

УДК 539.4; 621.833.678

С.В. ШИЛЬКО, канд. техн. наук, доц.
заведующий лабораторией «Механика композитов и биополимеров»¹
E-mail: shilko_mpri@mail.ru

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д-р техн. наук, доц.
E-mail: star_mpri@gmail.com

В.В. ДУБРОВСКИЙ
научный сотрудник¹
E-mail: vlad.mpri@gmail.com

Е.В. ШАЛОБАЕВ, канд. техн. наук, проф.
президент²
E-mail: shalobaev47@mail.ru

М.В. ЧЕРНЕЦ, д-р техн. наук, проф.
главный научный сотрудник научно-исследовательской части³
E-mail: myron.czerniec@gmail.com

¹Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

²Международный консорциум фундаментального образования, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

Поступила в редакцию 04.04.2024.

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И РАСЧЕТА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ДЛЯ НОВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ (ОБЗОР)

Описаны новые приложения и современные методы изготовления зубчатых колес из полимерных композитов с использованием аддитивных технологий (3D-печати) и технологий микроэлектроники (выжигания и быстрого прототипирования из фотополимеров). Рассмотрены методы расчета несущей способности, износа и долговечности полимерных и металлополимерных зубчатых передач (прямо- и косозубых цилиндрических, конических), основанные на методологии механики композитов и феноменологической модели усталостного изнашивания при трении скольжения. Показано применение аналитических решений для быстрого параметрического анализа напряженно-деформированного состояния зубчатых колес, а также использование их пространственной дискретизации конечными и граничными элементами, учитывающей реальную геометрию зацепления. Рассмотрено применение зубчатых колес в приводах микроэлектромеханических систем и специфика расчетов, обусловленная усилением адгезионного взаимодействия в контакте зубьев сверхминиатюрных зубчатых колес. Отмечены особенности деформирования полимерных композитов как структурно-неоднородных и физически нелинейных материалов, что следует учитывать при определении кинематической точности передач. В этой связи обсуждаются возможности трехуровневого метода проектирования зубчатых колес из дисперсно-наполненных полимерных композитов по критериям прочности, деформативности и износостойкости. Предлагаемый метод предусматривает итерационную процедуру оптимизации состава материала и параметров зубчатого зацепления, каждый этап которой включает аналитическое моделирование используемых дисперсно-армированных композитов (микроуровень), расчетно-экспериментальную проверку микромеханических моделей на тест-образцах (мезоуровень) и численный анализ напряженно-деформированного состояния зубчатых колес методом конечных элементов (макроуровень).

Ключевые слова: зубчатые колеса, полимерные композиты, аддитивные технологии, прочность, микроэлектромеханические системы, деформативность, износостойкость, методы расчета металлополимерных передач

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-53-62>

Введение. Зубчатые передачи и их компоненты в виде зубчатых колес (ЗК) считаются весьма «консервативными» представителями машин и механизмов с их традиционными приложениями, технологиями изготовления, устоявшейся терминологией, методами расчета и проектирования [1, 2]. Например, в работе [3] и авторских обзорах [4, 5] в определенной степени подведены итоги развития исследований и освоения производства зубчатых передач с колесами из термопластичных полимерных материалов, изготавливаемых методом литья под давлением. Этот метод имеет огромные преимущества перед формообразованием зубчатого венца механической обработкой, обеспечивая существенную экономию и повышенное качество рабочей поверхности зубьев, особенно для дисперсно-наполненных полимеров. Но для литья зубчатых колес приемлемой точности требуется поэтапная корректировка формообразующих размеров зубчатых матриц, обусловленная технологической усадкой полимерного материала при остывании в литейной форме и последующей выдержке.

Методология такой корректировки отработана, однако процесс подготовки производства трудоемок и предполагает большие затраты времени на изготовление и метрологический контроль опытной партии зубчатых колес, корректировку размеров формообразующей матрицы, изготовление и измерение представительной партии зубчатых колес с контролируемыми размерами, соответствующими чертежу. В этой связи продолжают попытки совершенствования известных стандартизованных методик для более полной характеристики качества литых полимерных ЗК и зависимости усадки от скорости охлаждения [6].

Вместе с тем сравнительно недавно появились новые сферы применения и перспективные технологии, представляющие интерес для разработчиков ЗК.

В данной обзорной статье рассмотрены технологии, привлекаемые в последнее время при изготовлении зубчатых колес из армированных полимерных композитов в русле аддитивных подходов к производству изделий, а также технологии быстрого прототипирования, до недавнего времени используемые преимущественно в микроэлектронике. Особое внимание уделено применению в прочностных и триботехнических расчетах ЗК методов моделирования, развитых в механике и трибологии композиционных материалов.

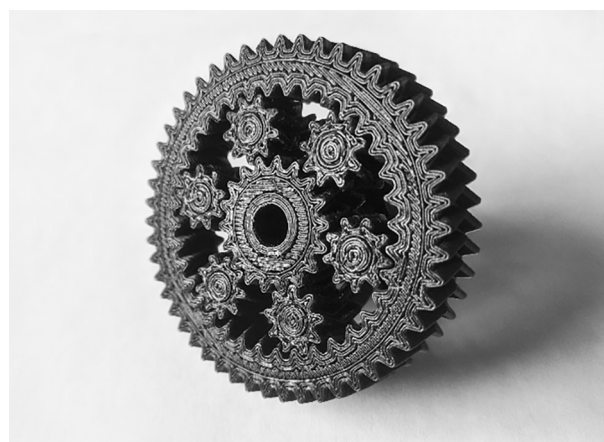
Опыт изготовления полимерных зубчатых колес по аддитивным технологиям. Ниже анализируются результаты применения аддитивных технологий изготовления зубчатых передач в машиностроении. Как было отмечено в статье [7], использование управляемой 3D-печати зубчатых колес из антифрикционных конструкционных композитов имеет существенные преимущества

перед традиционными (включая литье под давлением) технологиями. В работах [8, 9] это показано при изготовлении прямозубых зубчатых передач. Внедрению аддитивных технологий в машиностроении способствует разработка систем автоматизированного проектирования и внедрение стандартного программного обеспечения для зубчатых передач [10]. Проводимые в настоящее время исследования включают также анализ технологических и физико-механических свойств расходных материалов для 3D-печати на основе нитрида и карбида кремния. В качестве примера уникальных технологических возможностей 3D-печати на рисунке 1 представлен опытный образец планетарной передачи [11], в которой зубчатые венцы сателлитов, солнечного и эпициклического колес выполнены шевронными, что невозможно реализовать никакими другими способами.

На основе микро- и макромеханики дисперсно-наполненных материалов сделаны первые шаги в создании специальных CAD-моделей для



a



b

Рисунок 1 — Опытный образец планетарной передачи с шевронными зубчатыми венцами сателлитов солнечного и эпициклического колес [11]
Figure 1 — Prototype of planetary gear with herringbone rims of satellites of sun and epicyclic wheels [11]

3D-печати элементов конструкций и деталей узлов трения из двух- и более компонентных материалов, состав которых оптимизирован по критериям прочности и износостойкости. Таким образом, 3D-печать позволяет получить не только требуемую форму изделия, но и оптимальное пространственное распределение (градиент) упругих и прочностных свойств материала по глубине, как это реализовано в биологических конструкциях, например суставах [12]. Это минимизирует концентрацию напряжений в поверхностных слоях зубчатых колес, что дает существенное повышение их контактной прочности и износостойкости в сравнении с ЗК из однородных материалов.

