированного слоя. Обозначается буквой «Д». Применяется для обёртки и защиты лёгких товаров, а также как демпфирующий слой.

Трёхслойный – наиболее распространённый тип: два плоских слоя (наружный и внутренний) и один гофрированный между ними. Обозначается буквой «Т». Используется для большинства транспортных коробок и потребительской упаковки.

Пятислойный – три плоских и два гофрированных слоя. Обозначается буквой «П». Применяется для тяжёлых грузов и изделий, требующих повышенной защиты.

Семислойный – максимальное количество слоёв, обеспечивающее наивысшую прочность. Используется для особо тяжёлых и хрупких грузов.

Кроме того, выделяют микрогофрокартон, у которого гофра совсем малой высоты. Предназначен для мелкой потребительской упаковки и сувенирной продукции.

Важной характеристикой гофрокартона является тип гофрированного слоя, определяемый высотой и шагом волны. Основные профили:

Профиль Е – высота волны 1,1–1,6 мм, малый шаг. Обеспечивает хорошую плоскостность, пригоден для высококачественной печати.

Профиль В – высота 2,5–3 мм, средний шаг. Хорошее соотношение прочности и толщины.

Профиль С – высота 3,5–4 мм, крупный шаг. Наилучшая амортизация и сопротивление сжатию.

Профиль А – высота 4,5–5 мм, максимальный шаг. Высокая жёсткость, применяется для крупногабаритной упаковки.

В таблице 2 указаны обобщённые средние значения основных характеристик гофрокартона.

Таблица 2

Физико-механические и эксплуатационные свойства гофрокартона

Показатель	Значение	Примечание
Плотность, г/м ²	350-500	В зависимости от типа лайнеров
Толщина, мм	3-5	Для трёхслойного гофрокартона, определяется профилем гофры
Сопротивление продавливанию, кПа	900-1300	Характеризует прочность плоского листа
Жёсткость при изгибе, Н×м ²	Высокая	Благодаря гофрированной структуре
Амортизация (поглощение удара)	Средняя	Выше, чем у цельного картона, но ниже, чем у пенопластов
Влагопоглощение (24 ч), %	35-50	Зависит от качества лайнеров и наличия влагозащитной пропитки
Воздухопроницаемость, мкм/(Па×с)	5-20	Выше, чем у цельного картона, из-за гофрированного слоя
Биоразлагаемость, дни	180-240	Зависит от условий
Углеродный след, кг СО ₂ – экв./кг	1,2-1,5	Может быть намного ниже при использовании 100% макулатуры
Энергозатраты на изготовление	Средние	Зависит от требований к картону, но основные затраты идут на варку целлюлозы и сушку

Производство гофрокартона включает несколько последовательных этапов [7-8]:

Подготовка сырья – картон для плоских слоёв и бумага для гофрированного слоя поступают в рулонах.

Гофрирование – бумага для флутинга проходит через нагретые гофрированные валы, которые придают ей волнистую форму. Затем на вершины гофров наносится клей, основой которого обычно является крахмал.

Склеивание – гофрированный слой приклеивается к плоскому лайнеру. В зависимости от количества слоёв процесс повторяется несколько раз.

Сушка и резка – полученное полотно гофрокартона сушится и затем разрезается на листы нужного формата.

Внешний вид производственной линии гофрокартона представлен на рисунке 4.

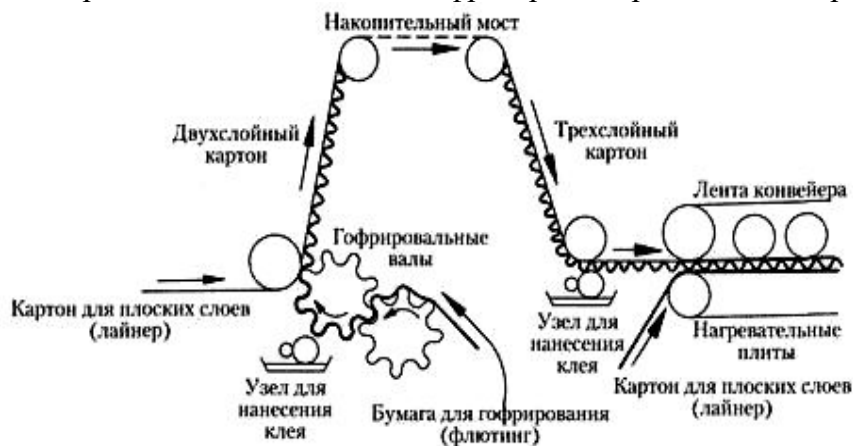


Рис. 4. Внешний вид производственной линии гофрокартона

Гофрокартон считается одним из самых экологичных упаковочных материалов по следующим причинам:

Использование вторичного сырья – для производства гофрокартона широко применяется макулатура, что снижает нагрузку на лесные ресурсы.

Полная биоразлагаемость – в естественных условиях гофрокартон разлагается без образования токсичных остатков.

Возможность многократной переработки – гофрокартон может быть переработан в макулатуру и использован для производства новых партий материала.

Отсутствие вредных примесей – в составе гофрокартона нет отдушек, красителей и агрессивных химических компонентов, что важно для безопасного контакта с пищевыми продуктами.

В то же время гофрокартон имеет ограниченную влагостойкость: при длительном контакте с водой он теряет прочность и может разрушаться. Поэтому для упаковки пищевых товаров, требующих защиты от влаги, то есть замороженных продуктов, свежего мяса, рыбы и тому подобного, гофрокартон обычно используется в качестве вторичной упаковки – ящиков и лотков, в которые помещаются первичные упаковки: бутылки, банки, пакеты, термоусадочная плёнка. Такое применение также обосновывается высокой конструкционной прочностью [9].

Не стоит забывать, что гофрокартон является самым универсальным упаковочным материалом [10]. Он используется: для транспортной упаковки продуктов питания, напитков, электроники, мебели, бытовой техники; в логистике и складском хозяйстве как материал коробок, лотков, перегородок; в рекламной продукции, являясь дисплеем, стойкой, постером; в строительстве в качестве временного ограждения или подстилочного материала.

Единственной областью, где гофрокартон проигрывает альтернативам, является прямая упаковка жидких и продуктов с повышенной влажностью, а также длительное хранение во влажных условиях без дополнительной защиты.

Упаковочный картон из соломы. Солома – один из самых доступных и недооценённых сельскохозяйственных отходов. Ежегодно в мире образуются миллионы тонн соломы, которая в лучшем случае используется как подстилка для скота или сжигается на полях, загрязняя атмосферу. В последние годы всё больше исследований посвящено переработке соломы в целлюлозу для производства бумаги и картона в целях различного

применения, в том числе для упаковки пищевых продуктов. Внешний вид упаковочного картона из соломы представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Картон из соломы

Получение картона из соломы включает несколько этапов, отличающихся от классического древесного производства [11-13]:

Сбор и подготовка соломы – солома, обычно пшеничная, ржаная или рисовая, очищается от примесей, измельчается.

Стандартная делигнификация – удаление лигнина из соломенного волокна. Традиционная сульфатная варка малоэффективна из-за высокой зольности соломы, в которой содержание минеральных веществ достигает 5–10%, что значительно выше, чем у древесины.

Органосольвентная варка – альтернативный метод делигнификации, в котором используются органические растворители, например, спирт и кислоты, вместо агрессивных химических реагентов. Этот метод позволяет более эффективно использовать солому и сделать процесс экологически более чистым.

Промывка, отбеливание, формирование листа – аналогично классическому производству. Доступна возможность комбинирования с другими видами целлюлозы [14]

Внешний вид производственной линии упаковочного картона из соломы представлен на рисунке 6.

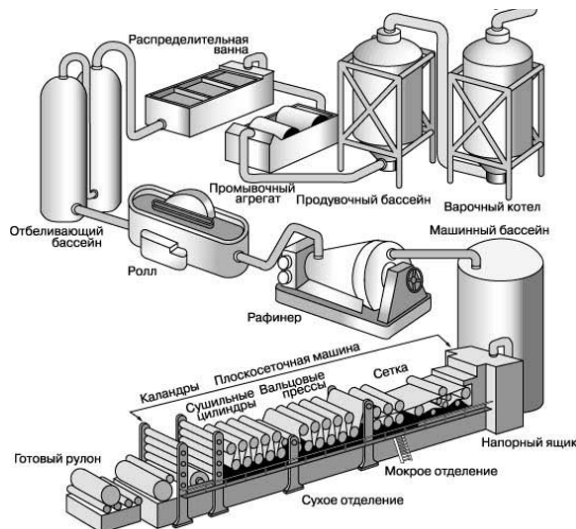


Рис. 6. Внешний вид производственной линии упаковочного картона из соломы

Российские исследователи адаптировали советские методики и создали экологически чистый процесс «Алангрин Сольволиз», который позволяет производить сырьё для бумаги, картона и биоразлагаемого пластика из соломы.

Картон из соломы отличается от традиционного картона по ряду параметров, важных для пищевых производств:

Плотность – как правило, ниже, чем у картона из древесной целлюлозы, из-за более коротких и менее прочных волокон.

Прочность – уступает картону из древесной целлюлозы. Предел прочности при сжатии составляет примерно 60–70% от показателей традиционного картона.

Поверхность – более шероховатая, что может затруднять высококачественную печать, но допустимо для транспортной упаковки.

Влагопоглощение – выше, чем у традиционного картона, из-за большего количества аморфных участков в структуре соломенного волокна, что ограничивает его применение для влажных пищевых продуктов без дополнительного покрытия.

В таблице 3 указаны обобщённые средние значения основных характеристик упаковочного картона из соломы.

Таблица 3

Физико-механические и эксплуатационные свойства картона из соломы

Показатель	Значение	Примечание
Плотность, г/м ²	280-330	Ниже, чем у стандартного картона, гофрокартона из-за более коротких волокон
Толщина, мм	0,3-1,5	Меньшая способность к набуханию при отливе
Соппротивление продавливанию, кПа	650-800	Уступает стандартному картону, ограничено прочностью соломенного волокна
Жёсткость при изгибе, Н×м ²	Средняя	Уступает стандартному картону из-за меньшей длины волокон
Амортизация (поглощение удара)	Низкая	Сравнима с обычным картоном
Влагопоглощение (24 ч), %	55-65	Выше, чем у традиционного картона из-за большего количества аморфных участков в волокне
Воздухопроницаемость, мкм/(Па×с)	3-15	Зависит от степени помола; выше, чем у плотного картона
Биоразлагаемость, дни	60-80	Намного быстрее обычного картона
Углеродный след, кг СО ₂ – экв./кг	0,4-0,6	Весьма низкий, так как солома – отход сельского хозяйства
Энергозатраты на изготовление	Высокие	Из-за высокой энергоёмкости варки соломы и удаления примесей

Картон из соломы обладает значительными экологическими преимуществами, важными для пищевых производств, стремящихся к снижению воздействия на окружающую среду:

Использование отходов – солома является побочным продуктом сельского хозяйства, который в противном случае часто сжигается, загрязняя атмосферу. Её переработка в картон решает проблему утилизации отходов.

