

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ****В. М. Медунецкий^{1*}, М. В. Абрамчук¹, С. Ю. Перепелкина², М. Х. Цветкова¹, С. Ю. Ловлин¹**¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* victor.medunetskiy@itmo.ru

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Проанализированы особенности применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях цилиндрических зубчатых передач. Рассмотрены различные виды композиционных материалов, их свойства, варианты наполнителей и базы данных полимерных композитов. Описаны характеристики ПКМ, используемых в зубчатых звеньях цилиндрических передач, включая зубчатые колеса с несимметричными профилями зубьев, а также оболочковые формообразующие матрицы для изготовления их из ПКМ. Также рассмотрены вопросы обеспечения точности зубчатых передач из ПКМ и предложены методы оценки их уровня качества, включая вероятностный метод расчета точности. Приведены примеры изготовления нестандартных зубчатых передач из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, зубчатые колеса, оболочковые формообразующие матрицы, точность зубчатых передач

Ссылка для цитирования: Медунецкий В. М., Абрамчук М. В., Перепелкина С. Ю., Цветкова М. Х., Ловлин С. Ю. Использование полимерных композиционных материалов в цилиндрических зубчатых передачах // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 878–886. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-878-886.

USE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN SPUR GEAR**V. M. Medunetskiy^{1*}, M. V. Abramchuk¹, S. Yu. Perepelkina², M. H. Tsvetkova¹, S. Yu. Lovlin¹**¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia

* victor.medunetskiy@itmo.ru

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Abstract. The use of polymer composite materials (PCM) in the designs of spur gears is discussed. Various types of composite materials, their properties, options for fillers and databases of polymer composites are analyzed. The characteristics of PCM for gear links of spur gears, including gears with asymmetric profiles, as well as shell forming matrices for their manufacture from PCM, are described. The issues of ensuring the PCM gears precision are also considered and methods for assessing their quality level are proposed, including a probabilistic method for accuracy calculating. Examples of manufacturing non-standard gears from PCM are presented.

Keywords: polymer composite materials, gears, shell forming matrices, precision of gears

For citation: Medunetskiy V. M., Abramchuk M. V., Perepelkina S. Yu., Tsvetkova M. H., Lovlin S. Yu. Use of polymer composite materials in spur gear. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 878–886 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-878-886.

Введение. В настоящее время активно расширяется применение конструкционных полимерных материалов при проектировании элементов зубчатых передач в механизмах мехатронных систем широкого спектра назначения. Преимущества и недостатки как отдельных шестерен, так и целых зубчатых механизмов, изготовленных из полимеров или композитных материалов, исследованы весьма широко [1–4]. Снижение потерь на трение, и как следствие — на износ, повышение долговечности и надежности эксплуатации, а также меньшие, в сравнении с металлами и сплавами, вес изделий и их стоимость являются преимуществами передач, изготовленных из ПКМ. Упомянутые аспекты подробно рассмотрены в статьях [5–9].

У зубчатых колес, выполненных из ПКМ, есть определенные преимущества перед шестернями, изготовленными из металлов: более низкие потери на трение, такие шестерни производят меньше шума при работе, обладают меньшей массой, сохраняют свою смазывающую способность и обладают высокой коррозионной стойкостью.

Однако в устройствах, где используются изготовленные из ПКМ передачи, из-за люфтов в сопряжениях зубьев шестерен и упругих деформаций звеньев при реверсе движения возникает мертвый ход. Это обуславливает потребность в существенном сокращении мертвого хода передачи. В некоторых случаях возникает необходимость в повышении нагрузочной способности зубчатых передач из ПКМ.

Полимерные композиционные материалы. Свойства, приложения, базы данных. Композиты — многокомпонентные материалы, обычно состоящие из пластичной основы (матрицы), укрепленной наполнителями. Матрица-пластификатор отвечает за монолитность материала, тогда как армирующий наполнитель обеспечивает заданные параметры жесткости, деформации, прочности на излом, кручение и т. д. Соединение различных материалов в объеме композита позволяет получать, по сути, новые материалы с различными физическими и/или химическими свойствами, причем отличными от свойств отдельных компонентов. Изменяя в полимерах пластичную основу и комбинируя наполнители, можно добиваться требуемых характеристик материалов.

