

УДК 621.833.678

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ (ОБЗОР)

В. Е. СТАРЖИНСКИЙ<sup>1+</sup>, С. В. ШИЛЬКО<sup>1</sup>, Е. В. ШАЛОБАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Кронверкский пр., 49, 197101, г. Санкт-Петербург, Россия

*Дается ретроспективный обзор исследований по освоению производства зубчатых передач с колесами из полимерных материалов, опубликованных в книжных изданиях, журнальных статьях и трудах конференций по ЗП, механике машин и трансмиссий за последние десять лет. ПМ, применяемые для зубчатых колес, сопоставляются по технологическим, физико-механическим и триботехническим свойствам. Рассматриваются особенности технологии литья под давлением зубчатых колес из термопластов, влияние технологических параметров литья на качество отливок ЗК, программные средства компьютерного моделирования технологического процесса и оптимизации состава композиционных полимерных материалов, специфика проектирования технологической оснастки и методов расчета геометрии рабочих поверхностей отливок зубчатых колес. Систематизирована информация о современных методах автоматизированного проектирования зубчатых передач и формообразующих деталей технологической оснастки. Показана перспективность аддитивных технологий изготовления зубчатых колес из термопластов и необходимость замены импортных расходных материалов для изготовления зубчатых колес на отечественные аналоги.*

**Ключевые слова:** зубчатое колесо, зубчатая передача, термопласт, полимерный композиционный материал, технология, технологическая оснастка, расчет, проектирование.

## PRODUCTION TECHNOLOGY OF GEARS FROM THERMOPLASTIC POLYMER MATERIALS (REVIEW)

V. E. STARZHINSKY<sup>1+</sup>, S. V. SHIL'KO<sup>1</sup>, E. V. SHALOBAYEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V. A. Belyi Metal Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Technology of polymer composite materials and parts, Kirov St. 32a, 246050 Gomel, Belarus

<sup>2</sup>Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Kronversky avenue, 49, 197101, Saint-Petersburg, Russia

*A retrospective review of research on the development of the production of gears drives (GD) with wheels made of polymeric materials (PM), published in books, journal articles and proceedings of conferences on GD, mechanics of machines and transmissions over the past ten years is presented.*

*PM used for gear wheels are compared by technological, physical-mechanical and tribotechnical properties (PM used for gears are compared by technological, physical-mechanical and tribotechnical properties).*

*The review takes into account the features of the injection molding technology for gears from thermoplastics, the effect of the injection molding process on the quality of gears molds, the software for computer simulation of the process and the optimization of the composition of the composite PM, the design features of the tool and methods for calculating the geometry of the working surfaces of gears molds.*

*In the work information on modern methods of computer-aided design of gears and forming parts of the tool is systematized. The prospects of using additive technologies for manufacturing gear wheels from thermoplastics and the need to replace imported consumables for the manufacture of gears, domestic analogues are shown.*

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: star\_mpri@mail.ru

**Keywords:** gear, gear drives, thermoplastic, technology, technological equipment, calculation, design.

## Введение

Отметим, что неметаллические материалы органического происхождения стали применяться в зубчатых колесах (ЗК) несколько тысячелетий назад [1]. Для привода оросительных устройств в древнем Египте служили передачи с колесами, где в качестве зубьев использовали деревянные цилиндрические или прямоугольные пальцы, закрепленные на деревянном ободе. В Древней Греции и позднее в Римской империи деревянные шестерни служили для привода жерновов водяных мельниц.

Первые опыты по применению полимерных ЗК следует отнести к 30-м годам прошлого столетия. В качестве заготовок использовали текстолит, вулканизированную фибру, гетинакс и древеснослоистый пластик на основе феноло-(крезол)-формальдегидных смол с наполнителями – хлопчатобумажной тканью, бумагой или древесным шпоном.

С появлением (50-е годы XX века) и развитием химического производства термопластов, перерабатываемых высокопроизводительным методом литья под давлением, исследования в этой области стали быстро развиваться. Первоначально ЗК изготавливали из конструкционных полимерных материалов (ПМ) на основе полиамидов и полиацеталей, в конце 50-х – начале 60-х гг. появились первые публикации о результатах теоретических и экспериментальных исследований [2–11], обобщенные затем в монографиях и справочниках [12–20], отдельных главах и разделах руководств по конструированию пластмассовых деталей [21–31].

Изучение динамики, прочности и износостойкости зубчатых колес из ПМ стало темой многих диссертаций. Ранние работы были посвящены анализу несущей способности ЗК, полученных механической обработкой из заготовок древесно-слоистого пластика ДСП-Г, текстолита ПТК и капролона (А. И. Свириденко, 1965; С. В. Щербаков, 1965; П. С. Раздымаха, 1966; В. И. Веденев, 1973). В связи с возможностью широкого варьирования геометрических параметров актуальным в те годы стало исследование зубчатых передач с зацеплением Новикова (В. Н. Севрюк, 1960; А. И. Свириденко, 1965; Л. Ф. Головкин, 1965; Т. Н. Кириенко, 1966; Н. М. Васильченко, 1970). Также изучали свойства круговинтовых поверхностей (В. Н. Севрюк, 1960; Т. Н. Кириенко, 1966) и сравнивали несущую способность (по изгибной и контактной прочности, износостойкости) ЗП Новикова и эвольвентных (А. И. Свириденко, 1965; С. В. Щербаков, 1965), а также передач Новикова с одной и двумя линиями зацепления (А. И. Свириденко, 1965; Т. Н. Кириенко, 1966).

На эвольвентных передачах оценивали влияние геометрических параметров (профильного угла, коэффициента высоты головки зуба исходного контура, коэффициентов смещения) на несущую способность (Ш. Т. Сабиашвили, 1966; В. Е. Старжинский, 1968).

В диссертациях (Б. А. Макеев, 1958; Р. А. Микадзе, 1971) отмечены особенности динамики металлополимерных ЗП. В работах (В.-Ж. Vorath, 1974; Е. Siedke, 1976; F. Becker, 1984) предложены методы проектирования и технология ЗК из термопластов; в диссертации [32] установлено влияние геометрии передач на КПД, температуру, коэффициент трения и износ при разных нагрузочно-скоростных режимах работы червячных передач с косозубым колесом из полиацетала (ПОМ), полиамида ПА-46, полиэфирэфиркетона ПЭЭК.

Упомянем изучение несущей способности металлополимерных червячных передач (В. И. Молчанов, 1993) и пластмассовых гибких звеньев волновых передач в (Ю. Д. Терешко, 1993). Разрабатывались рекомендации по расчету параметров мелко модульных пластмассовых ЗК с учетом погрешностей изготовления, сборки и перемещений колес и корпуса редуктора, обусловленных температурой и влажностью окружающей среды (О. И. Остапенко, 1968), показаны особенности расчета мертвого хода и ресурса ЗК по критерию предельного износа (С. К. Симеонов, 1983).

В обзор включены публикации специалистов фирмы «Ниппон Кикай Гаккай» в 30-ти специализированных журналах [33–37]. В них оптимизированы: конструкция отливки ЗК по критерию равномерности заполнения литьевой полости расплавом; расположение систем выталкивания и газоотводящих каналов; тип и расположение впускных литников; соотношение толщины стенки диска и зубчатого венца; выполнена корректировка геометрии формообразующей матрицы; обеспечено синхронное заполнение литниковых полостей при многогнездной конструкции формы и т. д.

При производстве пластмассовых ЗК целесообразно использовать справочные данные [38–48] по свойствам, технологии переработки и конструированию изделий. Рекомендации, касающиеся непосредственно ЗК, представлены лишь в [44] со ссылками на результаты оригинальных исследований [49, 50].

Анализ книжных и периодических изданий учебных и научных центров Беларуси, России и Украины за последние 10 лет показывает, что авторы рассматривают, в основном, передачи с металлическими колесами. Обобщению информации по исследованию зубчатых передач (ЗП) с ЗК из полимерных композиционных материалов (ПКМ) посвящено весьма ограниченное число источников [51–53]. Вопросы конструирования, расчета геометрии, прочности, износостойкости и автоматизации проектирования обобщены в монографии [51]; выбор материала, особенности технологии производства и методы расчета формообразующих элементов с примерами описаны в учебном пособии [52]; этапы и перспективы развития ЗП с колесами из ПКМ и их применение в технике — в монографии [53].

Отдельные аспекты теории, технологии и практики ЗП с колесами из ПКМ освещены в трудах общетехнических и регулярно проводимых специализированных научно-технических конференций. Прослеживается явная тенденция от публикации отдельных докладов («Теория и практика зубчатых передач», г. Ижевск, Россия, 1994–2017; «Gear (Power) Transmissions», Bulgaria, Serbia, Greece, 1995–2009; International Conference on Gears, Munich, Germany, 2005, 2010, 2013; «Механика», г. Минск, Беларусь, 2007–2015; «KOD 2010–2018», Novi Sad, Serbia; IRMES, Zlatibor, NIŠ, Serbia, 2011; «Управляемый электропривод», г. Тула, Россия, 2011, 2012; «Проблемы качества и долговечности зубчатых передач, редукторов, их деталей и узлов», г. Севастополь, Украина, 1999–2014) к специальным секциям с тематикой по пластмассовым ЗК (“International ASME Power Transmission and Gearing Conference”, Las Vegas, Nevada, USA, 2010, 2011; “International Gear Conference”, Lyon, France, 2014) и отдельным специализированным конференциям, в программы которых включены только доклады по пластмассовым ЗК (“International Conference on High Performance Plastic Gears”, Garching Near Munich, Germany, 2015, 2017).

Большое число докладов [54–62] в программах конференций последних лет посвящено анализу проекта нового варианта нормативного документа по зубчатым колесам из ПКМ VDI 2736 [63–66], подготовленного Обществом германских инженеров (Verein Deutscher Ingenieure). В нем представлена исчерпывающая информация, обобщившая на сегодняшний день теорию и практику передач с ЗК из термопластов. Стандарт состоит из 4-х частей (Blatt 1–4). В первой части [63] дается общая характеристика термопластов, применяемых для изготовления ЗК (подробное описание содержания первой части приведено в разделе «Материалы»). Во второй [64] и третьей [65] частях описаны методы расчета на прочность цилиндрических [64] и червячных [65] передач с ЗК из термопластов с примерами. Приведены справочные данные, позволяющие определить действующие и допускаемые напряжения с учетом температуры ( $20 \pm 120$  °С) и других условий эксплуатации, а также вида смазки для зубчатых колес из ПА66, ПА46, POM, ПБТ, ПЭЭК, ПФС. Четвертая часть [66] посвящена методам экспериментального исследования несущей способности пластмассовых ЗК, организации эффективного контроля при испытаниях и последующего расчета допускаемой нагрузки, скорости, КПД, температуры и других показателей.

Завершая вводную часть обзора, отметим, что в настоящее время в распоряжении разработчиков имеются системы автоматизированного проектирования (ProEngineer, Unigraphics, CATIA, Solid Edge, EUKLID, Solid Works и другие) со специальными модулями расчета и построения моделей различных типов ЗК и ЗП, в том числе из ПКМ, программы проектирования непосредственно ЗП и трансмиссий [67–70] с блоками расчета и проектирования пере-

дач с колесами из ПКМ, моделирования шума и вибраций, прогнозирования динамических характеристик [71]; оптимизации параметров ЗП по заданным критериям [72].

С использованием разработанного А. Л. Капелевичем метода и программного обеспечения Direct Gear Design [73] расчета геометрических параметров из области существования ЗП в координатах  $v_1-v_2$  (соответственно углы заострения зубцов шестерни и колеса) [73, 74] проектируются передачи с симметричными и несимметричными зубьями и оптимизируется переходная поверхность у основания зуба по критерию минимума изгибных напряжений. Для ЗК из ПКМ [75] описана поэтапная корректировка формообразующих матриц по системе “Genetic Mold Solution”, обеспечивающая доводку их исполнительных размеров для получения ЗК требуемой точности.

Аналогичная методика предлагается авторами программы [76], в которой, помимо возможности проведения проектировочного и проверочного расчетов, имеются модули с вариантами расчета формообразующих матриц по интервалу табличной усадки («Intus»), результатам измерения имитаторов ЗК («Imitat»), а также модуль коррекции размеров матрицы по результатам измерения опытной партии ЗК («Kormat») [77].

Наряду с программными продуктами, производителями предлагается широкий спектр услуг по изготовлению разнообразных ЗК из термопластов. Например, компания Franz-Morat Co. GmbH изготавливает, как следует из рекламных материалов [78], ЗК любых типов с модулями от 0,2 до 4,0 мм из ПА6, ПА66, ПА11, ПА12, ПА4.6, POM, ПБТ, ПК, ПЭИ, ПФЭ и др. Фирма «RISSE and Co., GmbH» [79] дает линейку ЗК из полиацетала со стандартными параметрами исходного контура, класса точности 10-11 по DIN 3962-3964. Компания Juken Kogyo Co. Ltd в каталоге продукции [80] приводит номенклатуру производимых ею ультраминиатюрных отливок ЗК из POM, ПЭИ, ПБТ, ПА66, ПФС более чем 30 наименований (блоки ЗК с прямыми и косыми зубьями, торцовые, шевронные и конические ЗК, червяки и червячные колеса и др.) с указанием точности взаимного расположения рабочих поверхностей: круглости, соосности, радиального биения и др.

Отметим опыт авторов обзора по внедрению ЗК из ПКМ, в основном из ненаполненного и стеклонаполненного ПА-6 [81], на предприятиях различных отраслей промышленности в приводах механизмов машин и приборов: текстильном производстве (ткацкие станки, крутильно-вытяжные, чесальные и браковочные-мерильные машины) – прямозубые и косозубые ЗК ( $m$  — от 1,0 до 2,5 мм;  $z$  — от 12 до 110;  $\beta = 15$  и  $45^\circ$ ); бытовой технике ( $m$  — от 1,5 до 5,0 мм;  $z$  — от 12 до 64); резинотехнической промышленности (беговые шестерни резинооплеточных машин) –  $m$  — от 2,0 до 5,5 мм;  $z$  — от 13 до 59; автотракторной промышленности (шестерни привода магнето и привода регулятора) –  $m = 3,5$  мм;  $z = 15$ ; металлургической промышлен-

ленности (привод прибора регулирования температуры плавки стали) – блоки ЗК  $m = 0,45$  мм;  $z_1/z_2 = 16/30$ ;  $18/30$ ;  $20$ ;  $30$ ;  $21/30$ ;  $20$ ;  $28$ ;  $20/32$ ; зубчатые колеса  $m = 0,3$  мм;  $z = 10$ ;  $m = 0,45$  мм;  $z = 30$ .