Применение полимерных связующих для изготовления изделий из керамополимерных композитов методами аддитивных технологий показано в работе [13].

Технологии изготовления зубчатых колес для микроэлектромеханических систем. Вкратце рассмотрим получение зубчатых колес микрометрических размеров с использованием технологий выжигания и быстрого прототипирования из фотополимеров высокоэнергетическим воздействием лазерного излучения, пришедшим на смену традиционному методу литья мелко модульных ЗК под давлением [14]. Для получения прототипов и формообразующего инструмента, необходимых для изготовления сверхминиатюрных ЗК, определяются так называемые конструктивный, технологический и производственный инварианты. Можно отметить, что наивысшая эффективность получения опытных образцов на стадии освоения новых для машиностроения технологических процессов, например стереолитографии [15], достигается при использовании быстрого прототипирования.

В качестве конструктивного инварианта зубчатого колеса целесообразно взять плоский элемент (слой). Предпочтительным технологическим инвариантом является операция выжигания материала заготовки воздействием излучения высокой интенсивности либо послойного выращивания изделия фотополимеризацией жидкой смолы. В обоих случаях представляется эффективным применение лазерного источника света и использование в качестве производственного инварианта лазерной установки (оптического квантового генератора). Помимо вышеназванных технологических преимуществ, использование лазерной техники является эффективным средством обеспечения точности зубчатых колес с модулем зацепления, не превышающим десятки доли миллиметра [16]. Тем самым на одной установке могут изготавливаться как формообразующий инструмент, так и непосредственно сложнопрофильные изделия, какими являются зубчатые колеса.

Стереолитография, ориентированная на фотополимеры, отверждающиеся под действием ульт-

рафиолетового излучения, ограничена высокой стоимостью и малым ресурсом работы лазеров. Более предпочтительным является использование лазеров видимого и инфракрасного излучения, что оказывается возможным при наличии подходящих фотополимерных смол.

Технологический процесс получения сверхминиатюрных зубчатых колес включает следующие последовательные этапы [17].

1. Получение исходной информации о геометрии зубчатого колеса.
2. САПР поверхности изделия.
3. Разработка компьютерной модели эвольвентного профиля и переходной кривой зуба, например, при помощи набора кривых различного радиуса.
4. Проектирование технологической модели. Изготовление прототипа изделия.

Расчет зубчатых колес из дисперсно-наполненных полимерных материалов. В то время как методы расчета параметров формообразующих матриц для полимерных зубчатых колес разработаны достаточно основательно [1, 2, 18], остаются актуальными исследования в области трибологии зубчатых передач с колесами из полимерных композитов в связи с необходимостью учета фрикционно-механических особенностей указанных материалов [19] в рамках известных теорий изнашивания [20–22]. В частности, в трибоанализе зубчатых передач с металлическими колесами часто используется закон абразивного изнашивания. Однако испытания полимерных композиционных материалов указывают, что их разрушение при сухом трении происходит, как правило, по усталостному механизму изнашивания.

Весьма важным является учет фактора дисперсного армирования полимерных материалов, широко применяемого для повышения прочности и износостойкости зубчатых колес, в том числе для компенсации снижения модуля упругости и предела прочности материала колес, получаемых методом 3D-печати, из-за повышенной пористости. Существующие способы введения в полимерную матрицу шарообразных частиц и коротких волокон, в том числе наноразмерного уровня, весьма технологичны и обеспечивают существенное улучшение трибомеханических свойств ЗК благодаря эффектам армирования и самосмазывания. Моделирование напряженно-деформированного состояния и процесса изнашивания прямозубых зубчатых колес из стекло- и углепластиков на основе полиамида в работе [23] показало возможность кратного увеличения ресурса зубчатой передачи в результате одновременного повышения характеристик изгибной прочности и износостойкости колес при оптимальном объемном содержании дисперсного волокнистого наполнителя, что было подтверждено при проведении трибоиспытаний указанных материалов в условиях сухого трения.

Обобщенный метод исследования металлополимерных зубчатых передач (аналитическое решение). Рассмотрим обобщенный метод расчета несущей способности, износа и долговечности различных зубчатых передач (прямо- и косозубых цилиндрических и конических), основанный на аналитическом решении задачи о контакте сопряженных зубьев в предположении усталостного изнашивания полимерных материалов при трении скольжения [24, 25]. Здесь учитываются следующие факторы: угол наклона зубьев, парность и корригирование зацепления, максимальные давления в произвольной точке контакта, износостойкость материалов колес, износ зубьев и его влияние на контактные давления, радиус кривизны зубьев и ресурс передачи.

Линейный износ зубьев h'_{kj} в j -х точках контакта зубьев за один оборот колеса вычисляется по формуле, предложенной в [24, 25]:

$$h'_{kjn} = \frac{v_j t'_{jh} (fp_{jh\max})^{m_k}}{C_k \tau_s^{m_k}}, \quad k = 1; 2, \quad (1)$$

где $t'_{jh} = 2b_{jh} / v_0$ — время изнашивания зубьев при перемещении j -й точки контакта по контуру зуба на ширину площадки контакта $2b_{jh} = \text{var}$; $p_{jh\max}$ — максимальное начальное контактное давление в j -й точке зацепления; $j = 1, 2, 3, \dots$ — точки на профиле зубьев; k — нумерация колес (1 — шестерня, 2 — колесо); $v_0 = \omega_1 r_1 \sin \alpha$ — скорость перемещения точки контакта по профилю зуба; ω_1 — угловая скорость шестерни; r_1 — радиус делительной окружности шестерни; v_j — скорость скольжения; $\alpha = 20^\circ$ — профильный угол; f — коэффициент трения скольжения; C_k, m_k — характеристики износостойкости материалов [26]; $\tau_s = 0,5\sigma_B$ — предел прочности композита на срез; σ_B — предел прочности материалов колес при растяжении.

Текущие значения контактного давления $p_{jh\max}$ и ширины зоны контакта $2b_{jh}$ в результате износа зубьев определяются по модифицированным формулам Герца:

$$\begin{aligned} p_{jh\max} &= 0,564 \sqrt{N'\theta / \rho_{jh}}; \\ 2b_{jh} &= 2,256 \sqrt{\theta N' \rho_{jh}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $N' = N/bw$ — прямозубая передача, $N' = N/l_{\min} w$ — косозубая передача; b — ширина прямозубой шестерни; l_{\min} — минимальная длина контактной линии [24]; w — число пар зацеплений зубьев; $N = 9550PK_g/r_1 n_1 \cos \alpha$ — сила, действующая в зацеплении; P — мощность на ведущем валу; K_g — коэффициент динамичности; $\theta = (1 - v_1^2) / E_1 + (1 - v_2^2) / E_2$; E, v — модуль Юнга и коэффициент Пуассона материалов колес; $\rho_{jh} = \rho_{1jh} \rho_{2jh} / (\rho_{1jh} + \rho_{2jh})$ — текущий приведенный радиус кривизны зубьев; ρ_{1jh}, ρ_{2jh} — переменные радиусы кривизны зубьев шестерни и колеса с учетом износа.