Плотность ПКМ (около 1400 кг/м^3) до шести раз меньше, чем у сталей (7800 кг/м^3) и цветных металлов, например меди (8900 кг/м^3), как следствие — масса конструкций изделий меньше [10].

Полимерные композиты, в основе которых лежит, например, стекловолокно, обладают отличными диэлектрическими свойствами. Такие ПКМ имеют удельное сопротивление на восемнадцать порядков ниже, чем у углеродистой стали. При этом углепластики обладают токопроводящими свойствами, что также может обеспечить широкое применение.

ПКМ с наполнителями из стекла или базальта не разрушаются в электролитических проводящих средах, что позволяет им не подвергаться коррозии при контакте с почвой или атмосферными осадками. Имеется возможность подобрать полимерные матрицы, которые устойчивы к различным коррозионно-активным средам, включая концентрированные кислоты и щелочи.

Полимерные композиты при своей низкой плотности обладают высокими физико-механическими характеристиками. Например, предел прочности на растяжение у углеродистых сталей составляет 240 МПа , у алюминиевых сплавов — от 50 до 440 МПа , а у полимерных композитов — от 70 (стеклопластик) до 1800 МПа (высокопрочный углепластик) [10].

Армированные пластики при этом несопоставимы по механическим характеристикам с простыми полимерами (поливинилхлорид, полиэтилен и полипропилен).

Коэффициент линейного температурного расширения у полимерных композитов ($(0,45\text{--}8,3) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) значительно ниже, чем у металлов ($(11,9\text{--}14,2) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) и простых полимеров (полиэтилен: $(130\text{--}200) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), что позволяет использовать изделия из ПКМ в широком диапазоне температур.

ПКМ обладают гораздо меньшей, чем у сталей и цветных металлов, теплопроводностью. Использование сэндвич-конструкций позволяет существенно улучшить теплоизоляционные свойства ПКМ. В таких конструкциях различные теплоизолирующие материалы (например, минеральная вата, пенопласт, пенополиуретан) размещаются между слоями ПКМ. Структура „сэндвича“ не только снижает теплопотери, но и придает изделию дополнительную жесткость. Поэтому сэндвич-конструкции из полимерных композитов успешно применяются в различных областях, включая строительство, судостроение, автомобилестроение, авиацию, производство вагонов и локомотивов и др., не только как теплоизоляционные материалы, но и как конструкционные элементы.

Уникальность изделий из полимерных композитов заключается в возможности одновременного создания как материалов, так и изделий. Путем подбора наполнителей, смол и

использования различных методов выкладки или намотки можно производить образцы, соответствующие различным условиям эксплуатации.

Разнообразие состава и свойств полимерных композиционных материалов обусловило появление множества локальных баз данных ПКМ. При этом сложности в формировании материалов и разработке технологий их производства привели к созданию множества программ моделирования на основе математических моделей. Также создаются нормативные документы для помощи в работе при использовании полимерных композиционных материалов, например, ГОСТ Р 56806-2015*.

Можно перечислить некоторые из обширных баз ПКМ:

- 1) Total Materia (Швейцария) [11];
- 2) Material Data Center (Германия) [12];
- 3) база данных Material Data Center от российской компании ООО „Пластинфо.ру“ [13].

Международная база данных Material Data Center содержит обширнейший комплекс характеристик и свойств ПКМ, а также варианты представления и сравнения подобной информации, однако в них преимущественно отсутствует информация об особенностях обработки композитов различными методами [14].

Использование полимерных материалов в зубчатых передачах. Целесообразно рассмотреть характеристики полимеров, из которых можно изготовить композиционные матрицы для дальнейшего применения их в шестернях передач.

Пластмассы PLA и ABS — одни из самых распространенных материалов для производства зубчатых передач. Применение технологий 3D-печати позволяет создавать колеса с необходимыми геометрическими параметрами, при этом значения точностных характеристик готовых изделий не всегда высоки. Самым распространенным недостатком такой технологии является небольшая разрешающая способность, как по горизонтали, так и по вертикали, что приводит к более или менее заметной слоистости поверхности изготовленной модели. Также стоит отметить, что обычные программные решения зачастую не соответствуют требованиям качества, так как образующиеся при трехмерной печати дефекты различного характера коренным образом влияют на конечную точность изделий.