Подчеркнем еще раз, что в последние годы применение ПКМ в ЗП рассматривается системно на специализированных секциях и конференциях, целиком посвященных этой тематике. Предметом исследований являются несущая способность, прочность, жесткость, точность, повреждения, долговечность, виброакустика различных видов передач из ПМ. Сведений материаловедческого и технологического характера в этих публикациях очень мало. Результаты исследований, касающиеся выбора материалов и параметров технологических режимов изготовления ЗК из термопластов литьем под давлением, приведены в соответствующих разделах обзора.

### Полимерные композиционные материалы

По данным [82], доля термопластов в ЗК из ПКМ составляет  $\approx 80\%$ , причем на базе примерно 15 разновидностей базовых ПМ конструкционного назначения выпускается несколько тысяч марок ПКМ.

Для изготовления ЗК применяются, в основном, инженерные пластики [83] (по классификации [82] — термопласты инженерно-технического назначения), а также суперконструкционные и специальные термопласты [83] (по классификации [82] — теплостойкие и высокопрочные пластики). Из огромной номенклатуры ПКМ рассмотрим для начала рекомендации материаловедческого характера, приведенные в нормативных документах по пластмассовым ЗК [63, 84] и проспектов фирм-

производителей, например [85]. В нормативах [63] дается подробная информация о свойствах термопластичных полимеров – по большинству из перечисленных ПМ указаны структура и показатели важнейших свойств полимера, а также рекомендации по технологии литья и показателям точности, примеры конструкций зубчатых колес с оптимальным расположением впускных каналов в отливке, примеры соединения колеса с валом, величины натягов и т. д.

Нормативный документ AGMA [84] регламентирует рекомендуемые наполнители для литых ЗК из термопластов и предлагает качественную оценку их влияния на служебные свойства материалов (табл. 1).

Для изготовления ЗК фирмой «SABIC» [85] предлагается набор ПКМ, наполненных твердыми смазками и стекловолокнами, обладающих комплексом показателей физико-механических свойств, обеспечивающих соответствие пяти критериям: высокая точность геометрических размеров; низкий шум; высокая износостойкость; рабочая температура свыше  $80^\circ\text{C}$  и прочность до 43 МПа (табл. 2).

Отметим тенденции в разработке и применении многофункциональных ПКМ: преимущественное использование материалов, наполненных стекло- или углеволокнами в комбинации другими функциональными добавками; создание смесей на основе термодинамически несовместимых термопластов с использованием функционализированных полимеров в качестве компатибилизаторов; разработка ПКМ с учетом специфических технических требований заказчика («материал под изделие»);

Таблица 1 — Наполнители термопластов для ЗК [84]  
Table 1 — Fillers of thermoplastics for gears [84]

Наполнители	Наименование	Содержание, %	Основание для использования	Лимитирующие факторы
Порошкообразные	Минералы (слода, тальк, технический углерод, стеклянные сферы и др.)	5÷40	СС, РК, ТС, ЭС	ИСЗ, СУВ
		<1	УТС, ТС	–
Усиливающие	Стекловолокна	5÷40+	ТС, СИ	ИСЗ, ИО
	Углеродные волокна	10÷40+	ТС	ВС, ИТК, ИО
	Арамидные волокна	5-20	ТС, ПП, СИ, СТ	ВС, ИТП
Смазочные	Полипрафторэтилен	1÷20 <1	СТ, СИ СТ, СИ, УТС	ВС, УЛ, СП, ВС
	Силикон	1÷4	СТ, СИ	УЛ
	Графит	5÷10	СТ, СИ	СП, СУВ
	Дисульфид молибдена	2÷5	СИ	–
Модификаторы ударной вязкости	Термопластичный полиуретан	5÷20	ПВ	СП
Другие	Красители	<2	–	СП, ИТП, ВС
	Технологические добавки	–	УЛ	СИ, ВС
	Стабилизаторы (ультрафиолет, теплостойкость)	–	–	ВС
	Замедляющие горение (антипирены)	–	–	ВС, УЛ, ИО, ИТП, СП, СУВ

Примечания: СС — снижение стоимости, РК — контролируемая усадка (размерная стабильность); ЭС — электрические свойства, ТС — теплостойкость; УТС — улучшение технологических свойств; СИ — снижение износа; ПП — повышение прочности; СТ — снижение трения; ПВ — повышение ударной вязкости; УЛ — условия литья; ИТП — изменение параметров технологического процесса литья; ИСЗ — износ сопряженного звена; СУВ — снижение ударной вязкости; ИО — износ технологической оснастки; ВС — высокая стоимость; СП — снижение прочности.

Таблица 2 — Конструкционные термопластичные ПКМ фирмы "SABIC Innovation Plastics" [85]  
Table 2 — Structural thermoplastic PCM of the firm "SABIC Innovation Plastics" [85]

Наименование базового полимера или композита на основе базового полимера	Торговая марка композита	Состав компонентов	Характеристики улучшения свойств
Поликарбонат (ПК)	Lubriloy D	ПК	УВ, РС
Поликарбонат (ПК)	Lubriloy D-FR ECO	ПК	ОС, РС
Полиамид (ПА)	Lubriloy R	ПА66	ХС, НШ
Композит на основе полиоксиметилена (ПОМ)	Lubricomp KL-4040	ПОМ+ПТФЭ	ВИ
Композит на основе поликарбоната (ПК)	Lubricomp DFL-4036	ПК+СВ+ ПТФЭ	ВП, РС
Композит на основе полибутилентерепталата (ПБТ)	Lubricomp WFL-4036	ПБТ+СВ+ПТФЭ	ВП
Композит на основе полиамида (ПА)	Lubricomp RFL-4036	ПА66+СВ+ПТФЭ	ВП
Композит на основе полифениленсульфида (ПФС)	Lubricomp OFL-4036	ПФС+СВ+ПТФЭ	ВП, ТС
Композит на основе полиэфиримида (ПЭИ)	Lubricomp EFL-4036	ПЭИ+СВ+ПТФЭ	ТС, РС
Композит на основе полифталамида (ПФТА)	Lubricomp UFL-4036	ПФТА+СВ+ПТФЭ	PV-фактор, ТС
Композит на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК)	Lubricomp LCL-4033	ПЭЭК+СВ+ПТФЭ	ТС, ВП
Композит на основе полиамида (ПА)	Verton RF 700-10EM	ПА66+С+СВ	ВП

Примечание: СВ — стекловолокно; ПТФЭ — политетрафторэтилен; УВ — ударная вязкость; РС — размерная стабильность; ХС — химстойкость; НШ — низкий шум; ВИ — высокая износостойкость; ВП — высокая прочность; ТС — термостабильность; PV — «удельное давление-скорость»; С — смазка

определение оптимальных, с точки зрения прочности и износостойкости, размеров волокна, его концентрации, ориентации и распределения в матрице; проведение ускоренных испытаний ЗК из ПКМ.

В работе [86] по результатам испытаний ЗК из двух марок полиамида, наполненного короткими стеклянными волокнами ПА46–TW 241F10 (СВ 50%) и TW 271F6J10 (СВ 30%), выпускаемого фирмой «DSM Engineering Plastics» (Нидерланды) показано, что предпочтительна ориентация волокна параллельно рабочей поверхности зуба; одновременно установлено, что износ высоконаполненного материала (50% СВ) был ниже, чем у такового с 30% СВ примерно в 2,2–5,3 раза.

При гибридном наполнении конструкционных термопластов наночастицами и короткими стекло- и углеродными волокнами (УВ) наблюдается эффект синергического повышения прочностных характеристик. Так, прочность при растяжении композита ПА6/СВ 30% + 3% органоглины на 11% выше, чем ПА6/СВ 30%, а модуль упругости выше на 42% [87]. Модуль упругости ПА6 + 5% органоглины на 38% выше такового для чистого полиамида; для ПА6/СВ прирост составляет 22%, а для ПА6/СВ + 5% органоглины — 81% [88].

Из-за отсутствия по вновь создаваемым ПКМ данных о кратковременной и длительной усталостной прочности и износостойкости ЗК из ПКМ, в [60] предлагается дополнять результаты кратковременных усталостных испытаний (порядка  $10^5$  циклов перемены напряжений) данными, полученными при статических испытаниях композита на растяжение, а расчет композитных ЗК на износостойкость и прочность при статическом изгибе вести с использованием двухуровневого метода расчета [89, 90], в соответствии с которым эффективные механические характеристики, определяемые на 1-ом (микромеханическом) уровне, используются в качестве исходных данных для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) ЗК на 2-ом (макромеханическом) уровне, включая схематизацию структуры композита, диагностику деформационных свойств, верификацию модели и т. д. В работах

[91–93] показаны возможности двухуровневого метода расчета для расчетной оптимизации содержания армирующего наполнителя в целях повышения ресурса ЗП по критерию изгибной прочности изношенных зубьев.

Смесевые ПМ получают путем реакционного смешения конструкционных термопластов с полимерами, сополимерами или смесями полиолефинов [94, 95], функционализированными прививкой полярных мономеров в процессе реакционной экструзии [96–99]. Эти материалы обладают существенно более высокими показателями ударной вязкости и могут успешно применяться для ЗК динамически нагруженных ЗП.

В работе [100] с использованием известного в методологии планирования эксперимента метода Тагучи (Taguchi) [101, 102] непосредственно на образцах зубчатых колес ( $m = 1,5$  мм;  $\alpha_0 = 20^\circ$ ;  $b_w = 10$  мм) изучено влияние технологических параметров литья под давлением – температуры сушки ( $T_c$ ), °С: 50, 60 и 70; температуры расплава ( $T_p$ ), °С: 280, 290 и 300; времени выдержки под давлением ( $t_d$ ), с: 0,6, 0,8 и 1,0 и времени охлаждения ( $t_o$ ), с: 10, 20 и 30) – на модуль упругости и относительное удлинение при разрушении образцов из вторичного стеклонаполненного полиамида ПА 66-СВ с различным содержанием стекловолокна: 0; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35 и 40 мас.%. Определены оптимальные параметры технологического процесса литья и соотношение компонентов ПА 66 и стекловолокна: максимальному значению модуля упругости при растяжении ( $E \approx 99,76$  МПа) соответствовали значения  $T_c = 50^\circ\text{C}$ ;  $T_p = 300^\circ\text{C}$ ;  $t_d = 0,6$  с;  $t_o = 30$  с.

Сравнительные испытания полимерных ЗК из разных полимеров в паре со стальным колесом и при разных сочетаниях пар полимерных колес (табл. 3) показали, что минимальный износ наблюдался у ЗК из ПЭВД при крутящем моменте до 4 Нм; ПК – до 6 Нм; ПОМ «Delrin 500» – до 8 Нм; нейлон ПА 46 – до 9 Нм; ПЭЭК 650 – до 10 Нм. В парах ЗК полимер (ведущее)/полимер (ведомое) предельная нагрузка составляла для ПОМ/ПОМ – 8 Нм; ПЭЭК/ПОМ и ПЭЭК/ПЭЭК – 10 Нм; ПОМ/ПЭЭК – 13 Нм (табл. 3) [103].

Таблица 3 — Сравнение износостойкости пар полимерных ЗК [103] ( $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ )  
Table 3 — Comparison of the wear resistance of polymer gears [103] ( $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ )

Крутящий момент $M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	Скорость изнашивания, $10^{-5} \text{ мм/цикл}$ , пар материалов ЗК (ведущее/ведомое)			
	ПОМ/ПОМ	ПОМ/ПЭЭК	ПЭЭК/ПОМ	ПЭЭК/ПЭЭК
4	–	2,0	0	0
5	–	–	0,5	0,5
6	–	3,0	0	0
7	–	2,0	0,5	0,5
8	2,0	–	0	0
9	–	4,0	0	0,5
10	–	–	15,0	15,0
11	–	4,0	–	–
12	–	6,0	–	–
13	–	250,0	–	–

Примечание: □ – прекращение испытаний

При исследовании нагрузочной способности металлополимерных ЗП, в которых шестерня выполнена из полиацетала, наполненного тальком, было оценено влияние наполнителя на долговечность и износостойкость полимерных ЗК [104]. При низких нагрузках (крутящий момент  $T = 0,4 \text{ Нм}$  и  $0,65 \text{ Нм}$ ) ЗК отработали  $N = 10^7$  циклов нагружений и были пригодны к дальнейшей эксплуатации. Оценку влияния содержания наполнителя на долговечность ЗК авторы [104] провели при испытании с повышенными нагрузками (11,8; 14,7; 17,6 Н·м), из данных которой следует вывод, что не всегда повышенное содержание усиливающего наполнителя приводит к повышению несущей способности зубчатой передачи.

При  $PV = 300 \text{ МПа} \cdot \text{ м/с}$  удельный объемный износ материала с содержанием наполнителя 15% составил  $20 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{мм/мм}$  при  $N = 6 \cdot 10^5$  циклов, а при 30% —  $60 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{мм/мм}$ . Аналогичный показатель при  $N = 6 \cdot 10^6$  циклов для материала с 15% талька был  $60 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{мм/мм}$ , а при 30% талька уже при  $N = 1,6 \cdot 10^6$  увеличился до  $90 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3/\text{мм/мм}$ . С повышением содержания этого наполнителя от 0 до 30% наблюдалось также снижение температуры боковой поверхности зуба как полимерного, так и стального колеса (на  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно) [104].