Низкий углеродный след – за счёт исключения вырубки лесов и использования возобновляемого сырья углеродный след картона из соломы значительно ниже, чем у традиционного картона.

Снижение водопотребления – некоторые технологии, например, органосольвентная варка, требуют меньше воды по сравнению с традиционным производством целлюлозы.

Полная биоразлагаемость – картон из соломы полностью разлагается в компосте за 2–3 месяца, не оставляя токсичных остатков.

В то же время существуют и технологические сложности: высокая зольность соломы, короткий срок хранения сырья, необходимость адаптации оборудования. Тем не менее, интерес к этому материалу во всех странах только растёт.

Упаковка из соломы уже находит практическое применение в пищевой промышленности. Немецкий стартап Landpack производит биоразлагаемую изоляционную упаковку Landbox для продуктов питания, лекарств и вакцин. Эта упаковка по своим свойствам сопоставима с пенополистиролом, но полностью биоразлагаема и производится из возобновляемого сырья. Компания Dell использует солому для производства коробок для ноутбуков, начиная с 15% содержания соломы в составе тары и постепенно наращивая эту долю. Российский стартап «Алангрин» разрабатывает технологии глубокой переработки соломы в биоразлагаемую упаковку для сухих продуктов и биопластик.

В итоге выходит, что картон из соломы является перспективной альтернативой для упаковки сухих пищевых продуктов и вторичной транспортной упаковки, но по механической прочности пока уступает традиционному гофрокартону.

Упаковочный картон из грибного мицелия. Мицелий или грибница – это корневая структура грибов, состоящая из сети тонких нитевидных клеток, гифов. В последние годы мицелий привлекает внимание как основа для создания биоразлагаемых композитных материалов [15-16], способных заменить пенопласт и другие синтетические упаковочные материалы, в том числе в пищевых производствах. Внешний вид упаковочного картона из грибного мицелия представлен на рисунке 7.



Рис. 7. Картон и упаковка из грибного мицелия

Производство упаковочного материала из мицелия принципиально отличается от традиционного производства картона. Основные этапы:

1. Подготовка субстрата – в качестве питательной основы используются отходы сельского хозяйства или деревообработки: опилки, щепа, солома, лузга, жмых. Субстрат стерилизуется для уничтожения посторонних микроорганизмов.

2. Инокуляция – в подготовленный субстрат вносится мицелий гриба. Обычно это *Pleurotus*, вёшенка или *Ganoderma*, трутовик.

3. Выращивание в форме – смесь субстрата с мицелием помещается в формы нужной конфигурации. В течение 5–14 дней мицелий прорастает через субстрат, склеивая частицы в монолитную массу.

4. Термическая обработка – готовое изделие подвергается нагреву в виде сушки, который останавливает рост гриба и придаёт материалу прочность и влагостойкость.

Внешний вид производственного помещения упаковочного картона из мицелия представлен на рисунке 8.



Рис. 8. Производственное помещение упаковочного картона из мицелия

Композит. картон из мицелия обладает уникальным сочетанием свойств [17], которые характерны для упаковки в пищевой промышленности:

- Низкая плотность – материал очень лёгкий, сопоставим с пенополистиролом.
- Высокая амортизация – благодаря пористой структуре материал отлично поглощает удары и вибрацию. Это применимо для защиты хрупкой пищевой продукции.
- Теплоизоляция – сравнима с пенопластом, что делает материал пригодным для термоупаковки.
- Влагостойкость – ограниченная; материал требует дополнительной обработки для длительного контакта с влагой.

В таблице 4 указаны обобщённые средние значения основных характеристик упаковочного материала из грибного мицелия.

Упаковочный картон из мицелия имеет выдающиеся экологические показатели, востребованными в пищевом производстве:

- Отсутствие нефтехимического сырья – материал производится из возобновляемых ресурсов.
- Низкий углеродный след – производство подобной упаковки требует на 40% меньше энергии по сравнению с производством пластиковой упаковки. Кроме того, при выращивании мицелий поглощает углекислый газ.
- Полная биоразлагаемость – в домашнем компосте упаковка разлагается за 30–45 дней, не оставляя токсичных остатков.
- Использование отходов – субстратом служат отходы сельского хозяйства и деревообработки, которые в противном случае часто сжигаются или отправляются на свалку.

Таблица 4

Физико-механические и эксплуатационные свойства картона из мицелия

Показатель	Значение	Примечание
Плотность, г/м ²	50-15000	Очень лёгкий материал, сопоставим с пенополистиролом, зависит от толщины
Толщина, мм	1-100	Материал формуется в изделие нужной толщины
Сопротивление продавливанию, кПа	50-150	Материал не рассчитан на точечные нагрузки
Жёсткость при изгибе, Н×м ²	Низкая	Гибкий и мягкий, не держит форму без субстрата
Амортизация (поглощение удара)	Высокая	Подходит для защиты хрупких товаров за счёт пористой структуры
Влагопоглощение, %	80-95	Очень высокое, требуется дополнительная обработка для влажных сред
Воздухопроницаемость	Очень высокая	Не нормируется; пропускает воздух свободно
Биоразлагаемость, дни	30-45	Полностью разлагается в домашнем компосте, не оставляя токсинов
Углеродный след, кг СО ₂ – экв./кг	0,1-0,2	Минимальный; мицелий поглощает СО ₂ при росте
Энергозатраты на производство	Низкие	Выращивание при комнатной температуре, не требует нагрева и высокого давления

Однако существуют и ограничения. Мицелиевый материал пока не может конкурировать с традиционным гофрокартоном по механической прочности. Его влагостойкость также невелика, что ограничивает применение для упаковки влажных пищевых продуктов. Кроме того, масштабирование производства остаётся сложной задачей: выращивание мицелия требует времени, а автоматизация процесса пока недостаточно развита.

Несколько компаний уже производят упаковку из мицелия на коммерческой основе. Американская Ecovative производит полностью компостируемые упаковочные материалы, которые по защитным свойствам не уступают полистиролу. Компания сотрудничает с рядом корпораций из списка Fortune 500.

Бельгийский стартап Permafungi запустил первую в Европе фабрику по производству упаковки из мицелия. Компания использует отходы местных деревообрабатывающих производств, а для полива грибницы собирает дождевую воду. Продукция Permafungi применяется для упаковки элитного мыла, вин, часов и декоративных свечей.

Таким образом, мицелиевая упаковка является наиболее перспективной для замены пенополистирола в сегменте защитной упаковки хрупких и чувствительных пищевых товаров, но пока не может рассматриваться как полноценная замена гофрокартону для транспортной упаковки многих пищевых продуктов.

Упаковочный картон из тростника. Тростник обыкновенный *Phragmites australis*, а также сахарный тростник *Saccharum officinarum* являются быстрорастущими возобновляемыми растениями, которые могут служить сырьём для производства целлюлозы [18]. Особый интерес представляет сахарный тростник: при переработке на сахар образуется большое количество отходов – жома или же багассы, которые традиционно сжигаются или выбрасываются, но могут быть использованы для производства бумаги и картона, для упаковки пищевых

продуктов. Внешний вид упаковочного картона из грибного мицелия представлен на рисунке 9.



Рис. 9. Упаковочный картон из сахарного тростника

Производство картона из тростниковой багассы включает следующие этапы:

1. Сбор и подготовка сырья – багасса собирается после извлечения сока, очищается от примесей.

2. Делигнификация – удаление лигнина [19]. Багасса содержит меньше лигнина, чем древесина, поэтому её переработка требует меньше химикатов и энергии.

3. Отбеливание и формование – аналогично классическому производству картона.

Внешний вид производственной линии упаковочного картона из тростника во многом похож на тот, что представлен на рисунке 6.

Важное преимущество багассы заключается в том, что это побочный продукт производства сахара, который не требует дополнительных земельных и водных ресурсов для выращивания. Сырьё доступно в больших количествах в регионах возделывания сахарного тростника, таких как Бразилия, Индия, Китай, Таиланд.

Картон из тростника по своим свойствам близок к картону из древесной целлюлозы, но имеет некоторые отличия, важные в рамках производства пищевых продуктов:

- Плотность – сопоставима с картоном из древесной целлюлозы.
- Прочность – несколько ниже, чем у картона из древесины, но выше, чем у картона из соломы. Предел прочности при сжатии составляет примерно 70–80% от показателей традиционного картона.
- Поверхность – достаточно гладкая, пригодная для печати. Компания Test Valley Packaging предлагает картон RAW в коричневой и белой отделке с образцовым качеством печати.
- Влагопоглощение – умеренное, требует дополнительной обработки для упаковки влажных продуктов.

В таблице 5 указаны обобщённые средние значения основных характеристик упаковочного материала из тростника.

Таблица 5

Физико-механические и эксплуатационные свойства картона из тростника

Показатель	Значение	Примечание
Плотность, г/м ²	300-360	Близка к древесному картону
Толщина, мм	0,2-1,8	Сравнима с картоном из первичной целлюлозы
Сопротивление продавливанию, кПа	750-900	Ниже, чем у древесного, но выше, чем у соломенного
Жёсткость при изгибе, Н×м ²	Высокая	Волокно багассы длиннее соломенного
Амортизация (поглощение удара)	Низкая	Как у обычного картона
Влагопоглощение, %	50-60	Выше, чем у древесного, требуется покрытие
Воздухопроницаемость, мкм/(Па×с)	2-12	Зависит от степени проклейки
Биоразлагаемость, дни	50-70	Быстрее, чем у древесного картона
Углеродный след, кг СО ₂ – экв./кг	0,3-0,5	Многokrратно ниже стандартного картона за счёт использования отходов
Энергозатраты на производство	Низкие	Багасса содержит меньше лигнина, чем древесина

Картон из тростника обладает следующими экологическими преимуществами, актуальные в пищевом производстве:

- Использование отходов – багасса является побочным продуктом сахарного производства, который в противном случае часто сжигается.
- Возобновляемость сырья – сахарный тростник – быстрорастущая культура, не требующая вырубки лесов.
- Снижение углеродного следа – по данным компании Tetra Pak, упаковка с использованием полимеров на основе сахарного тростника имеет углеродный след в среднем на 20% ниже по сравнению с традиционной упаковкой.
- Биоразлагаемость – картон из тростника полностью разлагается в течение нескольких месяцев, в зависимости от условий.
- Отсутствие токсичных веществ – такой картон не содержит бисфенола А, фталатов и других вредных добавок, то есть прямой контакт с пищевыми продуктами является допустимым.