Литье в формовочные матрицы позволяет изготавливать детали любой сложности, включая конусообразные шестерни, и предотвращает появление дефектов на поверхности и пористость. Полученные таким образом детали конструкции могут обладать комбинацией различных физико-механических свойств, таких как жесткость, эластичность, термостойкость, полужесткость, прозрачность.

Для надежной работы изготовленных из ПКМ шестерен необходимо обеспечить максимальное соответствие свойств выбранного материала эксплуатационным требованиям. При высоких нагрузках выбор падает на твердые и жесткие полимерные материалы, включая термопласты с армированием.

Практика показывает, что изделия из полимеров весьма широко применяются в технике [15]. Среди таких материалов можно выделить фторопласты, в том числе с различными наполнителями, а также полиамиды, например, полиамид-6, широко известный как капролон.

Полиамиды, или пластмассы на основе линейных синтетических высокомолекулярных соединений, содержащих в основной цепи амидные группы, характеризуются высокой эластичностью, прочностью, теплостойкостью, твердостью и износостойкостью. Капролон также обладает высокой прочностью на разрыв, у него низкий коэффициент трения почти со всеми металлами, он обладает свойством быстрой приработки, и до семи раз легче стали и бронзы.

Полипропилен принадлежит к классу полиолефинов. Температура его плавления составляет 160–176 °С, а температурное разрушение начинается при 300 °С. Плотность полипропилена составляет 0,90–0,92 г/см³, а усадка порядка 1,3–2,4 %. Основные характеристики

* ГОСТ Р 56806-2015. Композиты полимерные. Идентификация полимерных композитов в электронных базах данных.

полипропилена включают хорошую износостойкость, устойчивость к кислотам и щелочам, а также к воде, повышенную ударпрочность, устойчивость к изгибающим нагрузкам и использование изделий из этого материала при максимальной рабочей температуре в пределах 120–140 °С [16].

Распространенный полимер фторопласт имеет крайне низкую поверхностную энергию и поэтому может быть использован как антиадгезионный материал. Он обладает стойкостью к старению в обычных условиях и высокими антифрикционными свойствами, исключительно низким коэффициентом трения (при определенных условиях и в зубчатых парах коэффициент трения доходит до 0,02) [17].

Композиции на основе фторопластов широко используются для улучшения свойств изделий путем добавления наполнителей, которые повышают их износостойкость, прочность, твердость или эластичность. В качестве наполнителей для фторопластовых композиций используются материалы, которые могут выдерживать температуру спекания фторопласта: порошковые (минеральные, органические или металлические), волокнистые и каркасные наполнители для армирования. Последние можно разделить по следующим группам:

- сетка из металла, спрофилированная под необходимый объем;
- многократно спрофилированная фольга в заданный объем.

Жесткость композита возрастает, если в качестве наполнителя применяются асбестовая ткань, кремнеземы, металлическая вата. При этом относительная деформация материала будет снижаться при малых значениях коэффициента трения [18].

Высокоточная обработка изделия из ПКМ обеспечивает длительный срок службы без необходимости смазки, что особенно важно в полупроводниковой, пищевой, упаковочной, а также медицинской промышленности.

Благодаря низким потерям при трении зубчатые колеса из ПКМ, в сравнении с обычными шестернями из металла, характеризуются пониженным шумом, а также высоким коэффициентом полезного действия. Точность изготовления и прочность передачи определяют выбор размеров зубчатого колеса, надежность сопряжений и расположение усиливающих элементов детали. Шестерни из ПКМ могут быть целиком изготовлены из полимерных материалов или армированы [19].

Полимерные композиционные материалы в зубчатых колесах с нестандартной формой профиля зубчатого венца. Чтобы увеличить как нагрузочную способность передачи, так и срок эксплуатации, предлагается конструкции зубьев передачи изготавливать с ассиметричным профилем венца у зубьев шестерен. Подобное решение целесообразно использовать в случае разницы крутящих моментов при реверсе движения зубчатой передачи [20]. Такой подход продемонстрирован на рис. 1, где показаны зубцы эвольвентного колеса с несимметричной формой профиля, которые образуются от двух основных окружностей диаметром d_{ba} и d_{bb} (d_a — диаметр внешней окружности по вершинам зубьев, d_f — диаметр наружной окружности по вершинам зубьев венца, d — делительный диаметр).