Скорость скольжения v_j в произвольной точке j зацепления вычисляется по формуле

$$v_j = \omega_1 r_{b1} (\text{tg} \alpha_{1j} - \text{tg} \alpha_{2j}),$$

где $r_{b1} = r_1 \cos \alpha_1$ — радиусы базовых окружностей колес; $\alpha_1 = \arctg(\text{tg} \alpha / \cos \beta)$, α_1 — торцевой угол зацепления, β — угол наклона зубьев; углы α_{1j}, α_{2j} рассчитываются согласно [26].

В прямозубых цилиндрических передачах реализуется 2-1-2-парное зацепление зубьев, а в косозубых возможно и 3-2-3-парное зацепление с различным коэффициентом перекрытия. Соответственно при вычислении контактных давлений и износа зубьев в j -х точках профилей зубьев, а также минимальной долговечности передачи следует определять углы пересопределения в зацеплении, а именно, двухпарного в однопарное, затем однопарного в двухпарное и выхода зубьев из зацепления. Соответствующая методика расчета параметров зацепления разработана в [25].

Изнашивание приводит к изменению радиуса кривизны зубьев, текущее значение которого определяется по формуле

$$\rho_{kjh} = \rho_{kj} + E_k \sum_{B_1}^{B_{\max}} D_{kjb} K_{kjb}^{-1}, \quad (4)$$

где B — размер блока взаимодействий (число оборотов шестерни), выбираемый произвольно, начиная от $B = 1$ (точное решение); $E_k, D_{kjb} = K_{kjb}^2$ — постоянные; $\rho_{kj} = \rho_{1j} \rho_{2j} / (\rho_{1j} + \rho_{2j})$ — начальный приведенный радиус кривизны; ρ_{1j}, ρ_{2j} — радиусы кривизны зубьев колес вычисляются согласно [24, 25].

Обусловленное износом изменение кривизны K_{kjb} зубьев в блоке их взаимодействий рассчитывается следующим образом:

$$K_{kjb} = 8 \sum_{B_1}^B h'_{kjn} / l_{kj}^2, \quad (5)$$

где $l_{kj} = 2\rho_{kjh} \sin \varepsilon_{kjh} = \text{const}$ — хорда окружности, аппроксимирующая эвольвенту между точками $j - 1, j + 1$; $\varepsilon_{kjh} = S_{kj} / \rho_{kjh}$ — угол между точками $j, j + 1$; S_{kj} — длина эвольвенты между точками $j, j + 1$ [24, 25]; α_j, α_{j+1} — углы зацепления для точек $j, j + 1$ эвольвенты [25].

Для уменьшения времени вычислений учет изменений геометрических параметров зубьев выполняется по блочной схеме в предположении линейного накопления изменений при постоянных условиях в пределах каждого блока. В последующих блоках вычислений учитываются накопленные изменения $h_{1j}, h_{2j}, \rho_{1jh}, \rho_{2jh}, \rho_{jh}, p_{jh\max}, 2b_{jh}, t'_{jh}$.

Предельный линейный износ h_{2jn} зубьев полимерного колеса достигается после определенного количества блоков B взаимодействий. Этому соответствует суммарное число оборотов n_{2s} колеса. Тогда

$$h_{2jn} = \sum_1^{n_{2s}} h_{2jB}; \quad h_{2jB} = \sum h'_{2j}. \quad (6)$$

При частоте вращения полимерного колеса, равной n_2 , ресурс металлополимерной зубчатой передачи по допустимому линейному износу h_{2jn} можно вычислить по формуле

$$t = n_{2s} / 60n_2. \quad (7)$$

Для учета высотной коррекции зацепления задаются коэффициенты коррекции $x_1 = -x_2$; суммарный коэффициент $x_\Sigma = x_1 + x_2 = 0$; межосевое расстояние $a = r_1 + r_2$ и торцевой угол зацепления α_t остаются такими, как в некорригированной передаче. Соответственно радиусы выступов зубьев:

$$r_{a1} = r_1 + (1 + x_1)m; \quad r_{a2} = r_2 + (1 + x_2)m. \quad (8)$$

Все остальные параметры передачи имеют те же значения, что и в некорригированной передаче. Учет угловой коррекции зацепления, когда коэффициенты коррекции $x_1 \neq x_2$ (как правило, $x_1 > 0$, $x_2 < 0$), описан в работе [24]. Результаты расчетов цилиндрических металлополимерных зубчатых передач представлены, в частности, в работах [27, 28].

Комбинированное (численно-аналитическое) решение. Значительный практический интерес имеет разработка методов «проектирования» структуры материала композитных ЗК, предусматривающая решение задачи оптимизации состава (содержания, дисперсности и параметра изометрии — отношения малой оси эллипсоида, моделирующего частицу наполнителя, к его большой оси) функционального (армирующего и антифрикционного) наполнителя при заданной и неизменной геометрии зубчатых колес. Это подразумевает серию расчетов проектируемой передачи на прочность и износостойкость при варьировании вышеуказанных параметров наполнителя в технологически допускаемых пределах. Применение расчетной оптимизации ЗК дополняет и в ряде случаев способно заменить обычно практикуемые рутинные и трудоемкие механические и триботехнические испытания.

Расчет и проектирование подобных деталей машин предполагает анализ их напряженного состояния, в том числе в области контактного взаимодействия. Инженерные методы расчета износостойкости зубчатых колес, взаимодействующих в условиях сосредоточенного контакта, основаны на компактных формулах типа (3), полученных из аналитических решений задач теории упругости о взаимодействии тел канонической формы. К примеру, контакт прямозубых колес представляют в виде сопряжения двух цилиндров эквивалентного радиуса, соответствующего рассматриваемой точке зацепления. Во многих случаях использование указанных простых аппроксимаций контура зуба и предположений о линейной упругости и изотропии материала обеспечивает приемлемую точность расчета контактных и внутренних напряжений, возникающих при работе зубчатых передач.

Однако для учета реальной геометрии зубчатых колес и особенностей деформирования таких полимерных композитов, как структурно-неоднородных, низко модульных и физически нелинейных (в сравнении с металлами) материалов, приходится выполнять пространственную дискретизацию

анализируемой области конечными и граничными элементами для снятия ограничений аналитических методов (соответствующая библиография весьма обширна и здесь не приводится). Такие возможности предоставляет цифровое представление профиля сопряженных зубьев [29].

Кроме того, расчет и проектирование зубчатых передач с колесами из полимерных композитов затруднены необходимостью получения значительного (в сравнении с металлическими материалами) объема исходных данных в виде температурных и скоростных зависимостей модулей упругости, пределов прочности и реологических параметров для большого числа возможных вариантов составов композитов. Их экспериментальное определение является дорогостоящей и длительной процедурой.