Данные о влиянии наполнителя приведены в [105], где показано его неоднозначное влияние на износостойкость. Так, снижение интенсивности изнашивания полиамида ПА66 достигалось лишь введением талька и наноглин (табл. 4).

По данным стендовых испытаний прямозубой металлополимерной ЗП ( $m = 3,5 \text{ мм}$ ;  $z_1 = 26$ ;  $u = 1,592$ ) при разных удельных нагрузках, Н/мм (16,07; 20,5 и 29,36) и окружных скоростях, м/с (3,57; 4,76 и 7,14) в [106] предложено использовать смесевую композицию ПК/АБС (60/40%), которая по показателям стойкости к горению, УФ-облучению и влагопоглощению показала более высокие результаты, чем стеклонанополненный полиамид ПА-66 с 30% СВ.

Таблица 4 — Сравнение наполнителей (концентрация 40%) по критерию износостойкости композитов на основе ПА-66 [105]  
Table 4 — Comparison of fillers (concentration 40%) of composites based on PA-66 by the criterion of wear resistance [105]

Наименование наполнителя	Форма частиц наполнителя	Изменение интенсивности изнашивания (раз) при наполнении
Слюда	Пластинчатые	1,15
Карбонат кальция	Призматические	0,90
Силикат кальция	Волокнистые	3,75
Стекланные шарики	Сферические	2,30
Тальк	Порошок	0,0157
Оксид кремния	Пластинчатые	1,20
Сульфат кальция	Волокнистые	1,30
Наноглина	Пластинчатые	0,00625

В [107] установлено, что при росте изгибной усталостной прочности наполнение полиацетала (полиоксиметилена (ПОМ)) стекловолокном (25 и 40%) вызывает снижение износостойкости зубчатых колес ( $m = 2 \text{ мм}$ ;  $z_1/z_2 = 25/45$ ) (табл. 5).

Таблица 5 — Влияние наполнения ПОМ стекловолокном на показатели зубчатых колес ( $PV = 110 \text{ МПа} \cdot \text{ м/с}$ , удельный износ при  $N_c = 10^7$  циклов) [107]  
Table 5 — Influence of POM filling with glass fibers on the parameters of gears ( $PV = 110 \text{ МПа} \cdot \text{ м/с}$ , specific wear at  $N_c = 10^7$  cycles) [107]

Материал шестерни	Условный предел изгибной усталостной прочности, $\sigma_f$ , МПа,	Удельный износ, $10^{-8}$ , $\text{мм}^3/\text{мм/мм}$	Повышение температуры, $^\circ\text{C}$	
			Полимерное колесо	Металлическое колесо
ПОМ	25	1,2	6	11
ПОМ + 25% СВ	30	9	8	14
ПОМ + 40% СВ	42	19*	10	16

\* При  $N_c = 3 \cdot 10^6$  циклов

Обсуждается необходимость обновления номенклатуры термопластов и композитов на их основе, отвечающих требованиям к условиям работы зубчатых колес [56, 108–112]. Констатируется, что в нормативном документе VDI 2736 [64] исходные данные для расчета пределов выносливости по контактному напряжению и напряжениям изгиба даны для весьма ограниченного числа термопластов, в то время как потенциальный рынок полимерных материалов располагает большим перечнем конструкционных ПКМ. В связи с этим наряду со стандартными длительными испытаниями проводятся [56, 108, 109, 112] ускоренные испытания ЗК при варьировании материалов сопряженных пар [110, 112]. Учитывая распространенность данного подхода [56, 108–111], целесообразно показать на примере [111] методологию испытаний.

При ускоренных испытаниях выдерживаются определенные условия [111]: начальная нагрузка

принимается в диапазоне, соответствующем допустимому напряжению изгиба по нормативному документу VDI 2736 [64] (15–20 МПа); увеличение нагрузки на каждой ступени испытаний — около 20% от начальной; переход на следующую ступень — после установления стабильной средней объемной температуры зубчатого колеса; общая продолжительность испытаний — до разрушения ЗК или превышения допустимой температуры, либо появления усталостных повреждений или катастрофического износа. Продолжительность испытаний на каждой ступени нагружения —  $2 \cdot 10^5$  циклов. При невыполнении требований (нестабильная температура, преждевременное разрушение зубчатого колеса, высокий износ) в [110] предлагается изменить параметры испытаний (подобрать другие материалы, условия нагружения или геометрические параметры передачи). Для подтверждения результатов ускоренных испытаний проводятся стандартные испытания при разных уровнях нагрузки ( $T$ , Нм) и окружной скорости ( $V$ , м/с) [112] с целью установления зависимостей  $t = f(T, V)$  и оценки соответствия расчетных значений  $\mu$  результатам эксперимента; установление видов повреждений зубчатых колес.

Таким образом, очевидно, что в сферу исследования и применения ЗП с колесами из ПКМ вовлечена большая группа как исходных термопластов, так и ПКМ на их основе. Изучается роль наполнителей (стекло- и углеволокна, стеклянные микросферы, порошкообразные добавки, нанонаполнители, модификаторы ударной вязкости и др.) на кратковременную и длительную прочность, ударную вязкость, тепло- и износостойкость ЗК. Оценивается влияние дисперсности и размеров наполнителей и их распределения по объему изделия, на несущую способность ЗК, оптимизируется сочетание материалов пар сопряженных колес.

### Усадка и коробление

Как известно, при литье под давлением наблюдается существенное различие в величине и характере усадки аморфных и частично кристаллических полимеров: она различна в направлении вдоль и поперек течения расплава; по-разному влияют на усадку дисперсные и волокнистые наполнители; усадка зависит от многих технологических и конструктивных факторов — температуры расплава и литьевой формы, скорости впрыска, давления и времени выдержки под давлением, толщины стенки изделия, расположения впускных каналов и др. [44]. Влияние этих факторов на усадку и коробление подробно анализируется в справочнике [44] с привлечением широкого круга оригинальных источников.

Из табл. 6, в которой приведены данные об усадке и короблении (отношение толщины дискового образца  $B$  к диаметру дискового образца  $D$  ( $D = 4,0$  дюйма, толщина  $B = 1/16$  дюйма) видно, что для некоторых ПКМ введение волокни-

стых наполнителей снижает усадку, но увеличивает коробление; введение дисперсных наполнителей (стеклошарики, феррит бария) снижает оба показателя; для аморфных полимеров (например, поликарбоната) введение наполнителей влияет на коробление менее существенно, чем для частично кристаллических (например, полиацеталь, полиамид).

Таблица 6 — Усадка (продольная и поперечная) и коробление ненаполненных и наполненных конструктивных термопластов [44]

Table 6 — Shrinkage (longitudinal and transverse) and warpage of unfilled and filled structural thermoplastics [44]

Базовый полимер	Наполнитель	Содержание наполнителя, %	Коробление ( $B/D$ )	Усадка
ПОМ	–	0	0,075	0,020*/0,016**
ПОМ	СВ	30	0,300	0,004*/0,015**
ПК	–	0	0,001	0,006
ПК	СВ	30	0,003	0,001
ПК	УВ	30	0,002	0,0005
ПК	СШ	30	0,000	–
ПА66	–	0	0,050	0,015
ПА66	СВ	30	0,270	0,004
ПА66	УВ	40	0,200	0,002
ПА66	СШ	40	0,008	0,010
ПА66	Феррит бария	80	0,002	0,008

\* в продольном; \*\* в поперечном направлении

Как будет показано в следующем разделе, усадка зубьев ЗК имеет анизотропный характер, который может учитываться в общем случае компонентами усадки по диаметру вершин зубьев  $S_a$ , высоте  $S_b$  и толщине  $S_s$  зуба (ширине впадины  $S_e$ ), а также усадки основной окружности  $S_b$ , определяющей параметры эвольвентного профиля зуба. При экспериментальном исследовании усадки ЗК установлены некоторые закономерности взаимосвязи этих компонент [37, 113]. Так, для ЗК  $m = 0,5$  мм;  $z = 52$ ,  $x = 0$ ,  $\alpha = 20$  °С,  $b_w = 2$  мм получено [37], что отношение  $S_a/S_e$  составляет от 1,2/1,0 до 2,2/1,8. При исследовании влияния технологических факторов и конфигурации литниковой системы на усадку получено [18], что усадка уменьшается с повышением давления впрыска, снижением температуры формы и увеличением размеров поперечного сечения впускного канала (табл. 7).

При малой толщине стенки диска ЗК (~5 мм) разница в продольной и поперечной усадке составляет 0,95–0,98 (при уменьшении поперечного сечения впускного канала с 1,93 до 0,64 мм<sup>2</sup>); при большой толщине диска (~12 мм) аналогичная разница усадок колебалась от 0,70 до 0,89 (уменьшение сечения с 7,96 до 1,93 мм<sup>2</sup>) [114] (табл. 8).

По данным эксперимента на образцах ЗК широкого спектра геометрических параметров

( $m = 0,3 \dots 0,45$  мм;  $z = 14 \dots 43$ ;  $d_a = 4,8 \dots 16,65$  мм) получено [115], что разброс компоненты усадки  $S_a$  составлял от 1,93 до 2,95% (среднее из 14 измерений 2,68%), а компоненты  $S_s$  – от 0,55 до 2,48% (среднее из 12 измерений 1,37%).

Таблица 7 — Влияние температуры литьевой формы, поперечного сечения впускного канала и давления впрыска на диаметр вершин зубьев ЗК с толщиной стенки 5 мм из ПА6 [18]  
Table 7 — Influence of the temperature of the injection mold, the cross section of the inlet channel and the injection pressure on the diameter of the teeth tips of the gears with a wall thickness of 5 mm from PA6 [18]

Температура формы, °С	Усадка по диаметру вершины зубьев, %, давление впрыска (МПа), размеры поперечного сечения впускного канала (мм <sup>2</sup> )					
	56			112		
	0,32	0,64	1,92	0,32	0,64	1,92
30	2,75	2,50	2,20	2,30	2,05	1,80
82	2,75	2,70	2,50	2,35	2,20	2,00
121	2,87	2,80	2,75	2,60	2,50	2,40

Таблица 8 — Влияние размеров поперечного сечения впускного канала  $A$ , толщины стенки ЗК  $h$  из ПА6 и направления течения расплава на усадку [114]  
Table 8 — Influence of the dimensions of the cross section of the inlet channel  $A$ , the wall thickness of the gear  $h$  from the PA6 and the direction of the melt flow on shrinkage [114]

Соотношение величины усадки поперек $S_L$ и вдоль $S_H$ направления течения расплава (%) при толщине $h$ стенки колеса и размере $A$ поперечного сечения впускного канала			
$h = 5$ мм		$h = 12$ мм	
$A$ , мм <sup>2</sup>	$S_L/S_H$ , %	$A$ , мм <sup>2</sup>	$S_L/S_H$ , %
0,64	0,98	1,93	0,89
1,29	0,85	7,74	0,75
1,93	0,95	7,96	0,70

При исследовании зависимости радиальной усадки от диаметра цельнолитых и армированных имитаторов зубчатых колес из полиацетала марки STD-AM (размеры имитаторов приведены в табл. 9), найдено, что наибольшее соответствие экспериментальным данным дают аппроксимирующие следующие зависимости [115]

$$S_a = a + b \ln d_a \quad (1)$$

(для цельнолитых образцов) и

$$S_a = a + b \ln(d_a - d_{арм}) \quad (2)$$

(для армированных образцов)

(Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  указаны в табл. 9).

При исследовании зависимости усадки от геометрических параметров ЗК (табл. 10) обработку результатов авторы [113] производили с использованием пакета программ, позволяющего получить уравнение множественной регрессии с выбором существенных факторов.

В результате получены уравнения регрессии для расчета значимых зависимых переменных ( $S_s$  и  $S_a - S_b$ ) с учетом значений коэффициентов частной корреляции, стандартной ошибки оценки и коэффи-

циентов множественной корреляции:

$$S_s = 27,2 + 0,00742z^2 - 0,964z; \quad (3)$$

$$S_a - S_b = 1,08 - 1,81m^2 + 0,345mz - 0,232z, \quad (4)$$

из которых следует, что наиболее значимым фактором, влияющим на параметр  $S_s$ , является число зубьев  $z$ , а на параметр ( $S_a - S_b$ ) – модуль зацепления  $m$ . В источнике [113] дана также графическая интерпретация зависимостей  $S_s = f(m, z)$  и ( $S_a - S_b$ ) =  $f(m, z)$ . Установлено [113, 116], что параметры  $S_s$  и ( $S_a - S_b$ ) взаимосвязаны между собой линейной зависимостью. Для образцов ЗК из полиацетала марки СФД-Б ( $m = 1,5$  мм;  $z = 19-34$ ;  $b_w = 10$  мм) уравнение взаимосвязи имеет вид

$$S_s = -1,831 + 6,072 (S_a - S_b), \quad (5)$$

что подчеркивает специфический неравномерный характер усадки зубчатых колес, существенно отличающийся от модели равномерной радиальной усадки.

Таблица 9 — Геометрические параметры имитаторов ЗК из STD-AM (толщина стенки диска 7 мм) и коэффициенты  $a$  и  $b$  уравнений (1) и (2) [115]

Table 9 — The geometric parameters of the gear simulators from STD-AM (disk wall thickness 7 mm) and the coefficients  $a$  and  $b$  of equations (1) and (2) [115]

Цельно-пластмассовые имитаторы ЗК						
Коэффициенты уравнения (1)	$a = 0,015; b = 0,775$					
Диаметр $d_a$	10,5	14	20	26	29	39
Армированные имитаторы						
Коэффициенты уравнения (2)	$a = 1,178; b = 0,679$					
Параметр $d_a - d_{арм}$	6,0	16,5	20	25		

Таблица 10 — Геометрические параметры экспериментальных ЗК из ПА-12  
Table 10 — Geometric parameters of experimental gears from PA-12

$m$ , мм	0,4	0,6	0,8	0,6	0,8	0,8	1,0	1,0	1,25
$z$	75	60	45	90	75	106	60	90	75

Примечание: усадка по окружности вершин зубьев  $S_a = 1,700 \pm 1,775\%$

### Учет технологической усадки при расчете матриц, формирующих венец зубчатого колеса

**Расчет исполнительных размеров формообразующих матриц.** Как уже указывалось, отметим для начала, что усадка литых пластмассовых ЗК носит анизотропный характер. При правильном расположении впускных литников и соблюдении заданных параметров технологического процесса можно добиться равномерной расчетной усадки ступицы, внешнего, внутреннего и делительного диаметров, а также других элементов колеса, кроме самих зубьев. Для учета анизотропной усадки зубьев необходимо правильно рассчитать изменение основного диаметра зубчатого колеса от его размера в формообразующей матрице до требуемого значения после охлаждения отливки и предусмотреть необходимые



корректировки по высоте и толщине зубьев. Существует несколько методов, позволяющих прогнозировать и рассчитывать изменение профиля зуба в результате усадки.