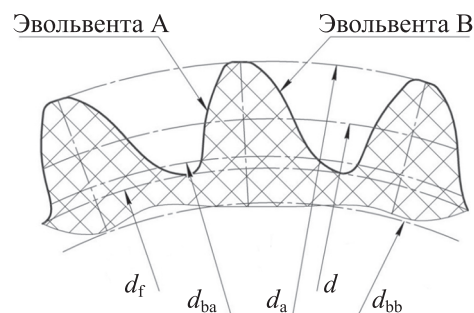


Рис. 1

Практика показывает, что создавать высококачественные поверхности венцов зубьев возможно из композиционных термопластичных материалов посредством литья в оболочковые формообразующие матрицы [21, 22], а наполнять матрицы — из реактопластов (термореактивных материалов), например, из полимеров на основе эпоксидной и фенолформальдегидной смолы. Физико-механические свойства термореактивных материалов остаются стабильными при изменении условий окружающей среды. Благодаря прочности, электроизоляционным свойствам и способности работать при высоких температурах фенопласты широко применяются в конструктивных, фрикционных и антифрикционных элементах приборов и узлов машин [23].

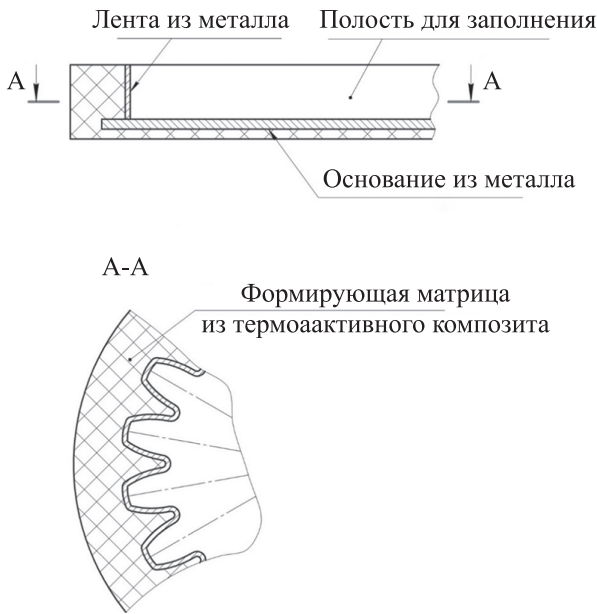


Рис. 2

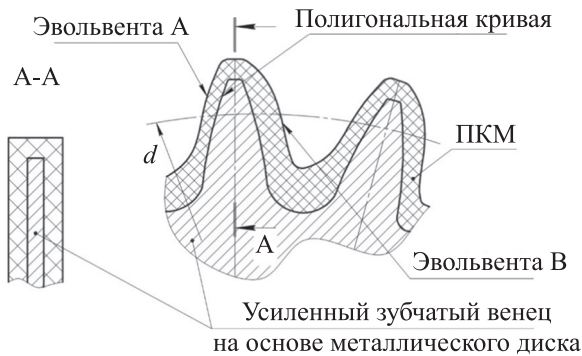


Рис. 3

Поверхности внутренних элементов, формирующие полость, представляют собой металлическую оболочку. Это возможно выполнить, если применяется изогнутый по контуру мастер-модели зубчатый венец шестерни. Для подобного варианта следует применять холоднокатаную ленту из низкоуглеродистой стали, которая зачастую используется при гибке деталей. Стоит отметить, что на внутренней (прилегающей к заготовке) стороне металлической ленты необходимо создать микрорельеф с заданными функциональными параметрами, при этом на другой стороне поверхности — с достаточной шероховатостью для прочного соединения с материалом формообразующей матрицы. Повышение значений шероховатости приводит к повышению адгезионной и когезионной прочности.

В настоящее время мастер-модель формирования корпуса целесообразно изготавливать на 3D-принтере. Такая конструкция формирующей матрицы представлена на рис. 2.