Представляется, что оценка прочности и износостойкости композитных ЗК возможна путем анализа на нескольких масштабных уровнях.

Так, в работах [30–32] предложен достаточно общий двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно-армированных композитов, согласно которому эффективные механические характеристики, определяемые на 1-м (микромеханическом) уровне, используются в качестве исходных данных для выполнения макромеханического (2-й уровень) расчета напряженно-деформированного состояния и износостойкости сопряжения. Применение этого метода для анализа напряженно-деформированного состояния композитной зубчатой передачи, включая микроскопию и схематизацию структуры композита, диагностику свойств компонентов, верификацию модели, иллюстрируется на рисунке 2.

На 1-м (микромеханическом) уровне рассматривается представительный объем — характерный (повторяющийся) фрагмент структуры композита. Этот фрагмент схематизируется набором связанных и минимальных по размеру структурных элементов (ячеек периодичности). Для них записываются определяющие соотношения, учитывающие свойства отдельных компонент и структуру композита (размеры и форму армирующих включений, толщину межфазного слоя, плотность микродефектов). Микромеханическая модель верифицируется сопоставлением результатов расчета деформационной или прочностной характеристики представительного объема композита при варьировании параметров наполнителя (объемного содержания, формы частиц) (этап 4) с данными эксперимента (этапы 5, 6). Этап верификации на масштабном уровне тестируемого образца можно считать отдельным и весьма важным. Таким образом, процедура фактически является трехуровневой.

Предложенная схема анализа позволяет быстро оптимизировать подготовку САД-моделей изделий, производимых с использованием совре-

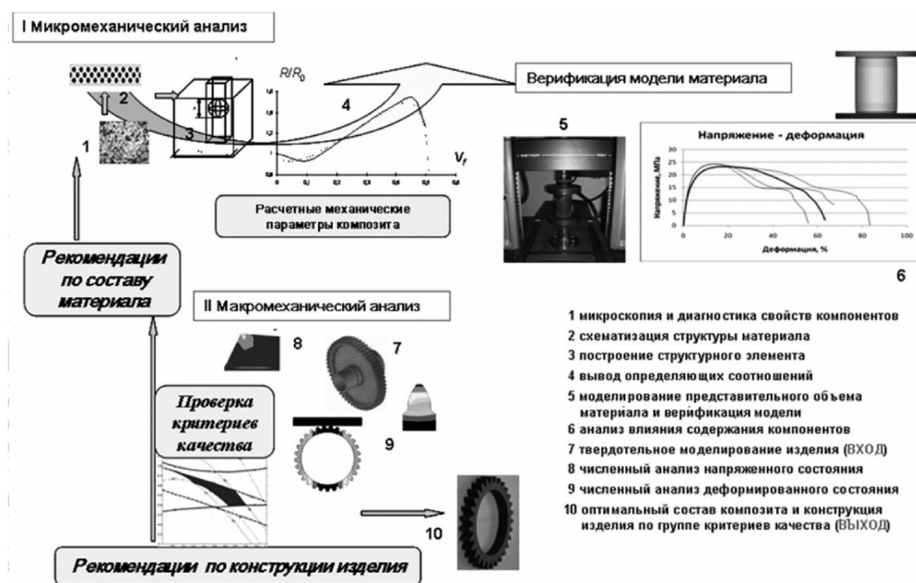


Рисунок 2 — Схема двухуровневого анализа напряженно-деформированного состояния и износостойкости зубчатых колес из дисперсно-наполненных полимерных материалов
 Figure 2 — Scheme of two-level analysis of stress-strain state and wear resistance of gears made of dispersion-filled polymer materials

менных аддитивных технологий. В этом случае этап 7 «ВХОД» представляет собой подготовку твердотельной модели спроектированного изделия, а этап 10 «ВЫХОД» — печать на 3D-принтере изделия оптимизированной конструкции из композита оптимального состава.

Можно добавить, что при использовании зубчатых передач в микроэлектромеханических системах в расчетах следует учитывать резкое увеличение адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей [30, 31].

В целом, иерархические подходы активно применяются в практике расчетно-экспериментального изучения зубчатых передач из композиционных материалов [32–37], а также при построении цифровых моделей зубчатых колес для 3D-печати [38].

С результатами исследований последних лет по данной тематике можно дополнительно ознакомиться в публикациях [39–50].

Заключение. 1. Обсуждаемые методы изготовления композитных зубчатых колес прошли путь от быстрого прототипирования до аддитивных технологий, включая 3D-печать с использованием принципов компьютерного дизайна структуры материалов и концепции цифровых двойников технически сложных изделий.

2. Показаны основные результаты многолетних исследований авторов на стыке механики, трибологии, материаловедения и технологии изготовления полимерных зубчатых передач из полимерных материалов; некоторые из них, включая прогнозирование изнашивания зубчатых колес из дисперсно-наполненных термопластов (начало 90-х годов XX века), а также исследование элементов приводов для микросистемной техники, разработку многоуровневого метода оптимального проектирования зубчатых передач из компози-

тов и обобщенного метода расчета несущей способности, износа и ресурса металлополимерных передач (начало XXI века) — во многом опередили свое время и ныне являются востребованными.

Список литературы

1. Элементы привода приборов. Расчет, конструирование, технологии / В.Е. Старжинский [и др.]; под общ. ред. Ю.М. Плещакевского. — Минск: Беларус. навука, 2012. — 769 с.
2. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / В.Б. Альгин [и др.]; под ред. В.Б. Альгина, В.Е. Старжинского. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 406 с.
3. Thermoplastic gear wheels – Materials, material selection, production methods, production tolerances, form design: VDI 2736 Blatt 1:2016-07. — Germany, 2016. — 73 p.
4. Старжинский, В.Е. Технология производства зубчатых колес из термопластичных полимерных материалов (обзор) / В.Е. Старжинский, С.В. Шилько, Е.В. Шалобаев // Полимерные материалы и технологии. — 2018. — Т. 4, № 2. — С. 6–31.
5. Polymer gears: design, technology, application (review) / V.E. Starzhinsky [et al.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2019. — Вып. 8. — С. 195–198.
6. Comprehensive areal geometric quality characterisation of injection moulded thermoplastic gears / U. Urbas [et al.] // Polymers. — 2022. — Vol. 14, iss. 4. — DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14040705>.
7. Шалобаев, Е.В. Аддитивные технологии в машиностроении / Е.В. Шалобаев, Ф.А. Перепелица, Н.С. Красноруцкая // Приборостроение в XXI веке-2016. Интеграция науки, образования и производства: сб. матер. XII Междунар. научно-технич. конф., Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г. — Ижевск, 2017. — С. 319–323.
8. Modelling and testing of spur gear made of different 3D printed materials / T. Kotkar [et al.] // International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology. — 2018. — Vol. 4, iss. 4. — Pp. 1389–1394.
9. Rohit, A. Design and fabrication of spur gear using 3D printing technology / A. Rohit, G.S. Sasank, P.V.R.C. Kishore // International Research Journal of Engineering and Technology. — 2020. — Vol. 7, iss. 6. — Pp. 454–464.
10. Перепелица, Ф.А. Отечественное программное обеспечение для аддитивных технологий / Ф.А. Перепелица, Е.В. Шалобаев, С.В. Шилько // Перспективы развития

- аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. докл. Междунар. научно-практ. симп., Минск, 24 мая 2017 г. — Минск, 2017. — С. 128–135.
11. Plastic Gears: State-of-the-art design and technology (Review) / V. Starzhinsky [et al.] // Power Transmissions 2020: Proc. of the 7th Int. BAPT Conf., Borovets, Bulgaria, June 10–13, 2020. — Bulgaria, 2020. — Pp. 27–34.
 12. 3D-печать как «природоподобный» способ производства оптимизированных эндопротезов / С.В. Шилько [и др.] // Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий: докл. IV Всеросс. научн. сем. с междунар. участием, Томск, 29–31 окт. 2018 г. — Томск: НТИУ, 2019. — С. 94–99.
 13. Применение полимерных связующих при изготовлении керамических изделий методами аддитивных технологий / Г.А. Демидов [и др.] // Полимерные материалы и технологии. — 2019. — Т. 5, № 3. — С. 85–90.
 14. Kapelevich, A. Plastic gearing for small engine applications / A. Kapelevich, T. McNamara // Small Engine Technology Conference & Exposition: Proc. of the Int. SAE Conf. — 2006. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2006-32-0038>.
 15. Материалы и источники излучения для стереолитографии (обзор) / Н.К. Толочко [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. — 2000. — Т. 5, № 3. — С. 35–38.
 16. Шилько, С.В. Разработка технологии зубчатых колес для микромеханических систем / С.В. Шилько, В.Е. Старжинский // Современные информационные технологии. Проблемы исследования, проектирования и производства зубчатых передач: сб. докл. межд. научн. семинара, Ижевск, 31 янв.–2 февр. 2001 г. / ИЖГТУ. Ин-т механики; под ред. И.В. Абрамова [и др.]. — Ижевск, 2001. — С. 159–162.
 17. Шалобаев, Е.В. Технология изготовления зубчатых колес и передач для микроэлектромеханических систем. Зубчатые микромеханизмы МЭМС: опыт производства и постановка задач на перспективу / Е.В. Шалобаев, В.Е. Старжинский, С.В. Шилько // Микросистемная техника. — 2003. — № 10. — С. 2–5.
 18. Анализ методов геометрического расчета параметров формообразующих матриц для пластмассовых зубчатых колес / В.Е. Старжинский [и др.] // Вестник машиностроения. — 1995. — № 6. — С. 3–7.
 19. Tsukamoto, N. Investigation about the strength of plastic gears: 4th Report; abrasion and state of tooth profile change of driven nylon gear / N. Tsukamoto // Bulletin of JSME. — 1983. — Vol. 26, iss. 219. — Pp. 1661–1669. — DOI: <https://doi.org/10.1299/jsme1958.26.1661>.
 20. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
 21. Благодарный, В.М. Расчет мелкомодульных зубчатых передач на износ и прочность / В.М. Благодарный. — М.: Машиностроение, 1985. — 128 с.
 22. Справочник по триботехнике: в 3 т. / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 1989. — Т. 1. Теоретические основы. — 400 с.
 23. Шилько, С.В. Расчет износостойкости зубчатой передачи с колесами из армированных композиционных материалов / С.В. Шилько, В.Е. Старжинский // Трение и износ. — 1993. — Т. 14, № 3. — С. 444–451.
 24. Chernets', M.V. A method for the evaluation of the influence of correction and wear of the teeth of a cylindrical gear on its durability and strength. Part 1. Service live and wear / M.V. Chernets', R.Ya. Yarema, Ju.M. Chernets' // Materials Science. — 2012. — Vol. 48, iss. 3. — Pp. 289–300. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9505-y>.
 25. Чернец, М.В. Метод расчета триботехнических характеристик цилиндрической косозубой тяговой передачи локомотива ВЛ-10 / М.В. Чернец, Ю.М. Чернец // Трение и износ. — 2016. — Т. 37, № 6. — С. 728–736.
 26. Износостойкость стекло- и угленаполненных полиамидных композитов для металлополимерных зубчатых передач / М.В. Чернец [и др.] // Трение и износ. — 2018. — Т. 39, № 5. — С. 457–461.
 27. Chernets, M. Prediction of the service life of metal-polymer gears made of glass and carbon fibre-reinforced polyamide, considering the impact of height correction / M. Chernets, A. Kornienko // Advances in Science and Technology Research Journal. — 2020. — Vol. 14, iss. 3. — Pp. 15–21. — DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/124553>.
 28. Chernets, M. Calculated assessment of contact strength, wear and resource of metal-polymer gears made of dispersion-reinforced composites / M. Chernets, S. Shil'ko, A. Kornienko // Applied Engineering Letters. — 2021. — Vol. 6, no. 2. — Pp. 54–61. — DOI: <https://doi.org/10.18485/aeletters.2021.6.2.2>.
 29. Goldfarb, V.I. Direct digital simulation for gears / V.I. Goldfarb, S.V. Lunin, E.S. Trubachov. — Izhevsk, 2004. — Vol. 1. — 75 p.
 30. Двухуровневый метод расчета на прочность и деформативность зубчатых колес из дисперсно-армированных композитов / С.В. Шилько [и др.] // Вестник национального технического университета «ХПИ». — 2012. — Вып. 35. — С. 173–178.
 31. Двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно-армированных композитов. Часть 1 / С.В. Шилько [и др.] // Трение и износ. — 2013. — Т. 34, № 1. — С. 82–86.
 32. Двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно-армированных композитов: Часть 2 / С.В. Шилько [и др.] // Трение и износ. — 2014. — Т. 35, № 1. — С. 52–61.
 33. Моделирование контактного взаимодействия в сопряжениях микроэлектромеханических систем / С.В. Шилько [и др.] // Вестник ГТТУ им. П. О. Сухого. — 2002. — № 3–4. — С. 31–38.
 34. Особенности расчета сопряжений компонентов МЭМС / С.В. Шилько [и др.] // Микросистемная техника. — 2003. — № 6. — С. 16–20.
 35. Pogačnik, N. An accelerated multilevel test and design procedure for polymer gears / N. Pogačnik, J. Tavčar // Materials & Design. — 2015. — Vol. 65. — Pp. 961–973. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.016>.
 36. Шилько, С.В. Применение двухуровневого прочностного анализа при подготовке САД-моделей для 3D-печати градиентных материалов и изделий / С.В. Шилько, Т.В. Рябченко, В.В. Дубровский // Аддитивные технологии, материалы и конструкции: материалы науч.-технич. конф., Гродно, 4–6 окт. 2016 г. — Гродно, 2016. — С. 140–146.
 37. Применение компьютерной механики при подготовке САД моделей для 3D-печати градиентных материалов и изделий / С.В. Шилько [и др.] // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. докл. Междунар. научно-практ. симп., Минск, 24 мая 2017 г. — Минск, 2017. — С. 194–207.
 38. Computer-aided design and adoption of standard software on gearing / V.E. Starzhinsky [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 393. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012044>.
 39. Методика проектирования и расчета малогабаритных зубчатых передач из композиционных материалов / В.М. Медунецкий [и др.] // Известия вузов. Приборостроение. — 2019. — Т. 62, № 2. — С. 192–194. — DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-2-192-194>.
 40. Loaded behaviour of gear made of fibre reinforced PA6 / J. Cathelin [et al.] // Gears; International conference on gears: Europe invites the world. — Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013. — Pp. 1221–1234.
 41. Tunalioglu, M.S. Wear and service life of 3-D printed polymeric gears / M.S. Tunalioglu, B.V. Agca // Polymers. — 2022. — Vol. 14, iss. 10. — DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14102064>.
 42. Experimental investigation of the wear behaviour of coated polymer gears / B. Polanec [et al.] // Polymers. — 2021. — Vol. 13, iss. 20. — DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13203588>.
 43. Chen, J.H. Factors affecting fatigue strength of nylon gears / J.H. Chen, F.M. Juarbe, M.A. Hanley // Journal of Mechanical Design. — 1981. — Vol. 103, iss. 2. — Pp. 543–548. — DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3254951>.
 44. A new experimental approach for measuring thermal behaviour in the case of nylon 6/6 cylindrical gears / E. Letzelter [et al.] // Polymer Testing. — 2010. — Vol. 29, iss. 8. — Pp. 1041–1051. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.09.002>.
 45. Wear behaviour of acetal gear pairs / A.R. Breeds [et al.] // Wear. — 1993. — Vol. 166, iss. 1. — Pp. 85–91. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90282-Q](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90282-Q).
 46. Lin, A.-D. Dynamic interaction between contact loads and tooth wear of engaged plastic gear pairs / A.-D. Lin, J.-H. Kuang // International Journal of Mechanical Sciences. — 2008. — Vol. 50, iss. 2. — Pp. 205–213. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmesci.2007.07.002>.
 47. An investigation on the wear behaviour of dissimilar polymer gear engagements / W. Li [et al.] // Wear. — 2011. — Vol. 271, nos. 9–10. — Pp. 2176–2183. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.019>.