Из анализа этих методов [117] следует, что для максимально возможной компенсации систематических отклонений размеров и формы зубьев, обусловленных усадкой, необходимо выполнить дополнительную корректировку исполнительных размеров формообразующей матрицы по результатам измерения опытной партии ЗК. При этом речь идет о компенсации именно систематических погрешностей, обусловленных формирующим инструментом, то есть расчете средней величины изменения размера формируемого колеса от технологической усадки, соответствующего его изменению от середины поля допуска на размер матрицы до середины поля допуска на размер ЗК. Случайные погрешности, обусловленные технологическим режимом литья, компенсируются и учитываются корректировкой параметров технологического процесса.

Все методы основываются на предположении, что при усадке происходит изменение основного диаметра, определяющего параметры эвольвентного профиля зуба, от его размера в формообразующей матрице  $d_b^M$  до требуемого значения  $d_b^k$  после охлаждения отливки. В общем случае влиять на размеры и форму зуба и непосредственно на диаметр вершин зубьев ЗК можно, принимая в качестве определяющих параметров либо комплекс геометрических показателей – модуль  $m$ , угол профиля исходного контура  $\alpha$  и коэффициент смещения  $x$ , либо любую их комбинацию, либо один параметр.

В принятых в практике вариантах расчета формообразующих матриц используются следующие соотношения [16–18, 34, 36, 49, 117–119]:

1. При учете компенсации усадки в размерах матрицы посредством уменьшения угла  $\alpha$  профиля исходного контура (индексы «к» и «м» относятся к колесу и матрице соответственно):

$$\cos \alpha^m = \frac{1+2S}{1+S} \cos \alpha^k \quad (6)$$

или

$$\cos \alpha^m = \frac{\cos \alpha^k}{(1-S)} \quad (7)$$

или

$$\cos \alpha^m = \cos \alpha^k \cdot (1+S). \quad (8)$$

При этом изменение параметра  $d_a^m$  вершин зубьев матрицы учитывают коэффициентом  $x^m$  смещения исходного контура матрицы по формуле [34, 36]:

$$x^m = x^k + \frac{S}{2} [z + 2(h_a^* + x^k)], \quad (9)$$

а сам диаметр  $d_a^m$  рассчитывается по формуле, аналогичной используемой при расчете диаметра колеса:

$$d_a^m = mz + 2m(h_a^* + x^m). \quad (10)$$

Отметим, что коэффициент  $(1+2S)/(1+S)$  в формуле (6) учитывает практический опыт, из которого следует, что при усадке диаметр  $d_b$  основной окру-

ности уменьшается существеннее, чем делительный  $d$ , т. е. в этом случае [36]:

$$d_b^m = (1+2S)d_b^k; \quad (11)$$

$$d^m = (1+S)d^k.$$

Угол  $\alpha^m$  при этом получается большим, чем при вычислении  $\alpha^m$  по формулам (7) и (8).

2. При учете компенсации усадки корректировкой расчетного модуля используются аналогичные зависимости:

$$m^m = m^k(1+S) \quad (12)$$

или

$$m^m = m^k / (1-S). \quad (13)$$

Заметим, что формулы, использующие выражение  $(1+S)$ , методически неверны, так как получены из исходной зависимости, в которой разность размеров формирующей матрицы и изделия относится не к постоянному размеру матрицы (последнее методически правильно и стандартизовано), а к меняющемуся в результате усадки размеру изделия, например, при расчете усадки по диаметру  $d_b$ :

$$S_b = \frac{d_b^m - d_b^k}{d_b^k}. \quad (14)$$

При традиционном расчете усадки в качестве основного измеряемого параметра принимается диаметр  $d_a^k$  вершин зубьев, по изменению которого рассчитывается фактическая усадка:

$$S_a = \frac{d_a^m - d_a^k}{d_a^m}. \quad (15)$$

В случае, когда рассчитываются размеры формообразующей матрицы, усадку принимают по справочным данным, результатам измерения наружного диаметра имитаторов или диаметра окружности вершин зубьев  $d_a$  реальных зубчатых колес. В зависимости от принятой схемы расчета вычисляют: по схеме п.1 –  $\alpha^m$  – по выражению (6) или (7),  $x^m$  – по формуле (9); по схеме п. 2  $m^m$  – по формуле (12) или (13).

3. По одному из методов [49, 118] кроме усадки по диаметру вершин зубьев  $S_a$ , рассчитываемой по формуле (15), рассчитывается также усадка по высоте зуба  $S_h$  и по его толщине  $S_s(h_i)$  на разной высоте зуба в сечениях  $i$ :

$$S_h = \frac{h_{\max}^m - h_{\max}^k}{h_{\max}^m}; \quad (16)$$

$$S_s(h_i) = \frac{t_{hi}^m - t_{hi}^k}{t_{hi}^m}. \quad (17)$$

Наглядно анизотропию усадки по толщине зуба на разной высоте демонстрирует график (рис. 1), из которого следует, что абсолютная разница между толщиной зуба колеса и соответствующим размером полости матрицы в направлении от основания зуба к вершине снижается с 0,580 до 0,245 мм, а усадка увеличивается от основания к вершине с 2,248% до 2,502% (поскольку абсолютная разница относится к большей толщине зуба у основания).

4. Авторами концепции под брендовым названием Genetic Molding Solution [50, 75, 120] предлагается поэтапное решение задачи корректировки размеров формообразующих матриц, начиная с расчета параметров профиля зубьев венца по методу Direct Gear Design [120], проводя затем последовательно корректировку размеров зубчатой матрицы по результатам измерения опытной партии с помощью программы Genetic Molding Solution и заканчивая подготовку производства изготовлением и измерением представительной партии ЗК с контролируемыми размерами, соответствующими данным чертежа. Соответствие реальных допусков требующим достигается оптимизацией и фиксацией технологических параметров литья под давлением.

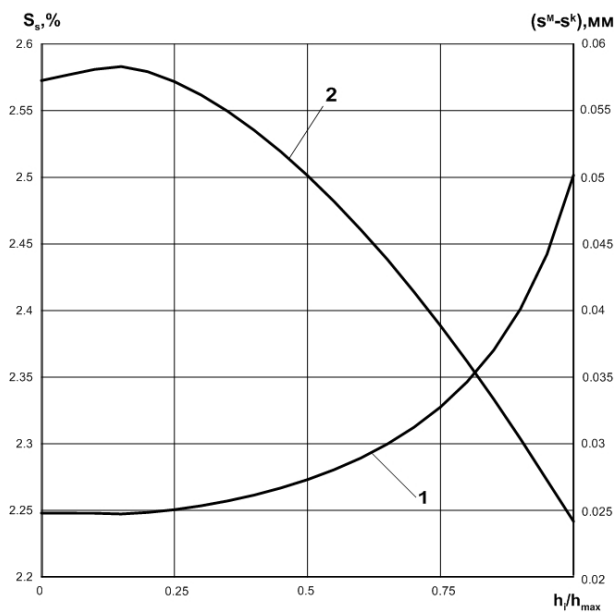


Рисунок 1 — Анизотропия усадки по толщине зубьев ЗК из ПА6 ( $m = 1,5$  мм;  $z = 32$ ;  $d_a = 51,0$  мм) [118]:  $h_i/h_{max}$  — относительная высота зуба;

1 — усадка по толщине зуба  $S_s$ ; 2 — абсолютная разница ( $s^m - s^k$ ) толщины зуба матрицы  $s^m$  и колеса  $s^k$

Fig. 1 — Anisotropy of shrinkage along the thickness of teeth of gears from PA-6

( $m = 1.5$  mm;  $z = 32$ ;  $d_a = 51.0$  mm) [118]:  $h_i/h_{max}$  is the relative height of the tooth;

1 is the thickness shrinkage of tooth  $S_s$ ; 2 is the absolute difference ( $s^m - s^k$ ) of the tooth thickness of matrix  $s^m$  and gear  $s^k$

5. В работе [121] предлагается концепция расчета по независимым от параметров производящего исходного контура обобщающим параметрам, в качестве которых принимаются диаметры  $d_b^k$  и  $d_a^k$ , а также угловая толщина зуба  $\theta_b^k$  по основной окружности. При таком подходе появляется возможность достаточно точно определить диаметр основной окружности и толщину зуба по косвенным данным, полученным в результате измерения следующих параметров матрицы и колеса: размера  $M_p$  по роликам и основного шага  $p_b$ ; длины общей нормали  $W_{n1}$  и  $W_{n2}$  при разных числах  $z_{n1}$  и  $z_{n2}$  охватываемых зубьев; а также по координатам профилей зубьев.

Коэффициенты технологической усадки  $S_a$ ,  $S_b$

и  $S_s$  рассчитывают по формулам [122, 123]:

$$S_a = \frac{d_a^m - d_a^k}{d_a^m}; \quad (18)$$

$$S_b = 1 - \frac{z(W_2 - W_1)}{\pi d_b^m (z_{n2} - z_{n1})}; \quad (19)$$

$$S_s = 1 - \frac{2\pi[W_{n2}(z_{n1} - 1) - W_{n1}(z_{n2} - 1)]}{\theta_b^m z (W_{n1} - W_{n2})}. \quad (20)$$

Итогом данного расчета являются «точные» средние значения основных параметров матрицы, в которой можно изготовить зубчатые колеса со средними значениями параметров, соответствующими заданным, и отклонениями параметров, соответствующими заданным допускам (соответствие или несоответствие отклонения от среднего значения параметра заданному допуску определяется диапазоном разброса усадки).

После изготовления опытной партии ЗК в рассчитанной по предлагаемой методике формообразующей матрице устанавливают соответствие отклонений любого из контролируемых размеров колес заданным допускам соответствующего размера. Определяют вероятность соответствия реальных показателей точности ЗК заданным. Расчет отклонения фактического среднего размера любого из измеряемых параметров от заданного среднего по чертежу сравнивают с доверительным интервалом для среднего размера и проводят, в случае необходимости, корректировку технологических параметров [122, 123]. При необходимости корректировки размеров матрицы используют методологию расчета вероятности получения ЗК заданной точности скорректированных средних значений.

Как следует из изложенного, точность расчета формообразующих матриц определяется конструкторскими и технологическими факторами при изготовлении зубчатых колес. Расчет диаметра матрицы  $d_a^m$ , формирующего диаметр вершин зубьев колеса, предпочтительно проводить по коэффициенту усадки  $S_a$ , пользуясь формулой (18), а коэффициент  $x^m$  смещения матрицы рассчитывать из условия, обеспечивающего необходимую толщину зуба, т. е. по формуле (9).

### Источники погрешностей

Погрешности ЗК определяются спецификой их технологии. В отличие от погрешностей, возникающих при механической обработке, обусловленных погрешностями станка и его настройки, источниками погрешностей при изготовлении ЗК литьем под давлением являются отклонения формы инструмента (матрицы), установки инструмента и заготовки (при наличии армирующей вставки-ступицы); точность регулирования технологических параметров литья; конструкция литейной формы; технологические характеристики материала.

Погрешности изготовления и монтажа ЗК снижают качественные показатели зацепления зубьев зубчатой пары.

Источники технологических погрешностей формованных ЗК можно разделить на две основные группы: связанные с погрешностями литейной формы и обусловленные технологической усадкой материала. С литейной формой связаны погрешности формующей матрицы, отражающие технологию ее изготовления, погрешности установки матрицы в форму и погрешности установки знаков, формующих посадочные поверхности колеса. К ним можно отнести также погрешности размеров арматуры при изготовлении армированных колес. Погрешности технологической усадки включают погрешности, связанные с неравномерной усадкой материала в пределах одного образца колеса (анизотропия усадки), отклонениями величины усадки для различных колес в партии, неполной компенсацией усадки в размерах формующей матрицы в связи с неточным отражением процесса усадки принятой моделью технологической усадки колеса.

Взаимосвязь погрешностей литого колеса  $\delta^k$  с погрешностями литейной формы  $\delta^\phi$ , средним значением  $\bar{S}$  и отклонениями  $\Delta S$  технологической усадки в общем виде можно представить зависимостью [124]

$$\delta^k = \varphi_1(\delta^\phi) + \varphi_2(S, \Delta S), \quad (21)$$

где  $\varphi_1(\delta^\phi)$ ,  $\varphi_2(S, \Delta S)$  — функции изменения рассматриваемой погрешности в зависимости от погрешностей литейной формы, среднего значения и отклонений технологической усадки.

В качестве основных погрешностей для литых зубчатых колес из пластмасс принимаются первичные погрешности (ГОСТ 1643–81 и ГОСТ 9178–81), которые наиболее полно отражают изменение геометрии зубчатого венца в принятой модели технологической усадки. При выборе основных погрешностей учитывается необходимость контроля по ним зубчатых колес всех степеней точности в соответствии с указанными стандартами.

Упомянутым критериям по кинематическим нормам точности наиболее полно соответствуют накопленная погрешность шага колеса  $F_{pr}$  и радиальное биение зубчатого венца  $F_{rr}$ . По нормам плавности в качестве основных выбирают отклонение шага зацепления  $f_{pbr}$  и погрешность профиля зуба  $f_{fr}$ , по нормам контакта – погрешность направления зуба  $F_{\beta r}$ , по нормам бокового зазора – величину гарантированного бокового зазора  $j_{n \min}$ .