Следует отметить, что для повышения изгибной прочности зубьев предлагается использовать шестерни с усиленными (армированными) дисками, у которых венцы усилены металлом. На рис. 3 зубья венца выполнены из композитного материала, при этом профиль зубьев является несимметричным, а армирующий металлический зубчатый венец выполнен симметричным.

Оценка точности нестандартных передач из ПКМ.

Поскольку изделиям, выполненным из ПКМ, свойственны усадка и коробление (неравномерная усадка), среди качественных показателей оценки зубчатых передач будем рассматривать точность. Для передач зацеплением, к которым относятся зубчатые передачи различных видов, точность является основным показателем качества в связи с ограниченной номенклатурой применяемых при их изготовлении материалов.

В Российской Федерации по ГОСТ 1643-81, для передач с модулем зуба $m \geq 1$ мм, нормируют двенадцать степеней точности, устанавливают шесть видов сопряжений: А, В, С, D, Е, Н и восемь видов допуска T_{jn} на зазор: x, y, z, a, b, c, d, h. Точность изготовления зубчатой передачи устанавливают с помощью степени точности, а требования к зазору — видом сопряжения по нормам зазора.

Для цилиндрических зубчатых передач, преимущественно эвольвентных, с учетом погрешностей монтажа предельные значения кинематической погрешности передачи F'_{i0} рассчитываются по следующим формулам:

$$F'_{i0\min} = 0,62K_s(F'_{i1} + F'_{i2}), \quad (1)$$

$$F'_{i0\min} = 0,71K_s(F'_{i1} + F'_{i2}), \quad (2)$$

$$F'_{i0\max} = K \left[\sqrt{(F'_{i1})^2 + E_{\Sigma M_1}^2} + \sqrt{(F'_{i2})^2 + E_{\Sigma M_2}^2} \right], \quad (3)$$

где индексы „1“ и „2“ относятся к соответственно ведущему и ведомому зубчатым колесам; K , K_s — коэффициенты фазовой компенсации, которые учитывают степень изменения кинематиче-

ской погрешности от начального положения звеньев; F'_i — кинематическая погрешность зубчатого колеса; $E_{\Sigma M}$ — суммарная приведенная погрешность монтажа (согласно ГОСТ 21098-82).

Выражение (1) применяется для колес со степенями точности 3–6, (2) — для колес со степенями точности 7 и 8, (3) — для всех степеней точности.

Кинематическая погрешность колеса определяется согласно ГОСТ 1643-81 как сумма допусков на накопленную погрешность шага (F_p) и погрешность профиля зуба (f_f).

Минимальные и максимальные величины кинематического мертвого хода передачи составляют:

$$j_{tmin} = \frac{j_{min}}{\cos\alpha\cos\beta},$$

$$j_{tmax} = 0,7(E_{Hs1} + E_{Hs2}) + \sqrt{0,5(T_{H1}^2 + T_{H2}^2 + 2f_a^2 + G_{r1}^2 + G_{r2}^2)},$$

где j_{min} — гарантированный боковой зазор (нормальный); α — угол исходного профиля; β — делительный угол наклона линии зуба; E_{Hs} — наименьшее дополнительное смещение исходного контура; T_H — допуск на смещение исходного контура; $\pm f_a$ — предельные отклонения межосевого расстояния; G_r — радиальный зазор в опорах (по ГОСТ 20198-82).

Величина $E_{\Sigma M}$ для зубчатых колес вычисляется по следующему выражению:

$$E_{\Sigma M} = \sqrt{\left(\frac{e_r \operatorname{tg}\beta}{\cos\beta}\right)^2 + (e_a \operatorname{tg}\beta)^2},$$

где e_r и e_a — монтажные радиальное и осевое биения зубчатого колеса соответственно (показатели точности монтажа зубчатых колес), их расчет описан в ГОСТ 21098-82.

Предполагается, что $G_r = e_r$. Обе величины, e_r и e_a , связаны с вариантом соединения зубчатого колеса с валом.