48. The wear and thermal mechanical contact behaviour of machine cut polymer gears / K. Mao [et al.] // *Wear*. — 2015. — Vols. 332–333. — Pp. 822–826. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.084>.
49. Tavčar, J. Accelerated lifetime testing of reinforced polymer gears / J. Tavčar, G. Grkman, J. Duhovnik // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. — 2018. — Vol. 12, no. 1. — DOI: <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0006>.
50. Singh, P.K. An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears / P.K. Singh, Siddhartha, A.K. Singh // *Tribology International*. — 2018. — Vol. 118. — Pp. 264–272. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.10.007>.
51. Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites / T. Yu [et al.] // *Composite Structures*. — 2019. — Vol. 225. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111147>.
52. A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed polyamide spur gears / Y. Zhang [et al.] // *Tribology International*. — 2020. — Vol. 141. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105953>.
53. Taywade, A.N. Design and analysis of plastic gear and its comparison with metallic gear in the gear box of moped / A.N. Taywade, V.G. Arajpure // *International Journal of Research in Mechanical Engineering*. — 2015. — Vol. 3, iss. 2. — Pp. 1–6.

SHIL'KO Sergey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.
Head of the Laboratory "Mechanics of Composites and Biopolymers"¹
E-mail: shilko_mpri@mail.ru

STARZHINSKY Viktor E., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.
E-mail: star_mpri@mail.ru

DUBROVSKIY Vladislav V.
Researcher¹
E-mail: vlad.mpri@gmail.com

SHALOBAEV Evgeniy V., Ph. D. in Eng., Prof.
President²
E-mail: shalobaev47@mail.ru

CZERNIEC Miron V., D. Sc. in Eng., Prof.
Chief Researcher of the Research Part³
E-mail: myron.czerniec@gmail.com

¹V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of the NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

²International Consortium of Fundamental Education, Saint-Petersburg, Russian Federation

³National Aviation University, Kiev, Ukraine

Received 04 April 2024.

FEATURES OF MANUFACTURING AND CALCULATION OF GEARS FOR NEW APPLICATIONS (REVIEW)

New applications and modern methods are described for manufacturing gears made of polymer composites using additive (3D printing) and microelectronics technologies (burning and rapid prototyping from photopolymers). The methods of calculation of the load-bearing capacity, wear and durability of polymer and metal-polymer gears (straight and helical spur, bevel) are considered which are based on methodology of composite mechanics and phenomenological model of fatigue wear during sliding friction. The application of analytical solutions for fast parametric analysis of the stress-strain state of gears is shown, as well as the use of their spatial discretization by finite and boundary elements, taking into account the real geometry of engagement. The use of gears in drives of microelectromechanical systems and the specifics of calculations due to the strengthening of adhesive interaction in tooth contact of miniature gears are considered. The features of the deformation of polymer composites, as structurally inhomogeneous and physically non-linear materials are noted, which should be taken into account when determining the kinematic accuracy of gears. In this regard, the possibilities of a three-level method are discussed for designing gears made of dispersion-filled polymer composites according to the criteria of strength, deformability and wear resistance. The proposed method provides an iterative procedure for optimizing the material composition and gear parameters, each stage of which includes analytical modeling of the dispersion-reinforced composites used (microlevel), computational and experimental verification of micromechanical models on test samples (mesolevel) and numerical analysis of the stress-strain state of gears by finite element method (macrolevel).

Keywords: gears, polymer composites, additive technologies, strength, microelectromechanical systems, deformability, wear resistance, methods of calculation of metal-polymer gears