Считая, что путем корректировки геометрических параметров формообразующей матрицы полностью компенсируется средняя величина технологической усадки материала, рассматривается в общем виде влияние технологических факторов на основные погрешности литых колес [125, 126].

На параметры кинематической точности колес влияют параметры накопленной погрешности шага матрицы  $F_{pr}^m$ , неравномерность усадки в различных направлениях в пределах одного зубчатого колеса по профилю  $\Delta S_{bi}^R$  и толщине зуба  $\Delta S_{si}^R$ , радиаль-

ное биение зубчатого венца матрицы относительно знаков, формующих посадочные поверхности колеса  $F_{rr}^M$ , и радиальное биение арматуры  $F_{rr}^h$  при изготовлении армированных колес.

В соответствии с методом суммирования технологических погрешностей для накопленной погрешности шага колеса  $F_{pr}^k$  можно записать выражение, которое отражает структуру погрешностей, влияющих на  $F_{pr}^k$ :

$$F_{pr}^k = \sqrt{\varphi_1^2(F_{pr}^M) + \varphi_2^2(\Delta S_{bi}^R) + \varphi_3^2(\Delta S_{si}^R) + \varphi_4^2(F_{rr}^M) + \varphi_5^2(F_{rr}^h)}, \quad (22)$$

для радиального биения  $F_{rr}^k$  зубчатого венца колеса соответственно

$$F_{rr}^k = \sqrt{f_1^2(F_{rr}^M) + f_2^2(\Delta S_{bi}^R) + f_3^2(\Delta S_{si}^R) + f_4^2(F_{rr}^h)}. \quad (23)$$

Величина равномерной усадки по профилю зуба  $S_b$  и толщине зуба  $S_s$ , а также отклонения усадки  $\Delta S_b$  и  $\Delta S_s$  при изготовлении различных колес в партии практически не влияют на кинематическую погрешность колеса.

На плавность работы существенное влияние оказывают отклонения усадки по профилю зуба  $\Delta S_b$  для сопрягаемых колес, погрешности зубчатого венца матрицы по нормам плавности, неравномерность усадки по профилю  $\Delta S_{bi}^R$  и толщине зуба  $\Delta S_{si}^R$  в различных радиальных направлениях в пределах одного колеса, радиальное биение зубчатого венца матрицы  $F_{rr}^M$  и арматуры  $F_{rr}^h$  относительно центрального знака, допуски на размеры арматуры  $T_h$ , влияющие на абсолютное колебание усадки при изготовлении партии колес. На плавность работы передаточной пары влияет также составляющая усадка  $\delta S$ , которая приводит к отклонению от эвольвентного профиля зуба и отражает несоответствие реальной технологической усадки принятой модели. Таким образом, для отклонения основного шага литого зубчатого колеса можно записать:

$$f_{pbr}^k = \sqrt{\psi_1^2(f_{pbr}^M) + \psi_2^2(\Delta S_b) + \psi_3^2(\Delta S_{bi}^R) + \psi_4^2(\Delta S_{si}^R) + \dots + \psi_5^2(F_{rr}^M) + \psi_6^2(F_{rr}^h) + \psi_7^2(T_h)}, \quad (24)$$

а для погрешности профиля зуба

$$f_{fr}^k = \sqrt{\theta_1^2(f_{fr}^M) + \theta_2^2(\delta S)}. \quad (25)$$

Погрешности контакта зубьев для прямозубых литых колес во многом определяются точностью установки в форме зубчатой матрицы и знака, формующего посадочные поверхности колеса. Для погрешности направления зуба  $F_{\beta r}^k$  колеса с учетом погрешности направления зуба  $F_{\beta r}^M$  матрицы, отклонения от параллельности осей  $f_{xr}^M$  и перекося

осей  $f_{xr}^M$  матрицы и центрального знака, а также неравномерности усадки по профилю  $\Delta S_{bi}^t$  и толщине зуба  $\Delta S_{si}^t$  в пределах ширины зубчатого венца формула имеет вид

$$F_{\beta r}^k = \sqrt{\Phi_1^2(F_{\beta r}^M) + \Phi_2^2(f_{xr}^M) + \Phi_3^2(f_{yr}^M) + \Phi_4^2(\Delta S_{bi}^t) + \Phi_5^2(\Delta S_{si}^t)}. \quad (26)$$

Отклонения величины усадки от колеса к колесу при изготовлении партии колес, неравномерность ее в различных направлениях и радиальное биение зубчатого венца матрицы практически не оказывают влияния на параметры контакта зубьев литых колес из пластмасс.

На боковой зазор в передаче в различной степени влияют практически все упомянутые источники погрешностей литых колес. Величину требующейся компенсации погрешностей изготовления при назначении толщины зубьев пластмассового колеса для получения гарантированного бокового зазора можно определить по уравнению

$$K_j = \sqrt{F_1^2(F_{rr}^M) + F_2^2(f_{\beta r}^M) + F_3^2(f_{fr}^M) + F_4^2(F_{\beta r}^M) + F_5^2(f_{xr}^M) + F_6^2(f_{yr}^M) + F_7^2(\Delta S_b) + F_8^2(F\Delta S_8) + F_9^2(\Delta S_{bi}^R) + F_{10}^2(\Delta S_{si}^R) + F_{11}^2(\delta S) + F_{12}^2(F_{rr}^h) + F_{13}^2(T_h)}. \quad (27)$$

Функции изменения рассматриваемых погрешностей литых колес в зависимости от погрешностей литейной формы, среднего значения и отклонений технологической усадки определяются из геометрических соображений в соответствии с конструкцией формы и принятой моделью технологической усадки материала (отклонения и неравномерность усадки по профилю и по толщине зуба) и проверяются экспериментально. На основании изложенного подхода разработаны рекомендации по назначению норм бокового зазора и плавности [126].

### Точность зубчатых колес и методы ее повышения

Точность, как одна из важнейших составляющих качества любой продукции, определяет требования к материалу, технологии оборудования и оснастке. На точность деталей при литье под давлением оказывают влияние состав и структура полимерного материала, конструкция литейной формы и условия переработки.

В СССР вопросы точности и взаимозаменяемости деталей из пластмасс регулярно обсуждались на Всесоюзных научно-технических конференциях, проводившихся в 1962–1987 гг. Общие теоретические и прикладные проблемы точности производства получаемых литьем под давлением изделий из термопластов, вопросы взаимозаменяемости и конструктивной определенности, контроля и регулирования точности подробно рассмотрены В. А. Брагинским [127]; вопросы технологии получения

точных деталей из ПМ, в том числе зубчатых колес, рассматривались в работе [30]. Для получения данных о величине объемной усадки полимерного материала и соответственно оценки возможности изготовления из него изделий требуемой точности можно использовать *PVT*-диаграммы (*P* – давление, *V* – объем, *T* – температура), которые могут быть представлены производителем. Как указывается в справочнике [44], компания Дженерал Электрик располагает *PVT*-диаграммами для более чем 500 наименований различных полимеров.

По установившейся практике зарубежных фирм конкретная информация, позволяющая оценить возможность получения деталей с заданной точностью размеров, предоставляется производителем полимерного материала в виде зависимости «... плюс–минус допуск vs номинальный размер» или таблиц рекомендуемых допусков с указанием допустимых уклонов, плоскостности, концентричности и др. Указываются жесткие («точные») и коммерческие («грубые») допуски (см., например, [128, 129]).

Таблицы допусков и допускаемых отклонений распространенных термопластов пользователь может получить в обществе Производителей Пластмасс (Society of Plastics Industries, SPI, USA). Этим же обществом периодически выпускается бюллетень, в котором даются ссылки на стандарты и практические советы для переработчиков пластмасс [130]. Аналогичная информация содержится в немецком стандарте DIN 16901.

В связи с существенным изменением размеров полимерных ЗК, обусловленным высокой чувствительностью к температуре и влажности окружающей среды нормативным документом VDI [63] предлагается, во избежание заклинивания передачи, назначать более свободные показатели точности, влияющие на боковой зазор передачи. В зависимости от требований к точности передачи (повышенные, нормальные, пониженные) рекомендуется [63] увеличивать верхнее  $E_{as}''$  и нижнее  $E_{is}''$  предельное отклонение межосевого расстояния в 2 раза (передачи с нормальными требованиями, делительный диаметр до 50 мм) и в 4 раза (передачи с пониженными требованиями, делительный диаметр до 200 мм). Для силовых передач рекомендуется назначать полуторный допуск на длину общей нормали  $T_w$  (или толщину зуба  $T_c$ ) при смазке окупанием (степень точности 9-Ve/d по ГОСТ 1643-81 для высоконагруженных и 10-Ve/d – для слабнонагруженных передач). Аналогично, для кинематических передач, смазываемых при монтаже, рекомендуется полуторный допуск  $T_w$  ( $T_c$ ) для передач с допускаемым малым мертвым ходом (9-Ve/d) и удвоенный  $T_w$  ( $T_c$ ) с большим мертвым ходом (10-Vf/e/d).

Радиальное биение ЗК, изготавливаемого методом литья под давлением, в большой степени зависит от конструкции литейной формы. Для того, чтобы отлить зубчатое колесо с минимальным радиальным биением, рекомендуется [116] исполь-

зовать одноместные формы с расположением матрицы, формирующей зубчатый венец, и центральный знак, формирующий посадочное отверстие, в одной полуформе. Допуски на радиальное биение посадочных мест матрицы и центрального знака назначают по 3–5 квалитетам точности по ГОСТ 25346-88. В зависимости от сочетания посадок «отверстие – вал» в размерной цепи «центральный знак – матрица зубчатого венца колеса» точность отливаемых зубчатых колес может колебаться от 7-ой до 11-ой степени точности по ГОСТ 9178-81 ( $m \leq 1$  мм) или ГОСТ 1643-81 ( $m > 1$  мм) [116]. Наилучший результат (7-я степень точности ЗК по параметру радиального биения венца) обеспечивает вариант со стержневыми выталкивателями при сочетании посадок и геометрических параметров ЗК, указанных в табл. 11.

Таблица 11 — Варианты посадок в размерной цепи «центральный знак – матрица», обеспечивающие достижение 7-ой степени точности ЗК по радиальному биению по ГОСТ 9178-81 или ГОСТ 1643-81 [116]

Table 11 — Variants of fits in the dimensional chain "central sign-matrix", ensuring the achievement of the 7th degree of accuracy of the gears for radial runout in accordance with GOST 9178-81 or GOST 1643-81 [116]

Модуль $m$ , мм	Вариант посадки «отверстие – вал»			Делительный диаметр $d$ , мм
	Центр. знак – корпус	Корпус – матрица	Втулка – корпус	
От 0,1 до 1,5	H6/h5	H6/h5	H7/h6	до 80
	H7/h6	H7/k6	H7/h6	до 32
Свыше 0,5 до 1,0	H6/h5	H6/h5	H7/h6	до 80
	H7/h6	H7/k6	H7/h6	
Свыше 1,0 до 1,5	H6/h5	H6/h5	H7/h6	до 80
	H7/h6	H7/k6	H7/h6	
	H6/h6	H6/k5	H7/h6	до 32

Примечание: Точность матрицы отливается ЗК соответствует 6-ой степени точности по ГОСТ 9178-81 или ГОСТ 1643-81

Повышение точности крупногабаритных массивных ЗК достигается применением специальных технологических приемов, позволяющих уменьшить величину и разброс показателей усадки, а именно, сверхвысокого ( $\geq 100$  МПа) давления литья; впрыска расплава полимера в не полностью сомкнутую форму и окончательного оформления изделия в процессе ее смыкания; формования отливок из газонаполненных (вспенивающихся) термопластов; подпитки оформляющей полости формы из дополнительных полостей после затвердевания расплава в литниковых каналах; использованием оснастки с изменяющимся объемом оформляющей полости и дополнительным сжатием расплава материала на стадиях впрыска и охлаждения. Исследования, проведенные на зубчатых колесах ( $m = 3$  мм,  $z = 27$ ;  $\beta = 12^\circ\text{C}$ ;  $b = 45$  мм; материал – стеклонеполненный полиамид ПА-6), показали [131], что разброс усадки при литье подвспененного термопласта снизился: по окружности вершин зубьев — на 22%; по показателю длины общей нормали — на 48%; по ширине зубчатого венца — на 8%; соответствующие показатели при литье в форму с изменяющимся объемом полости составляли 36, 48 и 81% соответственно.

## Особенности конструирования литевых форм для пластмассовых зубчатых колес

Вопросам проектирования литевых форм посвящен ряд справочных и учебно-методических источников [132–137]. В переводах зарубежных изданий [138–140] содержатся обобщенные и систематизированные данные по конструированию и производству литевых форм; дается подробный анализ конструкций форм и обсуждаются результаты изучения связи между проектированием, технологией и экономикой процессов – как при изготовлении форм, так и при литье деталей [139].

Выбор типовых деталей литевых форм, таких как разнообразные направляющие колонки, втулки и опоры, выталкиватели и контролкатели, хвостовики и другие детали регулируется государственными стандартами ГОСТ 220062-76 ÷ ГОСТ 22082-76 под общим названием «Пресс-формы для литья термопластов под давлением», стандартами ГОСТ 17385-72 ÷ ГОСТ 17389-72, а также еще действующими ОСТ 64-1-303-77 и ОСТ 74-1-304-77 (см. таблицы нормализованных деталей пресс-форм в справочнике [136]).

Одним из очередных этапов нормализации в этой области стали разработка каталогов нормализованных деталей пресс-форм и организация фирмой ЕОС (Германия) их производства в России на базе совместного предприятия «Тантал-ЕОС Normalien» (г. Саратов) [141, 142]; чуть позже к этой деятельности подключилась московская инженерная фирма «АБ Универсал» [143].