Наиболее известным примером использования тростникового сырья в упаковке является компания Tetra Pak, которая производит упаковку с полимерами растительного происхождения, полученными из сахарного тростника. Такая упаковка более чем на 80% состоит из возобновляемых природных материалов, картона и полимеров на растительной основе. Tetra Pak запустила производство такой упаковки в России на фабрике в Лобне.

Британская компания Test Valley Packaging выпускает картонную упаковку и бумагу RAW, изготовленные из отходов сахарного тростника. Продукт прошёл независимые испытания и подтвердил соответствие тем же стандартам, что и картон на древесной основе, включая требования к контакту с пищевыми продуктами.

Таким образом, картон из тростника является наиболее близкой по свойствам к традиционному картону альтернативой, что делает его перспективным [20] для широкого

спектра упаковочных применений – от упаковки продуктов питания до бытовой техники и электроники.

Итоговая оценка пригодности по рассмотренным критериям, проведённому сравнительному анализу. Формулировка общих критериев. Проведённый сравнительный анализ упаковочного картона из альтернативных видов сырья и традиционного гофрокартона позволил сформулировать общие критерии выбора и определить области применения каждого материала в пищевых производствах.

- Механическая прочность – определяет способность упаковки выдерживать транспортировку, штабелирование и нагрузки при фасовке.

- Барьерные свойства, влагопоглощение – критичны для сохранения качества пищевых продуктов. Для продуктов с высоким содержанием воды необходимо низкое влагопоглощение; менее важно для сухих продуктов.

- Безопасность контакта с пищей – отсутствие токсичных веществ. Все рассмотренные материалы при надлежащей обработке могут быть безопасны, но требуют подтверждения гигиеническими сертификатами.

- Экологичность – углеродный след, биоразлагаемость, возможность вторичной переработки, использование возобновляемого сырья.

- Технологичность и стоимость – современность технологии, энергозатраты на производство, доступность сырья, совместимость с существующими упаковочными линиями.

В таблице 6 представлен итоговый сводный сравнительный анализ всех рассмотренных материалов по ключевым критериям, показателям с их обобщёнными средними значениями.

Таблица 6

Физико-механические и эксплуатационные свойства рассмотренных видов упаковочного картона из различных материалов

Показатель	Стандартный картон	Гофрокартон	Картон из соломы	Картон из грибного мицелия	Картон из тростника
Плотность, г/м ²	200-400	350-500	280-330	50-15000	300-360
Толщина, мм	0,2-2,0	3-5	0,3-1,5	1-100	0,2-1,8
Сопротивление продавливанию, кПа	600-1200	900-1300	650-800	50-150	750-900
Жёсткость при изгибе, Н×м ²	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая	Высокая
Амортизация (поглощение удара)	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая	Низкая
Влагопоглощение, %	30-45	35-50	55-65	80-95	50-60
Воздухопроницаемость, мкм/(Па×с)	1-10	5-20	3-15	Очень высокая	2-12
Биоразлагаемость, дни	90-400	180-240	60-80	30-45	50-70
Углеродный след, кг СО ₂ – экв./кг	1,2-1,5	1,2-1,5	0,4-0,6	0,1-0,2	0,3-0,5
Энергозатраты на производство	Средние	Средние	Высокие	Низкие	Низкие

Рекомендуемые области применения в пищевых производствах:

- Гофрокартон – универсальный материал для транспортной и вторичной упаковки большинства пищевых товаров. Соответствует требованиям упаковки для: сухих сыпучих продуктов, консервов. Может использоваться для напитков в первичной упаковке, замороженных продуктов при наличии влагозащитного покрытия.

- Картон из тростника – наиболее близкая замена традиционному картону. Рекомендуется для: упаковки сухих завтраков, кондитерских изделий, макарон, а также для вторичной упаковки напитков и жидких продуктов при ламинировании или нанесении барьерного слоя. Является перспективным в сегменте экологичной упаковки.

- Картон из соломы – нишевое решение для сухих продуктов, не требующих высокой механической прочности и влагостойкости. Подходит для: чая, кофе, круп, мюсли, сухих смесей, а также в качестве вкладышей в транспортную упаковку. Перспективно использование в гибридных композитах, например, солома с целлюлозой, для повышения прочности.

- Мицелиевый композит – специализированный материал для защитной упаковки хрупких пищевых продуктов: яйца, стеклянная тара с деликатесами, шоколад, десерты. Эффективно заменяет пенополистирол. Для применения с влажными продуктами требуется гидрофобная обработка.

Заключение. На сегодняшний день абсолютно универсальным вариантом для упаковки пищевых товаров остаётся традиционный гофрокартон, сочетающий высокую прочность, умеренную стоимость, хорошую экологичность и отлаженную технологию производства. Картон из тростника является наиболее перспективной альтернативой для постепенной замены древесного картона во многих сегментах пищевой упаковки. Картон из соломы эффективен для нишевых применений. Мицелиевый композит – лучший выбор для замены пенопласта внутри транспортной упаковки хрупкой продукции.

Дальнейшее развитие этих материалов в сторону повышения влагостойкости, снижения стоимости и масштабирования производства позволит расширить их применение в пищевых производствах, снижая экологическую нагрузку упаковочной индустрии.

Список литературы

1. Д.А. Родионов. Особенности и способы перехода бизнеса к использованию экологичной упаковки товаров. — Москва 2025. — 11 с.
2. ГОСТ Р 53636-2009. Целлюлоза, Бумага, Картон, Термины и Определения. ISO 4046-1:2002 — ISO 4046-5:2002 (MOD). — Москва 2011. — 70 с.
3. П. М. Кейзер Е. И. Симонова. Технология Бумаги и Картонa: Учебное пособие / Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики. — Санкт-Петербург 2023. — 94 с.
4. А.М. Кряжев, О.В. Голуб, А.Ю. Санжаровский. Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона / Энциклопедия Технологий. — Санкт-Петербург 2022. — 145 с.
5. М.В. Ванчаков, И.С. Артамонов Технология и оборудование для производства картонной и бумажной тары: Учебное пособие часть I / Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. — Санкт-Петербург 2022. — 95 с.
6. И.Б. Давыдов. Упаковка из картона: особенности, основные виды и область применения в пищевой промышленности / Тульский государственный университет. Технические науки. — Тула 2018. — 11 с.

7. А. С. Смолин, В. И. Комаров, В. К. Дубовый, В. И. Белоглазов. Технология Гофрокартона: Учебное пособие часть I / Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров. — Санкт-Петербург 2014. — 151 с.
8. А. С. Смолин, В. И. Комаров, В. К. Дубовый, В. И. Белоглазов. Технология Гофрокартона: Учебное пособие часть II / Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров. — Санкт-Петербург 2014. — 101 с.
9. И.А. Косарев, А.В. Гурьев. Конструкционная прочность изделий из гофрированного картона / Северный федеральный университет им М.В. Ломоносова. — Архангельск 2025. — 11 с.
10. Е. Н. Мочалова, М. Ф. Галиханов Проектирование тары и упаковки из гофрированного картона / Инфра-Инженерия 2023. — 176 с.
11. В. Е. Тарабанько, Н. В. Коропачинская, А. В. Кудряшев, Е. П. Первышина, Б. Н. Кузнецов, С. В. Поляков, В. Н. Золотухин. Исследование процесса переработки пшеничной соломы в ароматические альдегиды и левулиновую кислоту / Институт химии и химической технологии СО РАН. — Красноярск 1998. — 6 с.
12. А.У. Шингисов, Б.М. Хамитова, С.У. Еркебаева, М.А. Турлыбек. Исследование химического и минерального состава пшеничной соломы как сырья для получения целлюлозы / Южно-Казахстанский университет им М. Ауэзова. — Республика Казахстан 2025. — 9 с.
13. Е. А. Авдеев, К. А. Надеина, Ю. В. Ватутина, А. В. Сайко, П. А. Заикин, А. И. Шамсуллин, Н. М. Шигапов, А. С. Миннибаев. Экстракционные технологии переработки отходов лесной промышленности и растениеводства / Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН. — Новосибирск 2024. — 11 с.
14. Р.З. Пен, И.Л. Шапиро, Амбросович Ю.А., В.Р. Пен. Бумагообразующие свойства пероксидной целлюлозы из пшеничной соломы в композиции с древесной сульфатной целлюлозой / Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва. — Красноярск 2022. — 5 с.
15. Cherkashina N.I., Synthesis of polymer composites using cryogenic grinding and study of their mechanical characteristics and theoretical calculations for neutron-protective parameters // Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Noskov A.V., Romanyuk D.S., Gavrish V.M., Chayka T.V. // Progress in Nuclear Energy. 2024. T. 177. C. 105449.
16. Чайка Т.В., Влияние высокодисперсного порошка смеси wc и tic на свойства композиционных материалов // Чайка Т.В., Гавриш В.М., Павленко В.И., Черкашина Н.И. // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. Т. 15. № 1. С. 14-26.
17. Т.С. Дёмина. Биоразлагаемые полимерные материалы: учебное пособие / Московский авиационный институт. — Москва 2023. — 69 с.
18. А.А. Карелина, Ю.Д. Алашкевич, В.А. Кожухов. Недревесное сырьё как источник целлюлозных волокон. Перспективы использования, проблемы и решения (обзор) / Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва. — Красноярск 2024. — 21 с.
19. М. В. Семенова, И. С. Васильева, А. И. Ярополов, А. П. Сеницын. Предобработка тростника с помощью глубоких эвтектических растворителей для увеличения его гидролизруемости под действием целлюлаз / ФИЦ Биотехнологии РАН. — Москва 2023. — 7 с.

20. Н.А. Кальсин, А.С. Мельникова, А.А. Чашникова. Перспективы использования растительных отходов в биоэкономике / Уфимский университет науки и технологий. — Уфа 2025. — 15 с.

РАЗДЕЛ IV. ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА.

УДК 629.017

Пространственная модель контакта с дорогой неподвижного колеса автомобиля

Азиз Умерович Абдулгазис¹, к.т.н.,
Умер Абдуллаевич Абдулгазис², д.т.н.,
Энвер Исмаилович Зийнединов³,

^{1,2,3} Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова,
Симферополь, Россия

¹ abdulgazis.aziz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9483-8677>

² at@kipu-rc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6142-0189>

³ ziinedinove@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4942-4471>

Аннотация. Выведена пространственная модель контакта с дорогой шины неподвижного колеса выполненного в форме тора. Получены аналитические выражения, позволяющие определить напряжения, возникающие в контакте с дорогой неподвижного колеса с рабочей поверхностью шины в виде тора. Получены аналитические выражения для изменения радиуса-вектора и деформации упругого элемента в зависимости от углов β (продольная координата) и γ (поперечная координата), причём установлено, что γ изменяется с изменением β . Через приравнивание погонной нормальной нагрузки из новой модели с известной феноменологической моделью цилиндрической шины получены конечные выражения для нормальной и поперечной компонент давления. Введена повернутая система координат, что позволило описать прогиб шины в произвольной точке пятна контакта одновременно в продольном и поперечном направлениях. Выведена формула для продольной составляющей контактного напряжения. Таким образом, создан аналитический аппарат, позволяющий вычислять распределение давлений по всей площади пятна контакта тороидальной шины, а не только в центральных сечениях. Результаты могут быть использованы для уточнённого расчёта долговечности шин, оценки износа протектора и моделирования сцепных свойств неподвижного колеса.