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-3-68-53-62>

References

- Starzhinskiy V.E., et al. *Elementy privoda priborov. Raschet, konstruirovaniye, tekhnologii* [Instrument drive elements. Calculation, design, technology]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2012. 769 p. (in Russ.).
- Algin V.B., et al. *Zubchatye peredachi i transmisiy v Belarusi: proektirovaniye, tekhnologiya, otsenka svoystv* [Gears and transmissions in Belarus: design, technology, properties assessment]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2017. 406 p. (in Russ.).
- VDI 2736 Blatt 1:2016-07. *Thermoplastic gear wheels – Materials, material selection, production methods, production tolerances, form design*. Germany, 2016. 73 p.
- Starzhinskiy V.E., Shil'ko S.V., Shalobaev E.V. Tekhnologiya proizvodstva zubchatykh koles iz termoplastichnykh polimernykh materialov (obzor) [Production technology of gears from thermoplastic polymer materials (review)]. *Polymer materials and technologies*, 2018, vol. 4, no. 2, pp. 6–31 (in Russ.).
- Starzhinsky V.E., Shil'ko S.V., Shalobaev E.V., Rackov M. Polymer gears: design, technology, application (review). *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2019, iss. 8, pp. 195–198.
- Urbas U., Zorko D., Vukašinović N., Černe B. Comprehensive areal geometric quality characterisation of injection moulded thermoplastic gears. *Polymers*, 2022, vol. 14, iss. 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14040705>.
- Shalobaev E.V., Perepelitsa F.A., Krasnorutskaya N.S. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii [Additive fabrication in mechanical engineering]. *12 mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Priborostroenie v 21 veke – 2016. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva* [12th international scientific and technical conference "Instrumentation in the 21st century – 2016. Integration of science, education and production"]. Izhevsk, 2016, pp. 319–323 (in Russ.).
- Kotkar T., Masure P., Modake P., Lad C., Patil B. Modelling and testing of spur gear made of different 3D printed materials. *International journal of scientific research in science, engineering and technology*, 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 1389–1394.
- Rohit A., Sasank G.S., Kishore P.V.R.C. Design and fabrication of spur gear using 3D printing technology. *International research journal of engineering and technology*, 2020, vol. 7, iss. 6, pp. 454–464.
- Perepelitsa F.A., Shalobaev E.V., Shil'ko S.V. Otechestvennoe programmnoye obespecheniye dlya additivnykh tekhnologii [Domestic software for additive technologies]. *Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskiy simpozium "Perspektivy razvitiya additivnykh tekhnologii v Respublike Belarus"* [International scientific and practical symposium "Prospects for the development of additive technologies in the Republic of Belarus"]. Minsk, 2017, pp. 128–135 (in Russ.).
- Starzhinsky V., Shil'ko S., Shalobaev E., Rackov M., Algin V., Dubrovskii V. Plastic gears: state-of-the-art design and technology (review). *Proc. 7th international BAPT conference "Power Transmissions 2020"*. Borovets, 2020, pp. 27–34.
- Shil'ko S.V., Ryabchenko T.V., Panin S.V., Shalobaev E.V. 3D-pechat kak "prirodopodobnyy" sposob proizvodstva optimizirovannykh endoprotezov [3D printing as a "nature-like" method for producing optimized endoprostheses]. *Doklady 4 Vserossiyskogo nauchnogo seminar s mezhdunarodnym uchastiem "Mezhdistsiplinarnye problemy additivnykh tekhnologii"* [Proc. 4th All-Russian scientific seminar with international participation "Interdisciplinary problems of additive technologies"]. Tomsk, 2019, pp. 94–99 (in Russ.).
- Demidov G.A., et al. Primeneniye polimernykh svyazuyushchikh pri izgotovlenii keramicheskikh izdeliy metodami additivnykh tekhnologii [Application of polymeric binders at manufacturing ceramic products by additive technology methods]. *Polymer materials and technologies*, 2019, vol. 5, no. 3, pp. 85–90 (in Russ.).
- Kapelevich A., McNamara T. *Plastic gearing for small engine applications*. SAE Technical Paper, no. 2006-32-0038, 2006. DOI: <https://doi.org/10.4271/2006-32-0038>.
- Tolochko N.K., Khlopkov Yu.V., Spiridonov E.P., Linevich A.V. Materialy i istochniki izlucheniya dlya stereolitografii (obzor) [Materials and radiation sources for stereolithography (review)]. *Materialy, tekhnologii, instrumenty*, 2000, vol. 5, no. 3, pp. 35–38 (in Russ.).
- Shil'ko S.V., Starzhinskiy V.E. Razrabotka tekhnologii zubchatykh koles dlya mikromekhanicheskikh sistem [Development of gear technology for micromechanical systems]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy seminar "Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii. Problemy issledovaniya, proektirovaniya i proizvodstva zubchatykh peredach"* [International scientific seminar "Modern information technologies. Problems of research, design and production of gears"]. Izhevsk, 2001, pp. 159–162 (in Russ.).
- Shalobaev E.V., Starzhinskiy V.E., Shil'ko S.V. Tekhnologiya izgotovleniya zubchatykh koles i peredach dlya mikroelektromekhanicheskikh sistem. Zubchatye mikromekhanizmy MEMS: opyt proizvodstva i postanovka zadach na perspektivu [Manufacture technologies of cog-wheels and drives for microelectromechanical systems. Cogged micromechanisms of MEMS: the experiment of the production and the statement of the problem on the perspective]. *Microsystems technology*, 2003, no. 10, pp. 2–5 (in Russ.).
- Starzhinskiy V.E., Kudinov A.T., Osipenko S.A., Li S.Ch. Analiz metodov geometricheskogo rascheta parametrov formobrazuyushchikh matrits dlya plastmassovykh zubchatykh koles [Analysis of methods for geometric calculation of parameters of forming matrices for plastic gears]. *Vestnik mashinostroeniya*, 1995, no. 6, pp. 3–7 (in Russ.).
- Tsukamoto N. Investigation about the strength of plastic gears: 4th report; abrasion and state of tooth profile change of driven nylon gear. *Bulletin of JSME*, 1983, vol. 26, iss. 219, pp. 1661–1669. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsme1958.26.1661>.
- Kragelskiy I.V., Dobychin M.N., Komalov V.S. *Osnovy raschetov na treniye i iznos* [Basics of friction and wear calculations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 526 p. (in Russ.).
- Blagodarnyy V.M. *Raschet melkomodulnykh zubchatykh peredach na iznos i prochnost* [Calculation of fine-module gears for wear and strength]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 128 p. (in Russ.).
- Spravochnik po tribotekhnike. T. 1. Teoreticheskie osnovy* [Handbook of tribology. Vol. 1. Theoretical foundations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 400 p. (in Russ.).
- Shil'ko S.V., Starzhinsky V.E. Raschet iznosostoykosti zubchatoy peredachi s kolesami iz armirovannykh kompozitsionnykh materialov [Calculation of wear resistance of gears with wheels made of reinforced composite materials]. *Friction and wear*, 1993, vol. 14, no. 3, pp. 444–451 (in Russ.).
- Chernets' M.V., Yarema R.Ya., Chernets' Yu.M. A method for the evaluation of the influence of correction and wear of the teeth of a cylindrical gear on its durability and strength. Part 1. Service life and wear. *Materials science*, 2012, vol. 48, iss. 3, pp. 289–300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9505-y>.
- Chernets' M.V., Chernets' Yu.M. Metod rascheta tribotekhnicheskikh kharakteristik tsilindricheskoy kosozuboy tyagovoy peredachi lokomotiva VL-10 [Calculation method of tribotechnical characteristics of tractive helical cylindrical gear of locomotive VL-10]. *Friction and wear*, 2016, vol. 37, no. 6, pp. 728–736 (in Russ.).
- Chernets' M.V., Shil'ko S.V., Pashechko M.I., Barshch M. Iznosostoykost steklo- i uglenapolnennykh poliamidnykh kompozitov dlya metallopolimernykh zubchatykh peredach [Wear resistance of glass- and carbon-filled polyamide composites for metal-polymer gears]. *Friction and wear*, 2018, vol. 39, no. 5, pp. 457–461 (in Russ.).
- Chernets' M., Kornienko A. Prediction of the service life of metal-polymer gears made of glass and carbon fibre-reinforced polyamide, considering the impact of height correction. *Advances in science and technology research journal*, 2020, vol. 14, iss. 3, pp. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/124553>.
- Chernets' M., Shil'ko S., Kornienko A. Calculated assessment of contact strength, wear and resource of metal-polymer gears made of dispersion-reinforced composites. *Applied engineering letters*, 2021, vol. 6, no. 2, pp. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.18485/aeletters.2021.6.2.2>.
- Goldfarb V.I., Lunin S.V., Trubachov E.S. *Direct digital simulation for gears. Volume 1*. Izhevsk, 2004. 75 p.
- Shil'ko S.V., Starzhinsky V.E., Petrokovets E.M., Chernous D.A. Dvukhurovnevyy metod rascheta na prochnost i deformativnost zubchatykh koles iz dispersno-armirovannykh kompozitov [Two-level calculation method on strength and deformation of gears from fibre-reinforced composites]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 2012, iss. 35, pp. 173–178 (in Russ.).