Значение e_r рассчитывается по формуле:

$$e_r = \left(F_r + e_{\Pi} + e_{\text{в}} + K_{ia} \frac{a + b}{l} \right),$$

где F_r — допуск на радиальное биение зубчатого венца шестерни, его значение находится по ГОСТ 1643-81; e_{Π} — зазор в посадке колеса на вал, зависящий от конструкции соединения и используемой посадки; $e_{\text{в}}$ — допуск на радиальное биение посадочной ступени вала под шестерню относительно цапфы вала (у гладких валов $e_{\text{в}} = 0$), определяется согласно ГОСТ 24643-81; K_{ia} — радиальное биение внутреннего кольца шарикоподшипника, величина K_{ia} принимается согласно ГОСТ 520-2011.

Значения a , b и l определяются согласно рис. 4, на котором представлены вариации расположения шестерни на валу передачи. Для передач, у которых угол наклона зубьев $\beta = 0$, $e_a = 0$.

Помимо вышеописанного для точностных расчетов можно применять, например, метод моделирования случайных чисел (метод Монте-Карло), при котором составляющие показателей точности будут случайными величинами из определенных интервалов значений [24, 25].

Закключение. Таким образом, в настоящей работе предложены различные примеры нестандартных зубчатых передач, выполненных из ПКМ, в частности, зубчатые колеса с несимметричным армированием зубьев, а также рассмотрены особенности их изготовления. Проанализированы виды композиционных материалов и их характеристики, обеспечивающие