Ключевые слова. Пневматическая шина, тороидальная поверхность, пятно контакта, контактное давление, пространственная модель, статическое нагружение.

Spatial model still contact with the road wheels

Aziz U. Abdulgazis¹, PhD (Eng),
Umer A. Abdulgazis², D (Eng),
Enver I. Ziyinedinov³,

^{(1,2,3} Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov,
Simferopol, Russia)

¹ abdulgazis.aziz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9483-8677>

² at@kipu-rc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6142-0189>

³ ziinedinove@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4942-4471>

Abstract. A spatial model of the contact between the tire and the road of a stationary wheel in the shape of a torus

has been derived. Analytical expressions have been obtained that allow for the determination of the stresses that occur in the contact between the tire and the road of a stationary wheel with a working surface in the shape of a torus. Analytical expressions have been obtained for the change in the radius vector and the deformation of the elastic element as a function of the angles β (longitudinal coordinate) and γ (transverse coordinate), and it has been established that γ changes with changes in β . By equating the normal load per unit length from the new model with the known phenomenological model of a cylindrical tire, the final expressions for the normal and transverse components of pressure were obtained. A rotated coordinate system was introduced, which allowed the deflection of the tire at an arbitrary point of the contact patch to be described simultaneously in the longitudinal and transverse directions. A formula was derived for the longitudinal component of the contact stress. Thus, an analytical apparatus has been created that allows for the calculation of pressure distribution over the entire contact area of a toroidal tire, rather than just in the central sections. The results can be used for the refined calculation of tire durability, the assessment of tread wear, and the modeling of the traction properties of a stationary wheel.

Keywords. Pneumatic tire, toroidal surface, contact patch, contact pressure, spatial model, static loading.

Введение. Характер взаимодействия шины с опорной поверхностью предопределяет целый ряд эксплуатационных показателей автомобиля. Вопросу исследования контакта шин с дорогой посвящена обширная научная литература, тем не менее суть многих физических процессов здесь до сих пор остается невыясненной.

В настоящей статье представлены пространственная, физическая и математическая модели контакта пневматического колеса с дорогой, с помощью которых определены законы распределения контактных давлений в области пятна контакта.

Изучению процессов, происходящих в шине автомобильного колеса, посвящены труды [1–4, 8], в которых детально рассматривались конструктивные особенности различных шин.

Примером удачного математического описания стационарного плоского движения колеса служат результаты, полученные в [3, 4]. Авторы этих исследований применили так называемый «феноменологический» подход [3], суть которого заключается в представлении изучаемого объекта в виде «черного ящика» — его поведение и свойства определяются исключительно внешними характеристиками.

Режим торможения автомобильной шины проанализирован в работах [5–10]. Напряжения (давления) в зоне контакта неподвижного колеса с дорожным покрытием исследованы в [11–13], где были построены эпюры давлений в продольной и центральной поперечной плоскостях контакта. Однако в указанной работе отсутствуют аналитические зависимости, позволяющие вычислить распределение контактной нагрузки по всей площади пятна контакта. Это, в свою очередь, не дало возможности определить напряжения в точках контакта, расположенных вне указанных продольной и средней поперечной плоскостей. Модель контакта неподвижного колеса с дорогой получена в работе [9]. При ее построении также использовался феноменологический подход и принято допущение того, что рабочая поверхность шины является цилиндрической. Это позволило авторам указанной работы [9], используя плоскую упругую модель шины (рис.1), получить аналитические выражения для нормальной q_z и горизонтальной (продольной) q_x составляющих погонной силы упругости q_β

$$q_z = c_z \frac{(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) (\frac{\cos \beta}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1)}{\alpha - \cos \frac{\alpha}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{1 - \sin \frac{\alpha}{2}} \right|} ; \quad (1)$$

$$q_z = q_z \operatorname{tg} \beta = c_z \frac{(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) (\frac{\sin \beta}{\cos \frac{\alpha}{2}} - \operatorname{tg} \beta)}{\alpha - \cos \frac{\alpha}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{1 - \sin \frac{\alpha}{2}} \right|} ; \quad (2)$$

где c_z – радиальная жесткость шины,

α – центральный угол окружности радиусом $r_{св}$, соответствующий теоретической длине $L_{км}$ пятна контакта (рис.1 [9]).

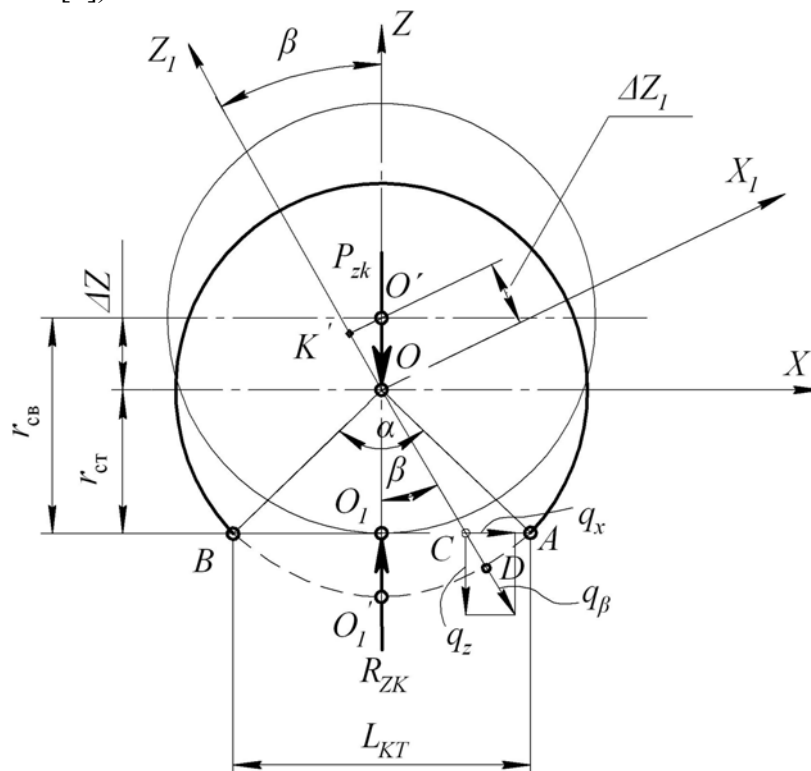


Рис 1. Схема статического нагружения неподвижного колеса в продольной плоскости [1]: $r_{св}$ – свободный радиус колеса; $r_{ст}$ – статический радиус колеса; Δz – нормальная деформация шины при статическом нагружении; P_{zk} , R_{zk} – нормальная нагрузка и реакция дороги на колесо; $L_{км}$ – теоретическая длина пятна контакта шины с дорогой; q_β , q_z , q_x – погонные силы упругости шины и ее нормальной и продольной составляющих; α – центральный угол окружности радиусов $r_{св}$, соответствующий $L_{км}$; β – угловая (текущая) координата точки контакта C (рис. 1 [9]), $r_{св}$ – свободный радиус колеса.

При цилиндрической форме рабочей поверхности шины с достаточной степенью точности можно определить контактные давления (напряжения) в любой точке пятна контакта в пределах ширины профиля В.

$$p_z = \frac{q_z}{B} = \frac{C_z}{B} (1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \frac{\frac{\cos \beta}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1}{\alpha - \cos \frac{\alpha}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{1 - \sin \frac{\alpha}{2}} \right|}; \quad (3)$$

$$p_x = \frac{q_x}{B} = \frac{C_z}{B} (1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \frac{\frac{\sin \beta}{\cos \frac{\alpha}{2}} - \operatorname{tg} \beta}{\alpha - \cos \frac{\alpha}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{1 - \sin \frac{\alpha}{2}} \right|}; \quad (4)$$

Для определения контактных давлений при форме рабочей поверхности шины, отличной от цилиндрической, например в форме тора, необходимо дополнительное исследование.

Материалы и методы определения закона распределения давлений в пятне контакта с дорогой шины неподвижного колеса, имеющей форму тора.

Для достижения данной цели необходимо построить пространственную модель контакта с дорогой шины неподвижного колеса, выполненной в форме тора.

Результаты и их обсуждение. Для решения поставленной задачи рассмотрим нагружение шины в системе координат $X_1OY_1Z_1$, повернутой относительно системы координат XOY_1Z на угол β в плоскости XOZ (рис.1; рис.2). Анализируя схемы приведенные на рис. 1 рис. 2 можно определить прогиб $\overline{CD}$ шины, измененный в направлении оси OZ_1 .

$$\overline{CD} = r_{c\beta} - \frac{r_{c\beta}}{\cos \beta} \cos \frac{\alpha}{2} = r_{c\beta} (1 - \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}) = R_{np} (1 - \cos \frac{\gamma}{2}); \quad (5)$$

где R_{np} – радиус профиля в поперечной плоскости, γ – центральный угол, соответствующий хорде, по которой происходит контакт шины с дорогой в поперечной плоскости.

Из уравнения (5) определим

$$\cos \frac{\gamma}{2} = \left[1 - \frac{r_{c\beta}}{R_{np}} (1 - \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}) \right] \quad (6)$$

или

$$\gamma = 2 \arccos \left[1 - \frac{r_{c\beta}}{R_{np}} (1 - \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}) \right] \quad (7)$$

Изменение радиуса ΔR в продольной точке Е контакта шины с дорогой (см. рис. 2).

$$\Delta R = R_{np} - R = R_{np} (1 - \frac{\cos \frac{\gamma}{2}}{\cos \delta}), \quad (8)$$

где R – длина радиуса вектора в точке Е.