В настоящее время наиболее востребованными являются автоматизированные каталоги известных фирм Hasco, DME, DSM и других [144] ([www.dme.net/](http://www.dme.net/), [www.futaba.co.jp/en/precision/mold](http://www.futaba.co.jp/en/precision/mold), [www.cumsa.com/](http://www.cumsa.com/), [www.strack.de/](http://www.strack.de/), [www.rabourdin.fr/](http://www.rabourdin.fr/), [www.us.misumi-ec.com](http://www.us.misumi-ec.com), [www.punch.co.jp/english/product](http://www.punch.co.jp/english/product), [www.procomps.com/Products](http://www.procomps.com/Products), [www.danly.com](http://www.danly.com)), по которым выбираются необходимые стандартные (нормализованные) детали и узлы, оставляя за проектировщиком разработку и конструирование деталей оформляющей полости.

Однако по специфическому вопросу проектирования литевых форм для зубчатых колес рекомендации в этих источниках практически отсутствуют.

Общие рекомендации по конструированию литевых форм для литых ЗК соответствуют такому для любых деталей, изготавливаемых литьем под давлением, а именно: кратчайший путь течения материала от центрального литника до оформляющей полости; удержание детали в подвижной части формы; при необходимости обеспечение надежной установки и фиксации арматуры; минимизация количества сопряжений деталей формы в размерной цепи «центральный знак, формирующий посадочное отверстие – полость матрицы, формирующая венец зубчатого колеса» (рекомендуемой является конструкция формы с размещением центрального знака и матрицы в едином блоке) [52, 145].

Отдельные конструкции литевых форм для ЗК приведены в источниках [15, 52]. Форма с центральным выталкивателем в виде пружины с упруго-эластичными элементами [146] предназначена для изготовления косозубых колес, обеспечивая при выталкивании поворот отливки вокруг своей оси. Аналогично, в форме для косозубых колес наличие либо поворотного выталкивателя, опирающегося на упорный подшипник качения, либо поворотного центрального знака, (при отливке ЗК со шпоночным или шлицевым посадочным отверстием), обеспечивается выталкивание отливки с поворотом на угол, определяемый углом наклона зуба и шириной зубчатого венца [52]. Червячное пластмассовое колесо предлагается [147] изготавливать в форме, формообразующая матрица которой выполнена из эластичного материала, армированного полый спиралью. Литевая форма для изготовления металлополимерных зубчатых колес [148] позволяет производить кратковременный нагрев арматуры непосредственно в форме в процессе литевого цикла.

Для снижения разброса и неравномерности усадки предлагаются литевые формы, обеспечивающие дополнительное сжатие расплава полимера на стадиях впрыска и охлаждения, т.е. формы с изменяющимся объемом оформляющей полости [149, 150]. В одном из вариантов [149] конструкция представляет собой форму с приводной пружиной, обеспечивающей требуемую степень уплотнения полимерного расплава на стадии охлаждения и гарантированный возврат в заданное положение уплотняющего пуансона, оформляющего торцовую поверхность отливки. Особенностью конструктивного исполнения литевой формы согласно [150] является наличие подвижного знака и подвижной подпружиненной матрицы, которые на стадии впрыска под давлением расплава перемещаются до упора в ограничительные элементы формы, а затем, на стадии охлаждения, возвращаются в исходное положение, дополнительно уплотняя изделие.

Отмечается [34], что особое внимание необходимо обращать на конструкцию колеса и расположение впускных каналов, так как эти факторы сильно влияют на параметры формы и показатели точности ЗК. Предпочтительным при проектировании взаимного положения диска и зубчатого венца является симметричный вариант конструкции ЗК. При несимметричном варианте необходимо правильно выбрать соотношение между толщиной стенки диска  $h_g$  и венца  $h_b$ . При сравнении отливок с отношением  $h_g/h_b$  равным 0,5 и 1,0 ( $d_a = 50$  мм;  $h_g = 2$  мм;  $h_b = 2$  или 1 мм; три впускных канала через каждые  $120^\circ$ ) были получены следующие показатели, характеризующие отклонение от формы поверхности: отклонения от круглости соответственно 9...16 и 6...22 мкм, от плоскостности 12...34 и 20...47 мкм, от цилиндричности 20...66 и 84...120 мкм [34]. Рекомендуемое оптимальное соотношение  $h_g/h_b = 0,75$  [34]. При удалении впускных каналов от оси колеса указанные показатели ухудшаются: при

расположении впускных каналов соответственно на диаметрах 15 и 42 мм отклонение от круглости увеличивается с 6 до 22 мкм, от плоскостности — с 20 до 47 мкм, от цилиндричности — с 26 до 66 мкм.

Данные по отклонениям формы поверхности диска с гладким венцом (имитатора ЗК с несимметричным расположением венца) приведены в табл. 12. В [34] отмечается, что направление коробления диска в процессе отливки и последующего охлаждения из выпуклого становится вогнутым. Аналогично показатели точности ухудшаются при удалении впускных каналов от оси колеса.

В литевых формах предпочтительно использовать литниковые системы с дисковыми или шатровыми впускными литниками, а также горячеканальные литниковые системы, обеспечивающие равномерное заполнение оформляющей полости расплавом и получение изделия без спаев. Если из-за наличия в центре колеса посадочного отверстия, применить такие литниковые системы невозможно, то при использовании нескольких равноудаленных впускных литников, равномерно расположенных вокруг центра отливки, необходимо следовать определенным правилам [44]. В отличие от рекомендаций [34], четное количество литников нежелательно, так как симметричные впуски, по мнению авторов [44], будут способствовать разделению детали на сектора. Рекомендуется применять нечетное количество литников (трех впускных литников может оказаться недостаточно), что усреднит усадку по диаметру и обеспечит изготовление колеса с повышенной цилиндричностью формы.

Таблица 12 — Зависимость отклонений формы имитатора ЗК с несимметричным расположением венца от соотношения  $h_g/h_b$  [34]

Table 12 — Dependence of the shape deviations of the gear simulator with the asymmetrical arrangement of the crown on the ratio  $h_g/h_b$  [34]

Форма отклонения	Отклонение, мкм, при соотношении, $h_g/h_b$	
	0,5	1,0
Отклонение от круглости	9–16	6–12
Отклонение от плоскостности	12–34	20–47
Отклонение от цилиндричности	20–66	84–120

В любом случае, четность или нечетность литниковых впусков сказывается на точности меньше, чем их количество. Так, при сравнении отливок ЗК ( $m = 0,5$  мм;  $z = 40$ ;  $d = 20$ ) с трехточечными и четырехточечными литниковыми впусками (расположенных на диаметре 13 мм) получено [34], что отклонение основного шага зацепления  $f_{pbr}$  составляло соответственно 10 мкм и 6,7 мкм и накопленная погрешность шага  $F_{pr}$  — 30 мкм и 14,1 мкм, что соответствует 8-ой и 6-ой степени точности по ГОСТ 9178-81.

Предпочтительным является кольцевой литник, обеспечивающий более равномерное формование зубчатого венца по сравнению с многоканальным четырехточечным, а вероятность получения ЗК заданной точности повышается с увеличением давле-

ния впрыска, снижением температуры литья и повышением температуры формы. Влияние конструкции литниковой системы и технологических параметров процесса литья под давлением характеризуется данными, приведенными в табл. 13.

### Компьютерное моделирование процесса литья под давлением ЗК

Компьютерный анализ процесса литья стал повседневным инструментом конструктора и технолога при подготовке производства полимерных изделий. По данным [44], разработан ряд пакетов программ для анализа процесса литья под давлением термопластов [152]: Cadmould®, Simeon Kunststofftechnische Software, Aachen, Germany, www.simcon-worldwide.com; REM3D®, Transvalor, Mougins, France, www.transvalor.com; Sigmasoft®, Sigma Engineering, Aachen, Germany, www.sigmasoft.net; Moldex®, CoreTech, Hsin-Chu City, Taiwan, www.moldex.com.tw; Timon®, Toray Industries, Tokyo, Japan, www.3dtimon.com; Planets®, Plamedia Corporation, Tokyo, Japan, www.plamedia.co.jp. Среди перечисленных отмечается как наиболее удобный для пользователя пакет программного обеспечения TMconcept компании Plastics & Computer и пакет программ Flow Analysis компании Moldflow.

Пакет Flow Analysis [153] моделирует все стадии процесса литья термопластичных полимеров: впрыск, выдержку под давлением и охлаждением, усадку и коробление, ориентацию волокнистого наполнителя, а также поведение отлитого изделия в эксплуатации. При анализе впрыска на твердотельной модели Part Adviser моделируется течение и охлаждение сжимаемого расплава при заполнении формы в режиме постоянной скорости впрыска. В программе Mold Adviser оптимизируются параметры литниковой системы. Программа MPI/Flow позволяет провести анализ течения и охлаждения расплава на всех стадиях процесса литья: впрыске, выдержке под давлением и выдержки на охлаждение. При анализе охлаждения формы MPI/Cool моделируются тепловые процессы, включая оптимизацию системы охлаждения. Оптимальные профили скорости впрыска и давления выдержки определя-

ются в программном модуле MPI/Option. В программном модуле MPI/Warp рассчитывается усадка с учетом вклада равновесной объемной усадки, кристаллизации и ориентации полимера, а также составляющие коробления, связанные с неравномерным охлаждением формы, неравномерной ориентацией полимера или наполнителя, неравномерностью уплотнения изделия. Анализ ориентации волокон в программном модуле MPI/Fiber выполняется с учетом конкурирующих процессов сдвигового течения, выстраивающего волокна вдоль потока и упругих деформаций, разворачивающих волокна перпендикулярно потоку. Подробную информацию о линейной усадке, которая используется при расчете исполнительных размеров формообразующих деталей, получают с помощью модуля MPI/Shrink на основе данных о продольной и поперечной усадке из модуля MPI/Warp.

Алгоритм компьютерного моделирования технологии литья пластмассовых ЗК предложен в работе [154] на примере нестандартных (как их квалифицируют авторы) зубчатых колес – двухвенцовых, с несимметричными зубьями, конусно-клиновых и конусно-клиновых с торцовым упрочняющим диском [155–157]. Разработан алгоритм компьютерного моделирования и визуализации технологии ЗК из термопластичных ПМ – автоматизированный выбор материала по базе данных [158]; создание модели-заготовки колеса со стандартными параметрами, доводка профиля зуба в соответствии с типом нестандартного ЗК, генерация параметров матрицы и пуансона. На основе полученных данных рекомендуется, как наиболее приемлемая, конструкция трехплитной литьевой формы с тремя впускными литниками [159, 160].

### Оптимизация состава термопластичных композитов для получения ЗК

Применение смесевых и дисперсно-наполненных полимерных термопластов наряду с эффективными технологическими методами их переработки предоставляют большие возможности по регулированию деформационных, прочностных, термомеханических и триботехнических свойств зубчатых колес. Для быстрого выбора оптимального

Таблица 13 — Вероятность изготовления литых пластмассовых ЗК заданной степени точности по показателю радиального биения вершин зубьев в зависимости от типа литника (К, Точ), давления впрыска ( $P$ , МПа), температуры литья ( $T_c$ , °C) и температура формы ( $T_f$ , °C) [145, 151]

Table 13 — The probability of manufacturing cast plastic gears of a given degree of accuracy in terms of the radial runout of the tips of the teeth, depending on the type of gate, injection pressure ( $P$ , MPa), casting temperature ( $T_c$ , °C) and mold temperature ( $T_f$ , °C) [145, 151]

Степень точности по JISB-1702	Тип литника	Вероятность получения ЗК заданной степени точности, %								
		$P$ , МПа				$T_c$ , °C			$T_f$ , °C	
		80	95	110	180	190-	200	40	55	70
7–8	К	42	44	50	52	44	53	62	44	88
	Точ	12,5	50	29	50	43	21	30	30	36
6–7	К	33	33	50	60	39	33	19	38	63
	Точ	0	50	50	25	36	22	50	30	29

Примечание: К – кольцевой, Точ – точечный четырехканальный; материал – полиацеталь,  $m = 3$  мм;  $z = 30$ ;  $b = 8$  мм

состава таких композиционных материалов предлагаются экспериментальные и расчетные методы, позволяющие сократить большие материальные и временные затраты на апробацию множества возможных вариантов.

Так, сокращению длительности испытаний ЗК из вновь создаваемых ПМ способствуют ускоренные методы оценки усталостной долговечности, основанные на комбинации малоциклового нагружения (вместо традиционных стандартных длительных испытаний) и динамического механического анализа на малогабаритных призматических образцах. Оптимизация состава наполненных термопластов [91] обеспечивается на основе двухуровневого (микро- и макроскопического) расчета ЗК [89, 90] с учетом заданных критериев качества.

В настоящее время указанные методы актуализируются в соответствии с концепцией *системной инженерии и цифрового производства* и развитием аддитивных технологий (Additive Fabrication (AF) или Additive Manufacturing (AM)), известных также как 3D-печать, 3D-принтер, 3D-принтинг. Эти технологии регламентирует стандарт ASTM F2792.1549323-1, как «Процесс объединения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от «вычитающих» производственных технологий». В России соответствующий нормативный документ (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы») вступил в действие с декабря 2017 года.

Проблематика аддитивных технологий охватывает следующие аспекты:

- Точность размеров и повторяемость геометрии слоев;
- Шероховатость поверхности;
- Возможность получения заданной микропористости;
- Необходимость дополнительной обработки поверхности;
- Сопоставимость плотности и механических характеристик материала деталей, выполненных аддитивными и традиционными технологиями;
- Сервисное обслуживание;
- Соотношение время изготовления / стоимость; качество / стоимость;
- Необходимость импортозамещения аппаратной базы, программного обеспечения и расходных материалов.

К известным разработкам относятся 3D-модель колеса зубчатого (сателлит,  $z = 20$ ,  $m = 2$  мм) в двухступенчатом планетарном многопоточном редукторе (Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 2016), двухступенчатый планетарный редуктор (ООО «Политехнинжиниринг», 2017). Стандартные образцы для определения механических характеристик ПМ печатались на 3D-принтере «Engineer V2» МИП (температура экструдера 220 °С, температура стола 60 °С, толщина слоя 0,2 мм, диаметр сопла —

0,4 мм, расходным материалом служил пластик ПЛА в виде нити диаметром 1,75 мм) с использованием программ – слайсеров Cura и Slic3r.