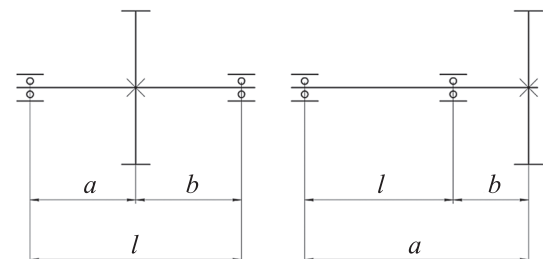


Рис. 4

возможность использования в зубчатых звеньях цилиндрических передач, а также оболочковые формообразующие матрицы для их изготовления из ПКМ. Рассмотрены основные вопросы обеспечения точности зубчатых передач из ПКМ и математические зависимости для оценки их уровня качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghosh R., Ghosh S., Srivastava T., Barman R. N. Design and Manufacturing of Laminated Spring: A New Approach Based On Composites // Intern. Journ. of Engineering and Technology. 2017. Vol. 9, N 2. P. 438–451. DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i2/170902285.
2. Chatterjee S., Gupta K. A comparative analysis on two gear tooth materials for low speed and high torque transmission // Advances in Modelling and Analysis C. 2018. Vol. 73, N 3. P. 79–83. DOI: 10.18280/ama_c.730301.
3. Pawar P. B., Abhay A. U. Analysis of Composite Material Spur Gear under Static Loading Condition // Materials Today: Proc. 2015. Vol. 2, N 4-5. P. 2968–2974. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.278.
4. Thirugnanam A., Sathish J., Rakesh L. Contact analysis of spur gear using composite material (NYLO CAST) // Middle-East Journal of Scientific Research. 2014. N 20(8). P. 966–968. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.20.08.114144.
5. Mao K., Greenwood D., Ramakrishnan R., Goodship V., Shroufi C., Chetwynd D., Langlois P. The wear resistance improvement of fibre reinforced polymer composite gears // Wear. 2019. N 426. P. 1033–1039. DOI: 10.1016/j.wear.2018.12.043.
6. Cetera P. G., Mundo D., Gagliardi F., Treviso A. A comparative analysis of adhesive bonding and interference fitting as joining technologies for hybrid metal-composite gear manufacturing // Intern. Journ. on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2020. P. 1–16. DOI: 10.1007/s12008-020-00647-y.
7. Cetera P. G., Mundo D., Treviso A., Gagliardi F., Visiolia A. On the design and simulation of hybrid metal-composite gears // Applied Composite Materials. 2019. N 26(3). P. 817–833. DOI: 10.1007/s10443-018-9753-6.
8. Gauntt S. M., Campbell R. L. Characterization of a Hybrid (Steel-Composite) Gear with Various Composite Materials and Layups // AIAA Scitech 2019 Forum. 2019. P. 0146. DOI: 10.2514/6.2019-0146.
9. Singh A. K., Yadav S., Singh P. K. A Comparative Study for Transmission Efficiency of ABS, POM, and HDPE Spur Gears // Advances in Engineering Design. 2019. P. 269–277. DOI: 10.1007/978-981-13-6469-3_24.
10. Что такое полимерный композиционный материал [Электронный ресурс]: <<https://vec-v.ru/chto-takoe-polimernyy-kompozit>>.
11. Total Materia. The most extensive database of materials in the world [Электронный ресурс]: <<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=RU>>.
12. Material Data Center. Data on materials and their applications [Электронный ресурс]: <<https://www.materialdatacenter.com/mb>>.
13. База полимерных материалов [Электронный ресурс]: <<https://plastinfo.ru/polyglobe>>.
14. Кряжев Ю. А., Андреев М. В., Шутюк А. А. Формирование базы данных полимерных композитов // Инновации в машиностроении: сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 491–497.
15. González-Henríquez C. M., Sarabia-Vallejos M. A., Rodríguez-Hernández J. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications // Progress in Polymer Science. 2019. Vol. 94. P. 57–116. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001.
16. Goh G. D., Yap Y. L., Tan H. K. J., Sing S. L., Goh G. L., & Yeong W. Y. Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2020. N 45(2). P. 113–133. DOI: 10.1080/10408436.2018.1549977.
17. Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components / Ed. by K. Friedrich, R. Walter. Woodhead Publishing, 2020. 458 p. DOI: 10.1016/C2018-0-03664-6.
18. Directory of polymers. Polymer materials: products, equipment, technologies [Электронный ресурс]: <<http://www.polymerbranch.com/catalog.html>>.
19. Karapetyan A. N., Scharr G. The choice of polymeric materials in the design of gear wheels // Proc. of the NAS RA and SEUA: Technical Sciences. 2007. N 60(2). P. 266–271.
20. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В., Шилько С. В. Элементы привода приборов: расчет, конструирование, технологии. Минск: Белорусская наука, 2012. 769 с.
21. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В., Шилько С. В. Технология производства зубчатых колес из термопластичных полимерных материалов (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 6–31.
22. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В. Проектирование прессформ для точных пластмассовых колес с использованием технологии быстрого прототипирования // Прогрессивные технологии в машиностроении и приборостроении. 2005. С. 28–29.

23. Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С. Технологии получения и свойства фенолформальдегидных смол и композиций на их основе // Науч. обзор. Техн. науки. 2017. № 2. С. 15–28.
24. Абрамчук М. В. Совершенствование расчетов параметров точности зубчатых колес, зубчатых передач и многозвенных зубчатых механизмов: Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2014. 183 с.
25. Абрамчук М. В. Расчет параметров точности эвольвентных цилиндрических зубчатых передач // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 118–122.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- | | |
|-------------------------------------|---|
| Виктор Михайлович Медунецкий | — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; профессор;
E-mail: victor.medunetskiy@itmo.ru |
| Михаил Владимирович Абрамчук | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: abramchukmv@itmo.ru |
| Светлана Юрьевна Перепелкина | — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа автоматизации и робототехники; доцент; E-mail: Svetlana.yu.perepelkina@gmail.com |
| Мадина Хасановна Цветкова | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: madinatcvetkova@itmo.ru |
| Сергей Юрьевич Ловлин | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: seri-l@yandex.ru |

Поступила в редакцию 21.04.24; одобрена после рецензирования 30.04.24; принята к публикации 23.08.24.