После подстановки выражения (6) в (8) получим

$$\Delta R = R_{np} (1 - \frac{1 - \frac{r_{c\beta}}{R_{np}} \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta}}{\cos \delta}). \quad (9)$$

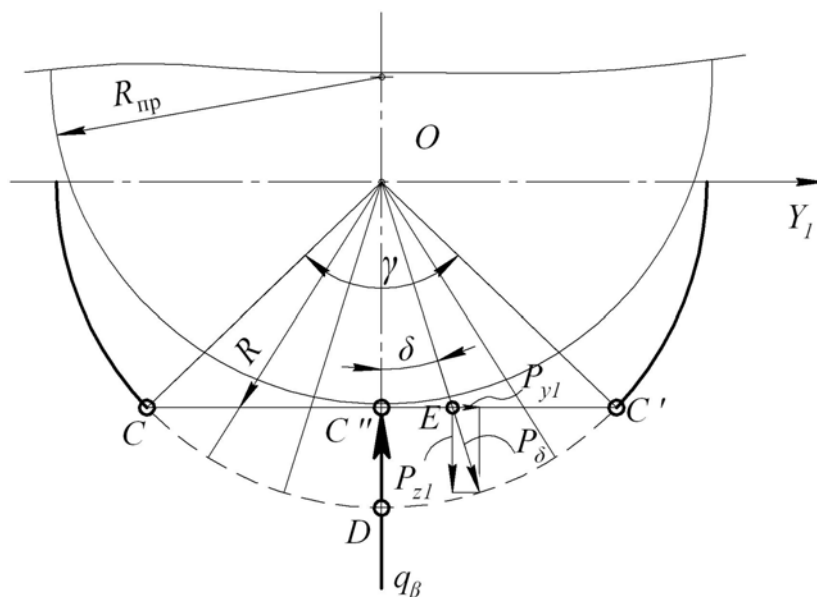


Рис. 2. Схема статического нагружения шины в поперечной плоскости OCC' , наклоненной к плоскости ZOY под углом β ; R_{np} – радиус профиля шины в поперечной плоскости; p_δ – суммарное контактное давление и его составляющие P_{z1} и P_{y1} .

Суммарное контактное давление в точке Е.

$$p_\delta = c_\delta \cdot \Delta R = c_\delta \left[1 - \frac{1 - \frac{R_{ce}}{R_{np}} \left(1 - \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \delta} \right)}{\cos \delta} \right], \quad (10)$$

где c_δ – условная жёсткость упругого элемента длиной $\overline{OE}$

Составляющая суммарного контактного давления в точке Е, направленная по оси OZ_1 .

$$p_{z1} = p_\delta \cdot \cos \delta = c_\delta \cdot R_{np} \left[\cos \delta - 1 + \frac{r_{ce}}{R_{np}} \left(1 - \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta} \right) \right], \quad (11)$$

Составляющая суммарного контактного давления p_δ в точке Е, направленная вдоль оси OY ,

$$p_{y1} = p_\delta \cdot \sin \delta = c_\delta \cdot R_{np} \left[\sin \delta - \left[1 - \frac{r_{ce}}{R_{np}} \left(1 - \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta} \right) \right] \cdot \operatorname{tg} \delta \right], \quad (12)$$

Составляющая суммарного контактного давления p_δ в точке Е, направленная вдоль оси OZ .

$$p_z = p_{z1} \cdot \cos \beta = c_\delta \cdot R_{np} \cdot \cos \beta \left[\cos \delta - 1 + \frac{r_{ce}}{R_{np}} \left(1 - \frac{\cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \beta} \right) \right], \quad (13)$$

Погонная нормальная нагрузка в точке Е.

$$q_z = \int_{-\frac{\gamma}{2}}^{+\frac{\gamma}{2}} p_z \cdot R d\delta \quad (14)$$

Длина радиуса вектора в точке E.

$$R = R_{np} \frac{\cos \frac{\gamma}{2}}{\cos \delta} \quad (15)$$

Подставляя выражение (15) в уравнение (14), получим с учетом (6)

$$q_z = c_\delta \cdot R_{np}^2 \cos \beta \cdot \cos \frac{\gamma}{2} \int_{-\frac{\gamma}{2}}^{+\frac{\gamma}{2}} \left(1 - \frac{\cos \frac{\gamma}{2}}{\cos \delta}\right) d\delta, \quad (16)$$

Проведя интегрирование правой части уравнения (16), получим

$$q_z = c_\delta \cdot R_{np}^2 \cos \beta \cdot \cos \frac{\gamma}{2} \left[\gamma - \cos \frac{\gamma}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\gamma}{2}}{1 - \sin \frac{\gamma}{2}} \right| \right], \quad (17)$$

Приравнявая правые части уравнений (1) и (17), определим

$$c_\delta = c_z \frac{(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \left(\frac{\cos \beta}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1 \right)}{R_{np}^2 \left(\alpha - \cos \frac{\alpha}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{1 - \sin \frac{\alpha}{2}} \right| \right) \cos \beta \cdot \cos \frac{\gamma}{2} \left[\gamma - \cos \frac{\gamma}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\gamma}{2}}{1 - \sin \frac{\gamma}{2}} \right| \right]}, \quad (18)$$

После постановки (18) в (13) получим

$$p_z = \frac{c_z}{R_{np}} \cdot \frac{(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \left(\frac{\cos \beta}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1 \right) \left(\frac{\cos \delta}{\cos \frac{\gamma}{2}} - 1 \right)}{\left(\alpha - \cos \frac{\alpha}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{1 - \sin \frac{\alpha}{2}} \right| \right) \left[\gamma - \cos \frac{\gamma}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\gamma}{2}}{1 - \sin \frac{\gamma}{2}} \right| \right]}, \quad (19)$$

Очевидно, что (с учетом (6))

$$p_y = p_{y1} = p_{z1} \cdot \operatorname{tg} \delta = c_\delta R_{np} \cdot \operatorname{tg} \delta (\cos \delta - \cos \frac{\gamma}{2}), \quad (20)$$

Подставляя (18) в (20), получим

$$p_y = \frac{c_z}{R_{np}} \frac{(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \left(\frac{\cos \beta}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1 \right) \left(\frac{\cos \delta}{\cos \frac{\gamma}{2}} - 1 \right)}{\cos \beta \left(\alpha - \cos \frac{\alpha}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{1 - \sin \frac{\alpha}{2}} \right| \right) \left(\gamma - \cos \frac{\gamma}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\gamma}{2}}{1 - \sin \frac{\gamma}{2}} \right| \right)}, \quad (21)$$

Составляющая суммарного контактного давления, направленная вдоль оси ОХ.

$$p_x = p_z \cdot \operatorname{tg} \beta = \frac{c_z}{R_{np}} \operatorname{tg} \beta \frac{(1 - \cos \frac{\alpha}{2})(\frac{\cos \beta}{\cos \frac{\alpha}{2}} - 1)(\frac{\cos \delta}{\cos \frac{\gamma}{2}} - 1)}{(\alpha - \cos \frac{\alpha}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\alpha}{2}}{1 - \sin \frac{\alpha}{2}} \right|) \left(\gamma - \cos \frac{\gamma}{2} \ln \left| \frac{1 + \sin \frac{\gamma}{2}}{1 - \sin \frac{\gamma}{2}} \right| \right)}. \quad (22)$$

Следует отметить, что величина угла γ (в соответствии с зависимостью (6)) изменяется в функции β . С увеличением угла β происходит увеличение угла γ .

Заключение. Полученные аналитические выражения позволяют определить напряжения в контакте с дорогой неподвижного колеса с рабочей поверхностью шины в виде тора.

Список литературы

1. Ермошин Н.А. Влияние конструкции автомобильных шин на нормирование воздействия расчетной нагрузки на дорожные одежды. Эволюция норм в России / Н.А. Ермошин, А.Е. Симчук // Russian Journal of Transport Engineering. 2025. Т. 12, № 1. DOI: 10.15862/08SATS125
2. Петрушов В.А. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов / В.А. Петрушов, С.А.Шуклин, В.В. Московкин, – М.: Машиностроение, 1975.– 225с.
3. Левин М.А. Теория качения деформируемого колеса / М.А. Левин, Н.А.Фуфаев. – М.: Наука, 1989. – 272 с.
4. Горский М.Ю. Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба нежестких дорожных одежд на основе испытаний прочности установками динамического нагружения / М.Ю. Горский, Е.Н. Симчук, Г.Ф. Кадыров, А.Е. Симчук // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25, № 4. - С. 211–225.
5. Балакина Е.В. Расчет нормальной жесткости и параметров пятен контакта шин сверхнизкого давления для сельскохозяйственной техники / Е.В. Балакина, З.А. Годжаев, А.А. Коньшин, М.С. Кочетов // Тракторы и сельхозмашины. - 2023. Т. 90, № 1. - С. 49–58.
6. Можаровский В.В. Расчёт напряженно-деформированного состояния шины на примере её контакта с дорожным покрытием / В.В. Можаровский, Д.С. Кузьменков, И.И. Коляскин // ПФМТ. - 2021. № 4(49). - С. 17–20.
7. Математические модели пневматической шины: монография / под общ. ред. А. И. Федотова. - М.: Инфра-Инженерия, 2025. - 232 с.
8. Влияние условий эксплуатации на ресурс шин: монография / Г. С. Ерицян, М. А. Карапетян, А. Г. Авакян / Национальный политехнический университет Армении; ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА им. К. А. Тимирязева. – М.: ООО «Мегаполис», 2022 – 129 с.
9. Динамика колеса и устойчивость движения автомобиля / У.А. Абдулгасис, А.У. Абдулгасис, Д.М. Клец, М.А. Подригало, под ред. У.А. Абдулгасис. Симферополь: ДИАЙПИ, 2010 – 208 с.
10. Моделирование взаимодействия шины колеса с опорным основанием опорно-ходового модуля / А. В. Скрынников, А. В. Шихин, А. А. Попов, В. Н. Сидоров // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 6(90). – С. 88-97. – EDN RIGKUW.
11. Kireenkov, A. A. On tire models accounting for both deformed state and coupled dry friction in a contact spot / A. A. Kireenkov, S. I. Zhavoronok, D. V. Nushtaev // Computer Research

- and Modeling. – 2021. – Vol. 13, No. 1. – P. 163-173. – DOI 10.20537/2076-7633-2021-13-1-163-173. – EDN QDWHER.
12. Закон оптимального управления подводимой мощностью к движителю колёсной машины при прямолинейном движении / Г. О. Котиев, Б. Б. Косицын, К. Б. Евсеев [и др.] // Труды НАМИ. – 2022. – № 4(291). – С. 43-57. – DOI 10.51187/0135-3152-2022-4-43-57. – EDN GQGWLX.
13. Пути повышения функциональной стабильности взаимодействия колес грузового автомобиля с дорогой.: Монография / А.У. Абдулгасис. – Симферополь : И.П. Хотеева Л.В., 2025. – 148 с.