Из вышесказанного следует необходимость выявления областей в редукторостроении, где применение аддитивных технологий является наиболее целесообразным. Прежде всего, это изготовление экспериментальных образцов ЗК и апробация новых составов термопластичных ПМ. Соответствующие профильные конференции и практическое использование недавно введенного стандарта по аддитивным технологиям позволят обобщить пока еще небольшой опыт применения аддитивных технологий в производстве ЗК.

### Аддитивные технологии и градиентные материалы

Как известно, эксплуатационные показатели ЗП как узлов трения во многом определяются НДС контактной области и приповерхностных слоев; в свою очередь это состояние зависит от градиента деформационных характеристик в объеме материала пары трения. Активно разрабатываемые в настоящее время градиентные материалы конструкционного и триботехнического назначения характеризуются дискретным или непрерывным изменением твердости, модуля упругости и т. д. по глубине, т. е. при удалении от поверхности трения. В частности, при создании требуемого градиента указанных параметров формируют одно- или многослойные покрытия, что позволяет на 1–2 порядка повысить износостойкость контактирующих деталей. Использование 3D-печати для производства ЗК из градиентных конструкционных и одновременно антифрикционных материалов имеет существенное преимущество по сравнению с традиционными технологическими методами. Легкий, управляемый и относительно быстрый процесс изготовления ЗК, являющихся объектами сложной геометрии, реализует необходимую форму изделий и при этом оптимальный градиент свойств.

Значительные резервы в плане повышения прочности ЗК из ПМ реализуются методами компьютерной механики. Так, в работе [161] обсуждается применение в аддитивных технологиях методов механики деформируемого твердого тела и соответствующего программного обеспечения с целью построения CAD-моделей для 3D-печати элементов конструкций из градиентных материалов с оптимальным объемным распределением механических свойств. Рассматривается технологически реализуемый способ получения градиентных материалов с использованием 3D-принтера, оснащенного головкой, позволяющей производить печать материалом регулируемого состава. В этом случае используются два и более расходных материала, имеющих существенно различающиеся упругие характеристики. Для определения характеристик упругости расходного ПКМ, получаемого указанным смешением (сплавлением) использовали известные методы механики композитов (в простейшем случае таковым



является правило аддитивности). Это позволяет создавать CAD-модели для 3D-печати слоистых элементов конструкций из градиентных материалов, оптимизированных с точки зрения объемного распределения механических свойств материала.

Важным атрибутом аддитивных технологий также является специализированное программное обеспечение, позволяющее моделировать и проектировать ЗК с учетом особенностей производства и используемых материалов. Программное обеспечение 3D-принтера (за счет выбора различных настроек) влияет на качество изделий, при этом количество влияющих факторов достаточно велико. Пока ведущую роль в проектировании объектов машиностроения играют иностранные программные комплексы таких компаний, как USG, IBM, Autodesk, SolidWorks, Siemens PLM Software и др.

Программы указанных компаний покрывают всю цепочку по управлению жизненным циклом изделия и управлению технологическими процессами, позволяя не только моделировать изделие, но и проводить анализ готовой модели с учетом особенностей производства и используемого материала PLM-системы. Но зарубежные, как правило, слабо адаптированы к отечественным стандартам, что приводит к дополнительным затратам при их внедрении в производственный процесс. Использование закрытых форматов программного обеспечения (ПО) затрудняет разработку дополнительного функционала, необходимого для создания систем автоматизированного проектирования (САПР) изделия, требуя дополнительных вложений. Некоторые зарубежные компании ограничивают доступ к своим современным программным продуктам, основываясь на законодательных ограничениях.

Возможности отечественных разработчиков трансформируются в полномасштабные решения российских компаний «Аскон» и «Топ Системы» в области управления жизненным циклом изделий и организации деятельности предприятий, не уступающие по своим возможностям зарубежным программным комплексам [162].

## Заключение

Анализ развития теории и практики ЗП, в которых используются изготавливаемые литьем под давлением ЗК из термопластичных ПКМ, показывает существенный прогресс в этой области науки и техники. На основе базовых конструктивных термопластов создаются и вводятся в эксплуатацию композиционные материалы с повышенными служебными свойствами. В обзоре проведен анализ факторов, влияющих на технологические свойства отливок ЗК (усадка, коробление) и показаны выработанные меры по учету этих факторов при проектировании технологической оснастки. Обсуждаются методы расчета формообразующих элементов литьевых форм и методы их корректировки с целью повышения точности литых ЗК без дополнительной механической обработки.

Определенные выводы о тенденциях в рассматриваемом научном направлении можно сделать, сравнивая объем информации в новом издании нормативного документа VDI 2736 [63–66] (2013 г.) с таковым в предшествовавшем ему стандарте VDI 2545 [163] (1981 г.), показывающие существенное продвижение в накоплении знаний в этой области. По сравнению с [163] в [63–66] значительно расширен круг исследуемых материалов; анализируется позитивное и негативное влияние наполнителей на служебные свойства термопластичных композитов; для основных марок конструкционных термопластов приведены данные по коэффициентам Пуассона, трения и износостойкости; оценивается износостойкость полимеров в паре со стальным контртелом и в парах полимерных материалов ПА-66/ПА-66, POM/POM, ПБТ/ПА-66, POM/ПБТ, POM/ПА-66, ПБТ/POM, ПА-66/POM; дается информация по основным видам повреждений пластмассовых зубчатых колес; указаны оптимальные значения показателей шероховатости; показаны особенности расчета на прочность червячных передач и приведены данные по пределам изгибной выносливости зубьев колес из материалов ПА-46, POM, ПЭЭК; разработаны методики и блок-схемы автоматизированного расчета на прочность цилиндрических и червячных зубчатых передач с примерами.

Материалы [65] по червячным передачам базируются на результатах исследований [32, 164], в которых в широком диапазоне геометрических и нагрузочно-скоростных параметров построены и проанализированы зависимости: коэффициент трения и КПД – vs крутящий момент; прирост (в процессе испытаний) температуры боковой поверхности зуба и температуры у основания зуба vs потери мощности в зацеплении; линейный износ vs контактное давление и путь трения; предел выносливости vs число циклов нагружения при разной температуре. По разработанной программе Schraubrad.de рассчитывается геометрия и прочность червячной передачи; формируется модуль анимации; предельное значение несущей способности оценивается по ряду факторов – вычисляются коэффициенты безопасности по: температуре (с учетом температуры масляной ванны); излому зуба (с учетом температуры тела колеса); износу; наличию контактных выкрашиваний на рабочей поверхности зубьев; разрушению зубьев вследствие повышения температуры до температуры плавления ПМ. Построением указанных ограничительных линий на графике в координатах «скорость скольжения – крутящий момент» определяется зона, в пределах которой гарантируется работа ЗП без повреждений [32].

Перспективными являются аддитивные технологии изготовления зубчатых колес из композитов на основе термопластов. В совокупности с методами микромеханики и компьютерного дизайна материалов, эти технологии позволяют реализовать CAD модели для 3D-печати зубчатых колес с градиентным распределением механических свойств матери-

ала в объеме изделия, оптимизированным по критериям прочности, износостойкости и т.д. Тем самым, применительно к зубчатым колесам, реализуются инновационные концепции *материал под изделие* и *цифровое производство*.

### Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ (проект № Т18Р-286 «Разработка научных основ получения износостойких биосовместимых экструдированных полимерных нанокомпозитов для 3D-печати имплантатов сложной формы»).

Авторы признательны сотрудникам ИММС НАН Беларуси Т. А. Исаевой, Т. В. Рябченко и Е. А. Сердюковой за содействие в подготовке обзора к публикации.

### Обозначения

ЗК — зубчатое колесо; ЗП — зубчатая передача; К — кольцевой тип литника; КПД — коэффициент полезного действия; ПА — полиамид; ПБТ — полибутилентерефталат; ПК — поликарбонат; ПМ — полимерный материал; ПОМ — полиацеталь (полиоксиметилен); ПФС — полифениленсульфид; ПФЭ — полифениленовый эфир; ПЭИ — полиэфиримид; ПЭЭК — полиэфирэфиркетон; С — смазка; СВ — стекловолокно; СШ — стеклошарики; Точ — точечный четырехканальный тип литника;  $A$ , мм — размер поперечного сечения впускного канала;  $B$ , дюйм — толщина дискового образца;  $b_w$ , мм — рабочая ширина зубчатого венца ЗК;  $D$ , дюйм — диаметр дискового образца;  $d_a$ , мм — диаметр окружности вершин ЗК;  $d_{арм}$ , мм — диаметр армирующей вставки ЗК;  $d_a^k$ ,  $d_a^M$ , мм — диаметр окружности вершин ЗК и матрицы соответственно;  $d_b^k$ , мм — диаметр основной окружности ЗК;  $E_p$ , МПа — модуль упругости при растяжении;  $F_{rr}$ , мкм — радиальное биение зубчатого венца ЗК;  $F_{rr}^M$ , мкм — радиальное биение зубчатого венца матрицы;  $F_{rr}^h$ , мкм — радиальное биение арматуры матрицы;  $F_{pr}^m$ , мкм — погрешность шага матрицы;  $F_{\beta r}$ , мкм — погрешность направления зуба по нормам бокового зазора;  $F_{\beta r}^k$ , мкм — погрешность направления зуба колеса;  $F_{\beta r}^M$ , мкм — погрешность направления зуба матрицы;  $f_{jr}$ , мкм — погрешность профиля зуба по нормам контакта;  $f_{pbr}$ , мкм — погрешность основного шага зацепления;  $f_{pr}$ , мкм — погрешность шага колеса;  $f_{xr}^M$ , мкм — отклонение от параллельности осей матрицы и центрального знака;  $h$ , мм — толщина стенки диска ЗК;  $h_b$ , мм — толщина стенки венца;  $h_g$ , мм — толщина стенки диска ЗК;  $h_{v_{gmax}}$  — относительная высота зуба;  $J_{n_{min}}$ , мкм — величина гарантированного бокового зазора;  $M$ , Н·м — крутящий момент;  $M_p$ , мм — размер по роликам;  $m$ , мм — модуль зацепления;  $N_u$  — число циклов нагружений;  $p_b$ , мм — размер основ-

ного шага ЗК;  $S_a$ , % — усадка по диаметру вершин зубьев;  $S_b$ , % — усадка по основной окружности;  $S_e$ , % — усадка по ширине впадин зуба;  $S_h$ , % — усадка по высоте зуба;  $S_s$ , % — усадка по толщине вершин зуба;  $S_{\perp}$ , % — усадка поперек направления течения расплава;  $S_{\parallel}$ , % — усадка вдоль направления течения расплава;  $\bar{S}$ , % — среднее значение технологической усадки;  $s^m$ ,  $s^k$ , мм — толщина зуба по делительной окружности матрицы и колеса соответственно;  $(s^m - s^k)$ , мм — абсолютная разница толщины зуба матрицы и колеса;  $T_n$ , °C — температура литья;  $T_p$ , °C — температура расплава;  $T_c$ , °C — температура сушки;  $T_{\phi}$ , °C — температура формы;  $T_h$ , мкм — допуск на размер арматуры;  $t_d$ , с — время выдержки под давлением;  $t_o$ , с — время охлаждения;  $u$  — передаточное число;  $V$ , м/с — окружная скорость;  $W_{n1}$  и  $W_{n2}$ , мм — длина общей нормали при разных числах зубьев  $z_{n1}$  и  $z_{n2}$ ;  $x$  — коэффициент смещения;  $x^m$  — коэффициент смещения исходного контура матрицы;  $z_1/z_2$  — число зубьев шестерни/колеса;  $\alpha$ , ° — угол давления профиля исходного контура;  $\alpha_0$ , ° — угол исходного контура ЗК;  $\beta$ , ° — угол наклона зуба;  $\Delta S$ , % — отклонение технологической усадки;  $\Delta S_{bi}^R$ , % — неравномерность усадки в различных направлениях по профилю зуба;  $\Delta S_{bi}^t$ , % — неравномерность усадки по профилю зуба;  $\Delta S_{si}^t$ , % — неравномерность усадки в различных направлениях по толщине зуба;  $\delta^k$  — погрешность литого ЗК;  $\delta^{\phi}$  — погрешность литьевой формы;  $\delta S$ , % — составляющая усадки;  $\theta_b^k$ , ° — угловая толщина зуба по основной окружности;  $\mu$  — коэффициент трения;  $\sigma_F$ , МПа — условный предел изгибной усталостной прочности, соответствующий определенному  $N_u$ .

### Литература

- Рыжов К. 100 великих изобретений [Электронный ресурс]. URL: <http://motor-reductor.com/stati/istoriyarazvitiyashesterni> (дата обращения 24.02.2018).
- Hall K. W., Alword H. H. Capacity of Nylon Plastic Gears // Machine Design, 1956, vol. 28, no. 8, pp. 120–122.
- Aus Kunststoffen hergestellte Zahnräder // Technica, 1956, vol. 5, no. 4, pp. 153–154, 183.
- Formulae for Nylon Gears // Practical Plastics, 1959, vol. 10, no 6, pp. 19–23, 25.
- Таканаши С. Зубчатые колеса из пластмасс // Пурастикку сэйкэй гидзюцу, 1959. Т. 10. № 10. С. 30–40.
- Бобровников Г. А. Новый метод изготовления зубчатых колес из термопластических масс // Изв. ВУЗов. Технология легкой промышленности, 1960. № 6. С. 130–134.
- Sache H. Betriebseigenarten von Kunststoffzahnradern // Feinwerktechnik, 1960, vol. 64, no. 3, pp. 98–102.
- Acital Resin Gears // Engineering Materials and Design, 1962, vol. 5, no. 4, pp. 246–250.
- Reichherzer R. Runststoffe in Zahnräder and Getriebbau // Technica (Suisse), 1963, vol. 12, no. 12, pp. 835–838.
- Rothe W. Zahnräder aus Kunststoffen // Leipzig Fachberg, 1964, vol. 72, no. 8, pp. 306–313.
- Vörös I. Tragfähigkeit von Kunststoffzahnradern mit Wildhaber-Novikov-Verzahnung // Antriebstechnik, 1964, vol. 10, no. 7, pp. 251–255.
- Белый В. А., Свириденко А. И., Щербаков С. В. Зубчатые передачи из пластмасс. Минск: Наука и техника, 1965. 248 с.