31. Shil'ko S.V., Starzhinskii V.E., Petrokovets E.M., Chernous D.A. Dvukhurovnevyy metod rascheta tribosopryazheniy iz dispersno-armirovannykh kompozitov. Chast 1 [Two-level calculation method for tribojoints made of disperse-reinforced composites. Part 1]. *Trenie i iznos*, 2013, vol. 34, no. 1, pp. 82–86 (in Russ.).
32. Shil'ko S.V., Starzhinsky V.E., Petrokovets E.M., Chernous D.A. Dvukhurovnevyy metod rascheta tribosopryazheniy iz dispersno-armirovannykh kompozitov: Chast 2 [Two-level calculation method for tribojoints made of dispersion-reinforced composites: Part 2]. *Trenie i iznos*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 52–61 (in Russ.).
33. Shil'ko S.V., Starzhinsky V.E., Babin A.P., Zernin M.V. Modelirovanie kontaktного vzaimodeystviya v sopryazheniyakh mikroelektromekhanicheskikh sistem [Modeling of contact interaction in interfaces of microelectromechanical systems]. *Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel*, 2002, nos. 3–4, pp. 31–38 (in Russ.).
34. Shil'ko S.V., Starzhinsky V.E., Babin A.P., Zernin M.V., Shalobaev E.V. Osobennosti rascheta sopryazheniy komponentov MEMS [The singularities of the conjunctions calculation of MEMS components]. *Microsystems technology*, 2003, no. 6, pp. 16–20 (in Russ.).
35. Pogačnik N., Tavčar J. An accelerated multilevel test and design procedure for polymer gears. *Materials & design*, 2015, vol. 65, pp. 961–973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.016>.
36. Shil'ko S.V., Ryabchenko T.V., Dubrovskiy V.V. Primenenie dvukhurovnevoogo prochnostnogo analiza pri podgotovke CAD-modeley dlya 3D-pechati gradientnykh materialov i izdeliy [Application of two-level strength analysis in preparing CAD models for 3D printing of gradient materials and products]. *Materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Additivnye tekhnologii, materialy i konstruktii"* [Proc. scientific and technical conference "Additive technologies, materials and structures"]. Grodno, 2016, pp. 140–146 (in Russ.).
37. Shil'ko S.V., Ryabchenko T.V., Gavrilenko S.L., Shalobaev E.V. Primenenie kompyuternoy mekhaniki pri podgotovke CAD modeley dlya 3D-pechati gradientnykh materialov i izdeliy [Application of computer mechanics in preparing CAD models for 3D printing of gradient materials and products]. *Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskiy simpozium "Perspektivy razvitiya additivnykh tekhnologiy v Respublike Belarus"* [International scientific and practical symposium "Prospects for the development of additive technologies in the Republic of Belarus"]. Minsk, 2017, pp. 194–207 (in Russ.).
38. Starzhinsky V.E., Shil'ko S.V., Petrokovets E.M., Supin V.V., Shalobaev E.V., Gutman Y.I. Computer-aided design and adoption of standard software on gearing. *IOP Conference series: materials science and engineering*, 2018, vol. 393. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012044>.
39. Medunetskiy V.M., Shalobaev E.V., Zinkov V.A., Dang N.T. Metodika proektirovaniya i rascheta malogabaritnykh zubchatykh peredach iz kompozitsionnykh materialov [Methodology of design and analysis of small gears from composite materials]. *Journal of instrument engineering*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 192–194. DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-2-192-194> (in Russ.).
40. Cathelin J., de Vaujany J.-P., Guingand M., Chazeau L. Loaded behaviour of gear made of fibre reinforced PA6. *Gears; International conference on gears: Europe invites the world*. Munich, 2013, pp. 1221–1234.
41. Tunalioglu M.S., Agca B.V. Wear and service life of 3-D printed polymeric gears. *Polymers*, 2022, vol. 14, iss. 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14102064>.
42. Polanec B., Zupanič F., Bončina T., Tašner F., Glodež S. Experimental Investigation of the wear behaviour of coated polymer gears. *Polymers*, 2021, vol. 13, iss. 20. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13203588>.
43. Chen J.H., Juarbe F.M., Hanley M.A. Factors affecting fatigue strength of nylon gears. *Journal of mechanical design*, 1981, vol. 103, iss. 2, pp. 543–548. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3254951>.
44. Letzelter E., Guingand M., de Vaujany J.-P., Schlosser P. A new experimental approach for measuring thermal behaviour in the case of nylon 6/6 cylindrical gears. *Polymer testing*, 2010, vol. 29, iss. 8, pp. 1041–1051. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.09.002>.
45. Breeds A.R., Kukureka S.N., Mao K., Walton D., Hooke C.J. Wear behaviour of acetal gear pairs. *Wear*, 1993, vol. 166, iss. 1, pp. 85–91. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90282-Q](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90282-Q).
46. Lin A.-D., Kuang J.-H. Dynamic interaction between contact loads and tooth wear of engaged plastic gear pairs. *International journal of mechanical sciences*, 2008, vol. 50, iss. 2, pp. 205–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.07.002>.
47. Li W., Wood A., Weidig R., Mao K. An investigation on the wear behaviour of dissimilar polymer gear engagements. *Wear*, 2011, vol. 271, nos. 9–10, pp. 2176–2183. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.019>.
48. Mao K., et al. The wear and thermal mechanical contact behaviour of machine cut polymer gears. *Wear*, 2015, vols. 332–333, pp. 822–826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.084>.
49. Tavčar J., Grkman G., Duhovnik J. Accelerated lifetime testing of reinforced polymer gears. *Journal of advanced mechanical design, systems, and manufacturing*, 2018, vol. 12, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0006>.
50. Singh P.K., Siddhartha, Singh A.K. An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears. *Tribology international*, 2018, vol. 118, pp. 264–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.10.007>.
51. Yu T., Zhang Z., Song S., Bai Y., Wu D. Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites. *Composite structures*, 2019, vol. 225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111147>.
52. Zhang Y., Pursell C., Mao K., Leigh S. A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed polyamide spur gears. *Tribology international*, 2020, vol. 141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105953>.
53. Taywade A.N., Arajpure V.G. Design and analysis of plastic gear and its comparison with metallic gear in the gear box of moped. *International Journal of Research in Mechanical Engineering*, 2015, vol. 3, iss. 2, pp. 1–6.