РАЗДЕЛ IV. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.171.3

К вопросу учета каталитических свойств наночастиц при разработке новых реактопластов для аддитивной печати на примере модификации PETG наночастицами карбида вольфрама

Владимир Михайлович Гавриш¹, к.т.н.,
Тихон Александрович Паничкин²,
Татьяна Валерьевна Чайка³,
Ольга Петровна Гавриш⁴,
Денис Евгеньевич Сидоров⁵, к.т.н.,

^{1,2,3,4,5}Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

¹vmgavrish@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5812>

²tpanichkin@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8141-5134>

³tvchaika@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5549-2415>

⁴opgavrish@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5593-3869>

⁵desidorov@sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9948-7740>

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы изменения прочности на растяжение и ударной прочности филаментов на основе полиэтилентерефталата с гликолем (PETG) модифицированных наночастицами карбида вольфрама (WC) и наночастицами смеси карбидов вольфрама и титана (WC+TiC). Проведены исследования модификаторов, изготовлены филаменты с модифицирующими добавками с концентрацией наполнителя в 1; 2; 3 и 5% по массе, напечатаны образцы для испытаний методом FDM согласно ГОСТ 12019-2021. Проведены испытания по ГОСТ 34370-2017 на растяжение и по ГОСТ 4647-2015 на ударную прочность в результате установлено существенное снижение исследуемых характеристик. Авторами сделано предположение о возможном объяснении наблюдаемых эффектов, связанных с каталитическими свойствами карбида вольфрама входящего в состав наполнителей. Данное исследование может служить примером необходимости учитывать увеличение каталитических свойств наполнителей в nano состоянии для правильного выбора наполнителя, включая ситуации, когда инертный химический материал, не вступающий в прямые реакции с основой наполнителя, за счет каталитических свойств может существенно изменить его механические характеристики. Особенное значение имеет фракция наполнителя, т.к. при уменьшении фракции растет поверхность катализатора, что приводит к существенному улучшению даже слабых каталитических свойств материалов.

Ключевые слова: наночастицы, карбид вольфрама, филаменты, катализатор, PETG, PET, FDM, аддитивные технологии, предел прочности на растяжение, ударная прочность, полиэтилентерефталат, гликоль.

On the issue of taking into account the catalytic properties of fillers as modifiers of reactive plastics for additive printing, using the example of PETG modification with tungsten carbide nanoparticles

Vladimir M. Gavrish¹, PhD (Eng),

Tikhon A. Panichkin²,

Tatyana V. Chaika³,

Olga P. Gavrish⁴,

Denis E. Sidorov⁵, PhD (Eng),

^(1,2,3,4,5) Sevastopol State University, Sevastopol, Russia)

¹vmgavrish@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2009-5812>

²tpanichkin@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8141-5134>

³tvchaika@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5549-2415>

⁴opgavrish@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5593-3869>

⁵desidorov@sevsu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9948-7740>

Abstract. The paper considers the issues of changing the tensile strength and impact strength of filaments based on polyethylene terephthalate with glycol (PETG) modified with tungsten carbide (WC) nanoparticles and a mixture of tungsten and titanium carbides (WC+TiC) nanoparticles. Studies of modifiers have been conducted, filaments with modifying additives with filler concentrations of 1, 2, 3 and 5% by weight have been produced, and samples for testing by the FDM method according to GOST 12019-2021 have been printed. Tensile tests according to GOST 34370- 2017 and impact strength according to GOST 4647-2015 were carried out, as a result, a significant decrease in the studied characteristics was found. The authors have suggested a possible explanation for the observed effects related to the catalytic properties of tungsten carbide, which is part of the fillers. This study can serve as an example of the need to take into account an increase in the catalytic properties of fillers in the nano state for the correct choice of filler, including situations where an inert chemical material that does not react directly with the filler base can significantly change its mechanical characteristics due to its catalytic properties. The filler fraction is of particular importance, because as the fraction decreases, the surface of the catalyst increases, which leads to a significant improvement in even weak catalytic properties of materials.

Keywords. Nanoparticles, tungsten carbide, filaments, catalyst, PETG, FDM, additive technologies, tensile strength, impact strength, polyethylene terephthalate, glycol.

Введение. В настоящий момент практически невозможно найти сферу материальной деятельности человека, в которой не используются аддитивные технологии печати пластиками. Несмотря на очевидные преимущества по сравнению с другими технологиями, аддитивные технологии имеют, и ряд недостатков, которые сдерживают их распространение, одним из основных является свойства материала для печати филамента. По сути, материал филамента определяет физико-механические характеристики напечатанного изделия. Во многих работах [1-8] признано, что одними из наиболее негативных эффектов при печати пластиком являются пористость и анизотропия структуры напечатанного изделия, обусловленная послойным построением.

Соответственно с момента начала использования аддитивных технологий идет постоянный поиск новых способов или улучшения существующих материалов для аддитивной печати. Анализ данных по публикационной активности на сайте ScienceDirect [9], показывает, что если изначально проблемам улучшения различных филаментов на протяжении 2000-2010 гг. посвящалось несколько десятков научных работ в год. С 2020 годов произошло кратное увеличение публикаций посвященной данной тематике, например, с учетом временного лага индексации, только за 1 квартал 2026 года зарегистрировано уже более 2100 работ. Кратное увеличение публикационной активности, на наш взгляд, обусловлено несколькими факторами: прежде всего увеличением объемов использования аддитивных технологий; широким

применением классических способов улучшения реактопластов на основе микронных наполнителей или волокон [10-16]; развитием технологий получения наноматериалов, которые в свою очередь позволяют получать существенные улучшения характеристик материалов для аддитивной печати [17-21].

В статье приведены исследования возможности улучшения материала филамента на основе PETG FDM наночастицами карбида вольфрама и наночастицами смеси карбида вольфрама и титана.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований использовали изготовленные компанией Bestfilament образцы материалов PETG для FDM печати, модифицированные наночастицами карбида вольфрама WC и наночастицами смеси карбидов вольфрама и карбида титана (ТТК) в концентрациях 1; 2; 3 и 5% по массе, производства ООО «Нанотех ВГ». Размеры образцов 130x10x4 мм геометрия в соответствии с ГОСТ 12019-2021

Характеристики наполнителей (рис.1). Анализ размера, формы и морфологии частиц проводили с использованием программного обеспечения Particle Metric(Phenom)..

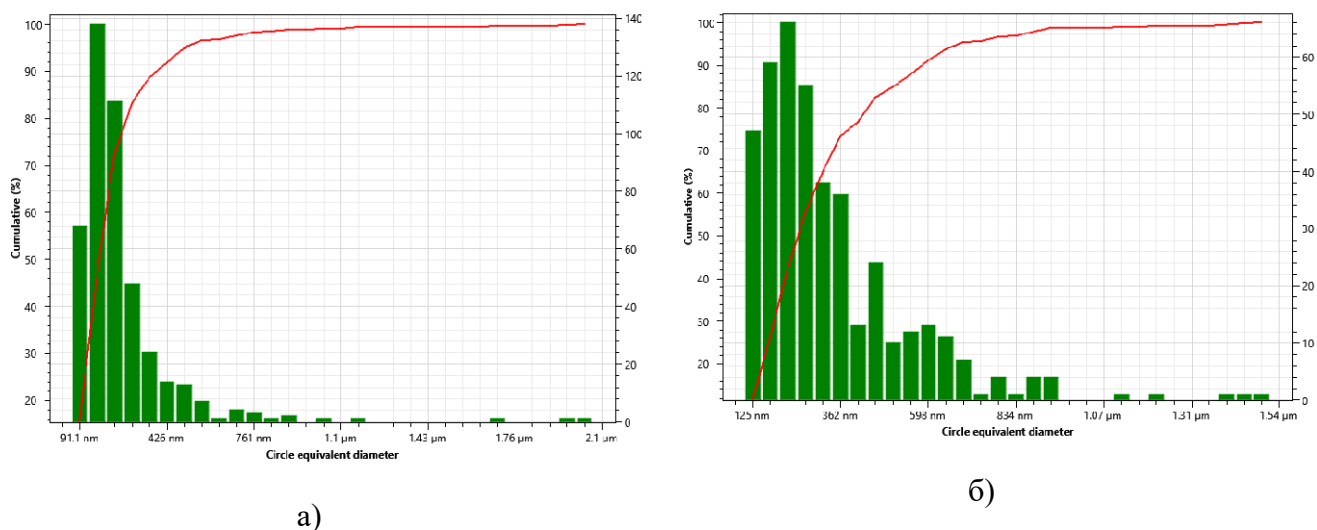


Рис. 1. Гистограммы фракционного распределения частиц карбида вольфрама (а), смеси карбидов вольфрама и титана (б).

Таблица 1.

Элементный состав исследуемых модификаторов

WC			WC+TiC		
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.
W	51.21	92.76	O	58.84	13.59
O	37.20	5.86	W	30.79	81.70
C	11.59	1.37	Ti	5.63	3.89
			C	4.74	0.82

Результаты энергодисперсионного микроанализа (ЭДС) исследуемых наполнителей представлены в таблице 1 в виде атомных и массовых долей элементов (%). Анализ выполнен методом энергодисперсионной спектроскопии с использованием программы Element Identification (Phenom).

Микроструктура частиц порошка карбида вольфрама и смесей карбидов вольфрама и титана представлена на электронных микроснимках (рис.2). Исследования выполнены на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX фирмы: Phenom–World B.V. (Нидерланды).