REFERENCES

1. Ghosh R., Ghosh S., Srivastava T., Barman R.N. *International Journal of Engineering and Technology*, 2017, no. 2(9), pp. 438–451, DOI: 10.21817/ijet/2017/v9i2/170902285.
2. Chatterjee S., Gupta K. *Advances in Modelling and Analysis C*, 2018, no. 3(73), pp. 79–83, DOI: 10.18280/ama_c.730301.
3. Pawar P.B., Abhay A.U. *Materials Today*, 2015, no. 4-5(2), pp. 2968–2974, DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.278.
4. Thirugnanam A., Sathish J., Rakesh L. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2014, no. 20(8), pp. 966–968, DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2014.20.08.114144.
5. Mao K., Greenwood D., Ramakrishnan R., Goodship V., Shrouti C., Chetwynd D., Langlois P. *Wear*, 2019, no. 426, pp. 1033–1039, DOI: 10.1016/j.wear.2018.12.043.
6. Catera P.G., Mundo D., Gagliardi F., Treviso A. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2020, pp. 1–16, DOI: 10.1007/s12008-020-00647-y.
7. Catera P.G., Mundo D., Treviso A., Gagliardi F., Visrolia A. *Applied Composite Materials*, 2019, no. 26(3), pp. 817–833, DOI: 10.1007/s10443-018-9753-6.
8. Gauntt S.M., Campbell R.L. *AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019, pp. 0146, DOI: 10.2514/6.2019-0146.
9. Singh A.K., Yadav S., Singh P.K. *Advances in Engineering Design*, 2019, pp. 269–277, DOI: 10.1007/978-981-13-6469-3_24.
10. <https://vec-v.ru/chto-takoe-polimernyy-kompozit>. (in Russ.)
11. *Total Materia*, <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=RU>.
12. *Material Data Center*, <https://www.materialdatacenter.com/mb>.
13. <https://plastinfo.ru/polyglobe>. (in Russ.)
14. Kryazhev Yu.A., Andreev M.V., Shityuk A.A. *Innovatsii v mashinostroyenii* (Innovations in Mechanical Engineering), Collection of works of the IX Intern. Scientific and Practical Conf., 2018, pp. 491–497. (in Russ.)
15. González-Henríquez C.M., Sarabia-Vallejos M.A., Rodríguez-Hernández J. *Progress in Polymer Science*, 2019, vol. 94, pp. 57–116, DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001.
16. Goh G.D., Yap Y.L., Tan H.K.J., Sing S.L., Goh G.L., & Yeong W.Y. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020, no. 45(2), pp. 113–133, DOI: 10.1080/10408436.2018.1549977.
17. Friedrich K., Walter R., eds. *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components*, Woodhead Publishing, 2020, 458 p., DOI: 10.1016/C2018-0-03664-6.
18. *Directory of polymers*, <http://www.polymerbranch.com/catalogp.html>.
19. Karapetyan A.N., Scharr G. *Proceedings of the NAS RA and SEUA: Technical Sciences*, 2007, no. 2(60), pp. 266–271.
20. Starzhinsky V.E., Shalobaev E.V., Shilko S.V. *Elementy privoda priborov: raschet, konstruirovaniye, tekhnologii* (Elements of Device Drives: Calculation, Design, Technologies), Minsk, 2012, 769 p. (in Russ.)
21. Starzhinsky V.E., Shil'ko S.V., Shalobaev E.V. *Polimernyye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2(4), pp. 6–31. (in Russ.)
22. Starzhinsky V.E., Shalobaev E.V. *Progressivnyye tekhnologii v mashinostroyenii priborostroyenii* (Progressive Technologies in Mechanical Engineering and Instrument Making), 2005, pp. 28–29. (in Russ.)
23. Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S. *Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskiye nauki*, 2017, no. 2, pp. 15–28. (in Russ.)

24. Abramchuk M.V. *Sovershenstvovanie raschetov parametrov tochnosti zubchatykh koles, zubchatykh peredach i mnogozvennykh zubchatykh mekhanizmov* (Improvement of Calculations of Precision Gears, Gears and Gear Multi-Link Mechanisms), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2014, 183 p. (in Russ.)
25. Abramchuk M.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 2(61), pp. 118–122. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Victor M. Medunetsky	—	Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Professor; E-mail: victor.medunetskiy@itmo.ru
Mikhail V. Abramchuk	—	PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: abramchukmv@itmo.ru
Svetlana Yu. Perepelkina	—	PhD; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Graduate School of Automation and Robotics; Associate Professor; E-mail: Svetlana.yu.perepelkina@gmail.com
Madina H. Tsvetkova	—	PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: madinatcvetkova@itmo.ru
Sergei Yu. Lovlin	—	PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: seri-l@yandex.ru

Received 21.04.24; approved after reviewing 30.04.24; accepted for publication 23.08.24.