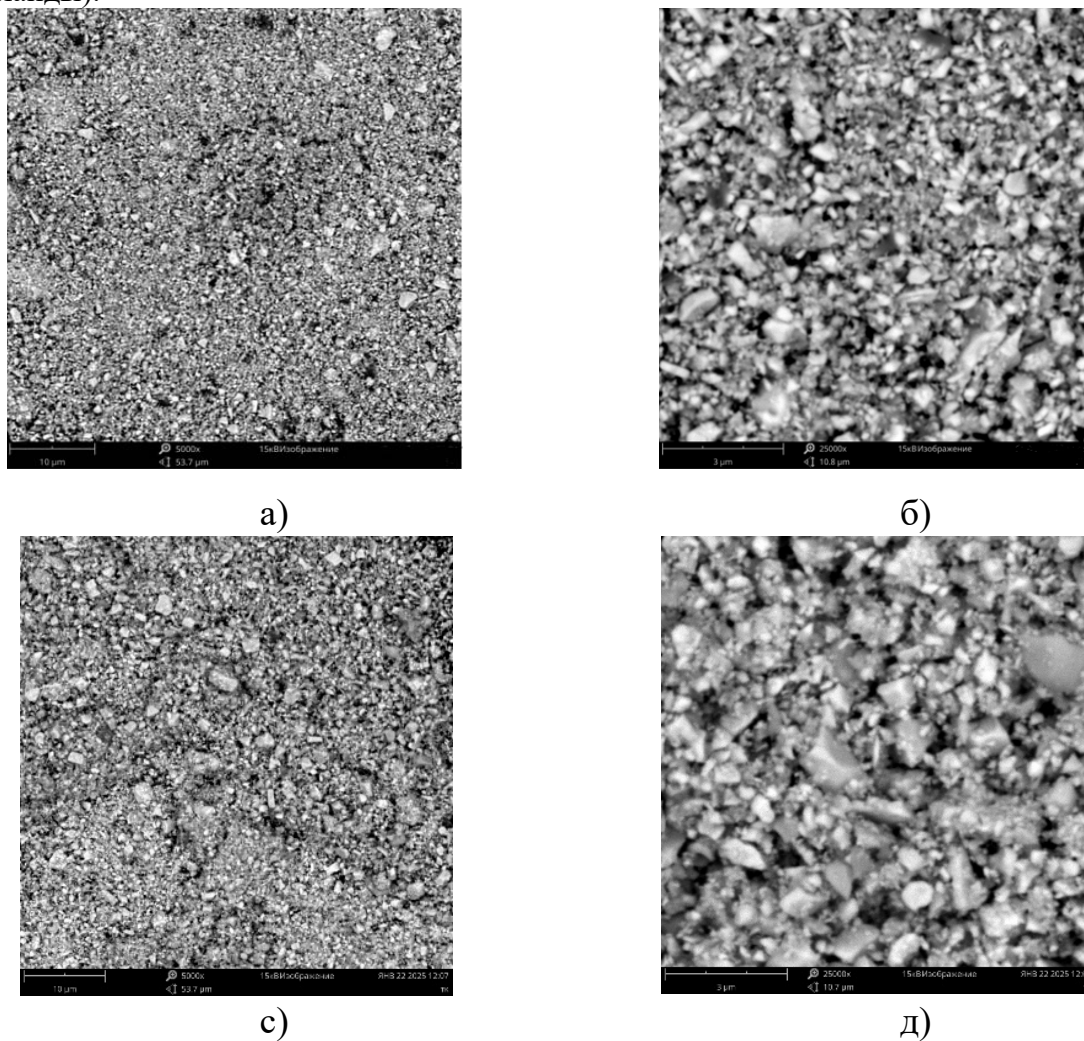


Рис. 2. Микрофотографии порошка карбида вольфрама WC (а,б) и смесей карбида вольфрама и титана WC+TiC (с,д) при увеличении $\times 5000$ и $\times 25\,000$ раз.

Порошки в обоих случаях представляют собой смесь частиц различной формы и их агломератов. Морфология частиц неоднородная. Форма частиц неправильная оскольчатая, в основном угловатая с наличием криволинейных поверхностей.

Используемое оборудование

Определение предела прочности на растяжение материала проводились на универсальной разрывной машине ТРМ-50, ООО «Завод испытательных приборов», г. Иваново, в соответствии с ГОСТ 34370-2017.

Измерения ударной прочности проводили по методу Изода с использованием маятникового цифрового копера МТ 203, ООО «Метротекс», г. Москва, в соответствии с ГОСТ 4647-2015.

Результаты и их обсуждение. Сводные результаты испытаний предела прочности на растяжение образцов PETG модифицированных наночастицами WC представлены на рис. 3 наночастицами смеси WC+TiC на рис. 4. Диаграммы изменения характеристик на рис. 5,6

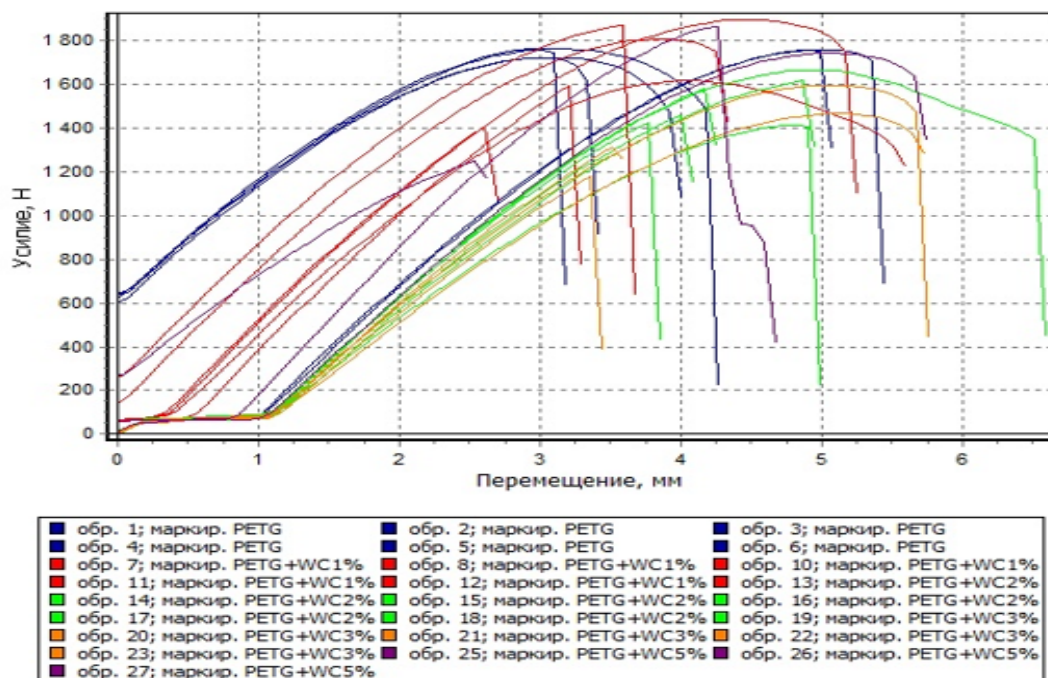


Рис. 3. Протоколы испытаний PETG модифицированных наночастицами WC

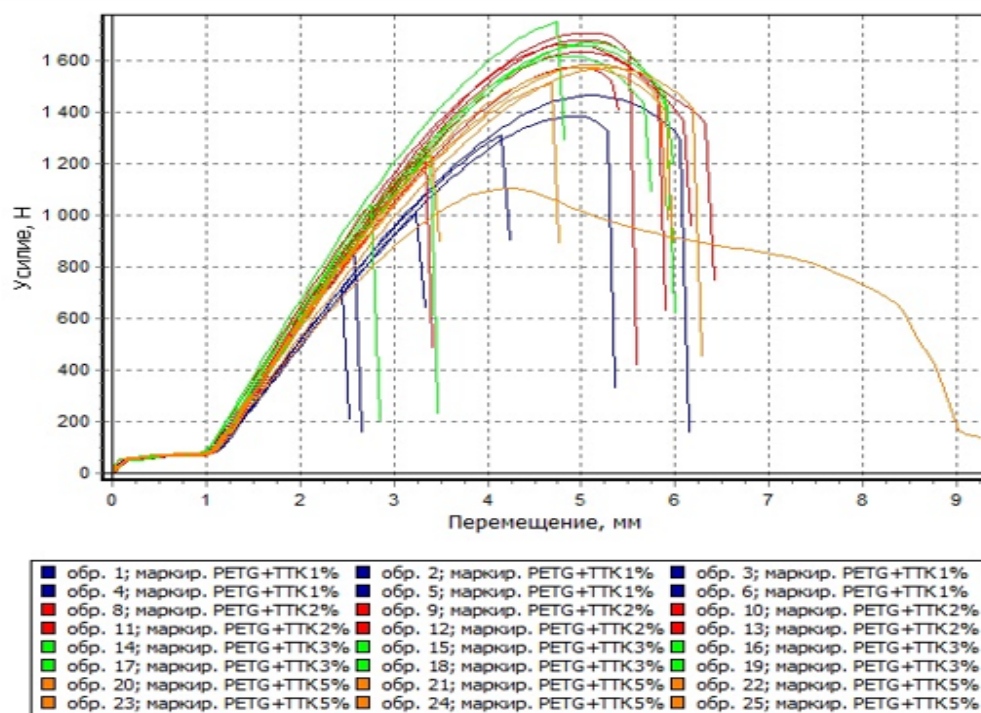


Рис. 4. Протоколы испытаний PETG модифицированных наночастицами WC+TiC

Диаграммы сравнения изменений показателей характеристики предел прочности на растяжение, образцов модифицированных наночастицами WC по сравнению со стандартными образцами представлены на рис.5.



Рис. 5. Изменение характеристик PETG модифицированных наночастицами WC по сравнению с немодифицированными образцами

Диаграммы сравнения изменений показателей характеристики предел прочности на растяжение, образцов модифицированных наночастицами WC+TiC по сравнению со стандартными образцами представлена на рис.6.

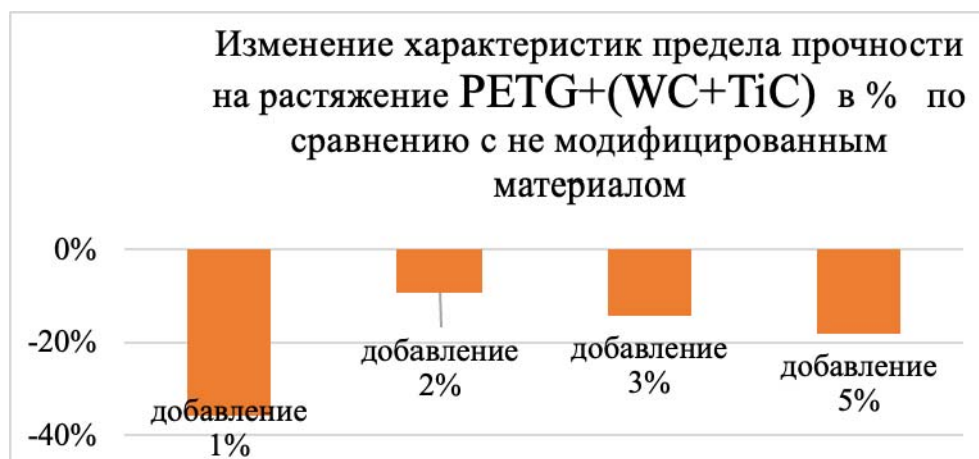


Рис. 6. Изменение характеристик PETG модифицированных наночастицами карбидов WC и TiC по сравнению с немодифицированными образцами

Сводные результаты испытаний ударной прочности образцов PETG модифицированных наночастицами WC смеси WC +TiC представлены в таблице 2.

Диаграмма сравнения изменений показателей характеристик ударная прочность, образцов модифицированных наносоединениями WC в сравнении со стандартными образцами представлена на рис.7.

Таблица 2.

Результаты испытаний ударной прочности образцов PETG+WC и PETG+ (WC +TiC)

Стандарт, кДж/м ²	WC 1%, кДж/м ²	WC 2%, кДж/м ²	WC 3%, кДж/м ²	WC 5%, кДж/м ²	WC+TiC 1%, кДж/м ²	WC+TiC 2%, кДж/м ²	WC+TiC 3%, кДж/м ²	WC+TiC 5%, кДж/м ²
55,61	31,99	39,36	26,23	21,48	33,29	42,27	32,53	37,19
41,45	37,75	26,23	27,25	29,85	31,24	40,63	33,82	28,7
41,33	23,26	30,38	31,24	26,33	25,42	39,7	42,03	27,25
42,39	37,07	29,64	24,61	20,25	41,56	30,17	35,5	30,81
35,84	22,84	37,75	27,35	—	28,59	40,63	39,47	33,4
36,96	22,35	30,06	—	—	32,02	—	34,72	—
41,21	—	32,96	—	—	—	—	—	—

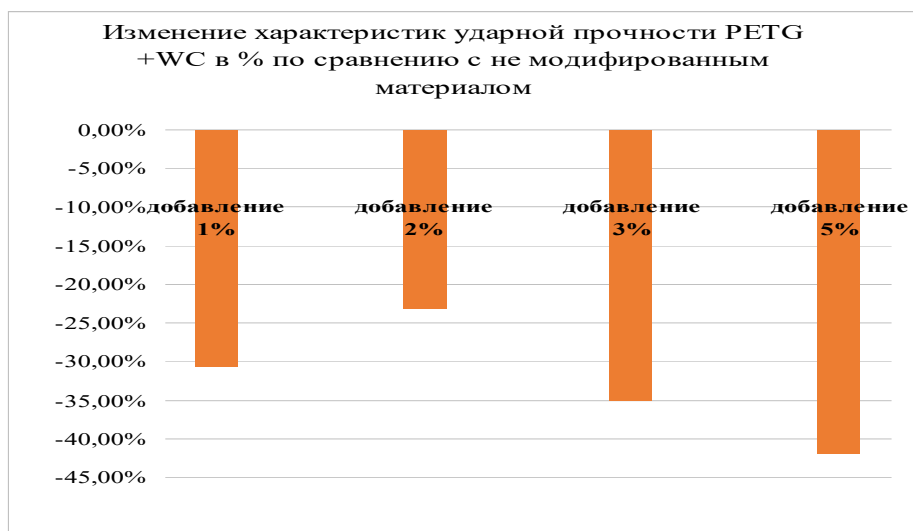
**Рис. 7.** Изменение характеристик ударной прочности PETG модифицированных наночастицами карбидов WC по сравнению с не модифицированными образцами

Диаграмма сравнения изменений показателей характеристики ударная прочность, образцов модифицированных наносоединениями смеси карбидов вольфрама и титана в сравнении со стандартными образцами представлена на рис.8.



Рис. 8. Изменение характеристик ударной прочности PETG модифицированных наночастицами карбидов WC +TiC по сравнению с немодифицированным образцами

Исходя из полученных данных, использование наночастиц WC и наночастицами смеси WC+TiC для модификации матрицы PETG не является целесообразным в виду существенного снижения механических характеристик. Основным отличием PETG от PET является наличие в матрице PETG гликолей. Простым объяснением данных эффектов, должно являться взаимодействие вводимых наночастиц карбида вольфрама с гликолем, но прямого химического взаимодействия между карбидом вольфрама и гликолями ранее до этого не наблюдалось, т.к. в классической химии карбид вольфрама при нормальных условиях устойчив к действию большинства органических соединений, включая гликоли. Также гликоли не обладают достаточной окислительной или кислотной силой, чтобы нарушить кристаллическую решётку карбида вольфрама.

Возможным объяснением наблюдаемых эффектов снижения механических характеристик PETG по сравнению с PET является возникновение каталитических реакций, где катализатором является карбид вольфрама, входящий в состав рассматриваемых модификаторов, или непосредственно взаимодействие карбида вольфрама при повышенных температурах при изготовлении филамента и непосредственно печати. Особенное значение имеет фракция наполнителя, т.к. при уменьшении фракции растет поверхность катализатора, что приводит к существенному улучшению даже слабых каталитических свойств материалов.

На нашем мнению, наблюдаемые эффекты обусловлены возросшими каталитическими свойствами наночастиц карбида вольфрама которые за счет различных химических взаимодействий снижают исходную концентрацию гликолей в PETG или образуют различные соотношения этиленгликоля и 1,2-пропиленгликоля, по сравнению с базовыми. Тем самым изменение баланса или снижение концентраций гликолей, по сравнению с первичным содержанием в полиэтилентерефталате, приводит к снижению механических характеристик. Данное предположение требует дополнительных исследований и является отдельной научной работой.

Заключение. 1. Результаты проведенных исследований показывают снижение предела прочности на разрыв и ударной прочности при введении в матрицу PETG наночастиц WC и наночастиц смеси WC+TiC, при печати методом FDM.

2. Проведенная работа может служить примером необходимости учета возможного увеличения каталитических свойств наночастиц модификаторов для правильного выбора наполнителя, включая ситуации, когда инертный химический материал, не вступающий в прямые реакции с основой наполнителя за счет увеличения каталитических свойств при использовании его в виде наночастиц может существенно изменить механические характеристики конечного изделия.

Список литературы

1. Jiongyi Yan, Emrah Demirci, Andrew Gleadall. Single-filament-wide tensile-testing specimens reveal material-independent fibre-induced anisotropy for fibre-reinforced material extrusion additive manufacturing // *Rapid Prototyping Journal*. 2023. Vol. 29. Issue 7. P. 1453-1470. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2022-0301>
2. Dirk Fischer, Claudia Eßbach, Robert Schönherr, Dagmar Dietrich, Daniela Nickel. Improving inner structure and properties of additive manufactured amorphous plastic parts: The effects of extrusion nozzle diameter and layer height // *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 51. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102596>
3. Olusanmi Adeniran, Weilong Cong, Adedeji Aremu. Material design factors in the additive manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites: A state-of-the-art review. // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2022. Vol. 5. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100100>
4. Shi-Ming Mei, Ben-Guo He, Zheng-Wei Li, Cheng-Xiang Yang, Wei Zhang, Wan-Quan Mei. Comparative evaluation of the physical and mechanical properties of artificial rocks fabricated using four 3D printing technologies. // *Rapid Prototyping Journal*. 2025 Issue. 32, No. 3. P. 730-747. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2025-0280>
5. Wei Chen, Qiuju Zhang, Han Cao, Ye Yuan. Process Evaluation, Tensile Properties and Fatigue Resistance of Chopped and Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites by 3D Printing // *Journal of Renewable Materials*. 2021. Vol. 10, Issue 2. P 329-358. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.016374>
6. Nectarios Vidakis, Constantine David, Markos Petousis, Dimitrios Sagris, Nikolaos Mountakis, Amalia Moutsopoulou. The effect of six key process control parameters on the surface roughness, dimensional accuracy, and porosity in material extrusion 3D printing of polylactic acid: Prediction models and optimization supported by robust design analysis // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2022. Vol. 5. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100104>
7. Xiangren Kong, Guangyong Sun, Quantian Luo, Veniamin Brykin, Jin Qian. Experimental and theoretical studies on 3D printed short and continuous carbon fiber hybrid reinforced composites // *Thin-Walled Structures*. 2024. Vol. 205, Part A. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112406>
8. Jafar Ghorbani, Pratik Koirala, Yu-Lin Shen, Mehran Tehrani. Eliminating voids and reducing mechanical anisotropy in fused filament fabrication parts by adjusting the filament extrusion rate // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 80. P. 651-658. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.026>
9. <https://www.sciencedirect.com>
10. Mohammad Hadi Hosseinzadeh, Amir Azarniya, Mohammad Hassanpour, Mohammad Reza Borhan Panah, Ali Hajitabar, Hossein Abbasi Bafetrat, Milad Sadegh Yazdi. Beyond standard ABS: Recent advances in modified and composite filaments prepared for fused deposition modeling // *Heliyon*. 2025. Vol. 11. Issue 8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e43051>

11. Bandar Almeshari, Harri Junaedi, Muneer Baig, Abdulhakim Almajid. Development of 3D printing short carbon fiber reinforced polypropylene composite filaments // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 24. P. 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.198>
12. Sanjay Kumar, Dong-Hoon Yoo, Jun-Seop Song, Hak-Sung Kim. A critical review of the past, present, and future of 3D printing for continuous and short fiber composites // *Composite Structures*. 2026 Vol. 376. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.119819>
13. Yao Xu, Shengqin Zhao, Chi Hua, Yuxiao Zhao, Leyu Lin. Tribological anisotropy of 3D-printed PEEK composites: Effects of fiber orientation and multi-scale particle reinforcement // *Tribology International*. 2026. Vol. 222. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2026.112099>
14. Tatsuto Yamamoto, Chao Luo, Kouta Ide, Kenji Aoki, Yang-Kai Jian, Yu-Hsi Huang, Yasutomo Uetsuji. Fused filament fabrication and mechanical characterization of hybrid reinforced polypropylene composites with talc fillers and cellulose nanofibers // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025. Vol. 188. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108536>
15. R. Endymion Grosious, Natrayan Lakshmaiya. A novel hybrid-reinforced polycarbonate filament for improving interlayer integrity and strength in fused filament fabrication // *Journal of Materials Research and Technology*. 2026. Vol. 42. P. 889-901. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2026.03.136>
16. Noshin Tasnim Tuli, Sinthea Khatun, Adib Bin Rashid. Unlocking the future of precision manufacturing: A comprehensive exploration of 3D printing with fiber-reinforced composites in aerospace, automotive, medical, and consumer industries // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Issue 5. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27328>
17. Amith S.C., Smruti Rekha Swain, Anand Gobiraman, Arunkumar Thirugnanasambandam. Green solvent assisted hybrid synthesis of PLA/TiO₂ nanocomposite filaments for 3D printing: Mechanical, rheological, and microstructural characterization // *Materials Letters*. 2026. Vol. 406. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2025.139837>
18. Sagheer Gul, Tahira Ali, Saira Jabeen, Muhammad Farooq, Saqib Jamshed. 3D printing of novel antimicrobial composite ink with silver nanoparticles and silica aerogel as bifiller incorporated in polymethylmethacrylate as matrix // *Next Nanotechnology*. 2026. Vol. 9. <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2026.100497>
19. Yan Zhao, Eric Campbell, Timothy Biddle, Sina Jamali, Muhammad J.A. Shiddiky, Yu Lin Zhong. Recent advances in 3D printing of advanced nanocomposites for wearable TENG devices // *Advanced Nanocomposites*. 2026. Vol. 3. P. 84-108. <https://doi.org/10.1016/j.adna.2025.12.004>
20. Michailidis, N.; Petousis, M.; Saltas, V.; Papadakis, V.; Spiridaki, M.; Mountakis, N.; Argyros, A.; Valsamos, J.; Nasikas, N.K.; Vidakis, N. Investigation of the Effectiveness of Silicon Nitride as a Reinforcement Agent for Polyethylene Terephthalate Glycol in Material Extrusion 3D Printing // *Polymers* 16. 2024. № 8: . <https://doi.org/10.3390/polym16081043>
21. Habtemariam Mersha Adam. Emerging advantages and transformative applications of nanocomposites in additive manufacturing: A literature review // *Next Research*. 2026. Vol. 4. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.101155>