13. Ермаков В. А. Зубчатые колеса неметаллических материалов. М.: Машиностроение, 1966. 68 с.
14. Гавриленко В. А., Москалев М. А., Остапенко О. И. Мелкомодульные металлополимерные зубчатые передачи. М.: Машиностроение, 1972. 136 с.
15. Белый В. А., Старжинский В. Е., Щербаков С. В. Металлополимерные зубчатые передачи. Мн.: Наука и техника, 1981. 352 с.
16. Krause W. *Plastzahnäder*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1985. 159 p.
17. Clifford E., Adams C. E. *Plastics Gearing*. New York; Basel: Marcel Dekker, Inc., 1986. 384 p.
18. Белчев Б., Арнаудов К., Козлова А. Зъбни предавки с пластмасови колела. София: Техника, 1988. 91 с.
19. Старжинский В. Е. [и др.]. Пластмассовые зубчатые колеса в передачах точного приборостроения. Мн.: Навука і тэхніка, 1993. 360 с.
20. Старжинский В. Е. [и др.]. Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов. Расчет и конструирование: справочное и научное издание / под общ. ред. В. Е. Старжинского и Е. В. Шалобаева. СПб; Гомель: ИММС НАНБ, 1998. 538 с.
21. Альшиц И. Я., Анисимов Н. Ф., Благов Б. Н. Проектирование деталей из пластмасс: справочник. М.: Машиностроение, 1969. 248 с. (Зубчатые передачи. С. 176–191).
22. Хуго И. [и др.]. Конструкционные пластмассы. Свойства и применение. М.: Машиностроение, 1969. 336 с. (5. Зубчатые передачи. С. 172–205).
23. Основы конструирования изделий из пластмасс / под ред. Э. Бэра. М.: Машиностроение, 1970. 272 с. (Глава 4. С. 74–77).
24. Мирзоев Р. Г. Пластмассовые детали машин и приборов. Л.: Машиностроение, 1971. 368 с. (Глава 2. С. 46–62; С. 62–67).
25. Земляков И. П. Прочность деталей из пластмасс. М.: Машиностроение, 1972. 158 с. (Глава 6. С. 108–154).
26. Мирзоев Р. Г. [и др.]. Основы конструирования и расчета деталей из пластмасс и технологической оснастки для их изготовления. Л.: Машиностроение, 1972. 416 с. (Глава 3. С. 73–87; С. 97–105; С. 105–111).
27. Альшиц И. Я., Благов Б. Н. Проектирование деталей из пластмасс. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 216 с.
28. Erhard G., Stricle E. *Maschinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen*. Band 2. Lager und Antriebs-elemente. Dusseldorf: VDI Verlag, 1978. 311 p. (6. Zahnäder, pp. 127–189).
29. Kolouch J. *Strojní Součásti z plastů*. Praha: SNTL, 1981. 258 p. (4.7. Ozubená kola, pp. 148–168).
30. Старжинский В. Е. [и др.]. Точные пластмассовые детали и технология их получения. Минск: Навука і тэхніка, 1992. 307 с. (Глава 3. С. 134–142).
31. Старжинский В. Е. Зубчатые передачи // Справочник по технологии изделий из пластмасс / под ред. Г. В. Сагалаева [и др.]. М.: Химия, 2000. С. 124–156.
32. Wassermann J. Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit von Schraubradgetrieben der Werkstoffpaarung Stahl/Kunststoff: Diss. zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur. Bochum, 2005. 319 p.
33. Минору Иваи // Пурасутикку сэйкэй гидзюцу. 1988. Т. 5. № 5. С. 10–18. (Пер. с яп. № 11284. Дальневосточное региональное отделение торгово-промышленной палаты СССР. 1991).
34. Масакадзу Накаи // Пурасутикку сэйкэй гидзюцу. 1988. Т. 5. № 5. С. 23–33. (Пер. с яп. № 11285. Дальневосточное региональное отделение торгово-промышленной палаты СССР. 1991).
35. Хиде Гото // Пурасутикку сэйкэй гидзюцу. 1988. Т. 5. № 5. С. 34–40. (Пер. с яп. № 11286. Дальневосточное региональное отделение торгово-промышленной палаты СССР. 1991).
36. Бушимата Тейсукэ // Пурасутикку сэйкэй гидзюцу. 1988. Т. 5. № 5. С. 41–45. (Пер. с яп. № 11287. Дальневосточное региональное отделение торгово-промышленной палаты СССР. 1991).
37. Масудзава Йошики // Пурасутикку сэйкэй гидзюцу. 1988. Т. 5. № 5. С. 46–52. (Пер. с яп. № 11288. Дальневосточное региональное отделение торгово-промышленной палаты СССР. 1991).
38. Крыжановский В. К., Кербер М. Л., Бурлов В. В., Паняматченко А. Д. Производство изделий из полимерных материалов: уч.-справ. пособие. СПб.: Профессия, 2005. 464 с.
39. Освальд Т., Тунг Л. Ш., Грэмман П. Дж. Литье пластмасс под давлением / пер. с англ. под ред. В. А. Брагинского, Е. С. Цобкалло, Г. В. Комарова. СПб.: Профессия, 2006. 512 с.
40. Крыжановский В. К., Бурлов В. В., Паняматченко А. Д., Крыжановская Ю. В. Технические свойства полимерных материалов: справочник. 2-е изд. СПб.: Профессия, 2007. 248 с.
41. Шварц О., Эбелинг Ф. В., Фурт Б. Переработка пластмасс / пер. с нем под ред. А. Д. Поняматченко. 2-е изд. испр. СПб.: Профессия, 2008. 320 с.
42. Николаев А. Ф., Крыжановский В. К. [и др.]. Технология полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2008. 544 с.
43. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
44. Фишер Дж. Усадка и коробление отливок из термопластов: справочник: пер. с англ. СПб.: Профессия, 2009. 424 с.
45. Ложечко Ю. П. Литье под давлением термопластов. СПб.: Профессия, 2010. 224 с.
46. Кербер М. Л., Головкин Г. С., Горбаткина Ю. А. [и др.]. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии / под ред. А. А. Берлина. 3-е изд. доп. и испр., СПб.: Профессия, 2011. 560 с.
47. Пластмассы со специальными свойствами. Сборник научных трудов / под ред. Н. А. Лаврова. СПб.: Профессия, 2011. 344 с.
48. Крыжановский В. К. Технические свойства пластмасс: учебное пособие. СПб.: Профессия, 2014. 256 с.
49. Lee S. C., Huh Y. J., Kim C. Y. and Kwon O. K. Unified Design Method of the Cavity for Injection Molded Spur Gears // Conference proceeding at Antec'98. Atlanta, 1998, pp. 3035–3040.
50. Kleiss R. and Kleiss J. A Practical Guide for Molding Better Plastic Geared Transmissions // Conference proceeding at Antec'98. Atlanta, 1998, pp. 3045–3051.
51. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В., Шилько С. В. [и др.]. Элементы приводов приборов. Расчет, конструирование, технологии / под общ. ред. Ю. М. Плескачевского. Минск: Беларуская навука, 2012. 769 с.
52. Антонюк В. Е. [и др.]. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учебное пособие / под общ. ред. В. Е. Старжинского и М. М. Кане. СПб.: Профессия, 2007. 832 с.
53. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / под общ. ред. В. Б. Альгина и В. Е. Старжинского. Минск: Беларуская навука, 2017. 406 с.
54. Oberle S. The New VDI 2736 Standard for thermoplastic gear wheels. Part 3: Crossed Helical Gears // Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2015, (5–6 October, 2015, Garching, Germany) [Электронный ресурс]. URL: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (Дата обращения 24.02.2018).
55. Merken D. Experimental Assessment of Injection Molded Plastic Spur Gears under Dry Running Conditions // Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2015, (5–6 October, 2015, Garching, Germany) [Электронный ресурс]. URL: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (Дата обращения 24.02.2018).
56. Pogučník A. Accelerating tested method for polymer gears // Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2015, (5–6 October, 2015, Garching, Germany) [Электронный ресурс]. URL: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (Дата обращения 24.02.2018).
57. Beermann S. VDI 2736 – New Guideline – Old Challenges // Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2015, (5–6 October, 2015, Garching, Germany) [Электронный ресурс]. URL: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (Дата обращения 24.02.2018).
58. Schmidt W. From Injection Molded Plastic Gears to Assembled Complex Actuators // Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2015, (5–6 October, 2015, Garching, Germany) [Электронный ресурс]. URL: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (Дата обращения 24.02.2018).
59. Pogučník A., Beermann S. Measuring Permissible Root/Flank Stress of Plastic Gears According to the VDI 2736-4 // International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September 2017, Germany). 145–2294. 12 p.
60. Cathelin J., Janssen R. Material Data for Advanced Plastic Gear Simulation // International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September 2017, Germany). 146–

2294. 11 p.
61. Hasl C. [et al.] Bending Strength of Oil-Lubricated Cylindrical Plastic Gears. Modified Bending Strength Calculation Based on VDI 2736. // International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September 2017, Germany). 155–2294. 12 p.
62. Gierl B. Performance Improvements of Spur Gears Using Internal / External Material Modifications Following VDI 2736 // Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September 2017, Germany) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vdi-wissensforum.de> (Дата обращения 24.02.2018).
63. VDI 2736. Blatt 1. Thermoplastische Zahnräder. Werkstoffe, Werkstoffauswahl, Herstellverfahren, Herstellgenauigkeit. Germany, 2016. 47 p.
64. VDI 2736. Blatt 2. Thermoplastische Zahnräder. Stirnradgetriebe. Tragfähigkeitsberechnung. Germany, 2013. 38 p.
65. VDI 2736. Blatt 3. Thermoplastische Zahnräder. Stirnradgetriebe Paarung Zylinderschnecke Schrägstirnrad Tragfähigkeitsberechnung. Germany, 2012. 28 p.
66. VDI 2736. Blatt 4. Thermoplastische Zahnräder. Ermittlung von Tragfähigkeitskennwerten an Zahnradern. Germany, 2016. 23 p.
67. Star Gear. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stargear.com> (Дата обращения 24.02.2018).
68. KISSsoft [Электронный ресурс]. URL: [www.kisssoft.ag](http://www.kisssoft.ag) (Дата обращения 24.02.2018).
69. ARM Win Machine 8.5 [Электронный ресурс]. URL: [www.sapr.ru](http://www.sapr.ru) (Дата обращения 24.02.2018).
70. Plastics Gearing Technology, Inc. [Электронный ресурс]. URL: [www.abapgt.com](http://www.abapgt.com) (Дата обращения 24.02.2018).
71. LMS Virtual. Lab. Gear Motion [Электронный ресурс]. URL: [www.limsintl.com](http://www.limsintl.com) (Дата обращения 24.02.2018).
72. Indirect Optimization on the Base of Self-Organization (IOSO) [Электронный ресурс]. URL: [www.iosotech.com](http://www.iosotech.com) (Дата обращения 24.02.2018).
73. Kapelevich A. L. Direct Gear Design. Boca Raton: CRC Press, 2013. 300 p.
74. Kapelevich A., Shechtman Yu. Area of Existence of Involute Gears // Power Transmissions'09 (1–2 October 2009, Greece): Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference / Ed. Athanassios Mihailidis. Sofia, 2009, pp. 3–8.
75. Kapelevich A. McNamara T. Plastic Gearing for Small Engine Applications // Proceedings of the SAE International Conference. San Antonio, 2006–32–1038. 7 p.
76. Свидетельство № 370 от 08.12.2011г. о регистрации компьютерной программы «Автоматизированное проектирование цилиндрических зубчатых передач с пластмассовыми колесами и расчета формующего инструмента для изготовления зубчатых колес (Gear Pair)» / Старжинский В. Е.; заявитель ИММС НАН Беларуси. N20110088; заявл. 16.11.2011г.
77. Starzhinsky V. E., Supin V. V., Antonyuk V. E. Design Automation of Gear Drive and Gear Forming Tool // Теория механизмов и машин, 2016. Т. 14. № 27. С. 80–91.
78. Franz Morat Group [Электронный ресурс]. URL: <https://franzmorat.com> (Дата обращения 24.02.2018).
79. Risse & Co. GmbH [Электронный ресурс]. URL: <https://www.risse-warstein.de/de/hochleistungskunststoffe> (Дата обращения 24.02.2018).
80. Juken [Электронный ресурс]. URL: <http://www.jukentech.com/precision-engineering-plastic-products.php>, <http://en.juken.com/> (Дата обращения 24.02.2018).
81. Старжинский В. Е., Свириденко А. И., Кудинов А. Т., Шилько С. В. Металлополимерные зубчатые передачи: этапы становления и развития // Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / под общ. ред. В. Б. Альгина, В. Е. Старжинского. Минск: Беларуская навука, 2017. С. 77–114.
82. Производство изделий из полимерных материалов: учебн. пособие / под общ. ред. В. К. Крыжановского. СПб.: Профессия, 2004. 464 с.
83. Песецкий С. С. [и др.]. Полимерные материалы: исследование, производство, применение // Наука и инновации, 2008. № 3 (61). С. 50–55; № 4 (62). С. 51–54.
84. AGMA 920-A01 Materials for Plastic Gears (AGMA Information Sheet). USA, 2000. 40 p.
85. Sabic [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sabic.com/en>, <https://sfs.sabic.eu/>, <http://www.inpolimer.ru/predpriyatiya/3435/sabik-innovativ-plastiks-rus-sabic-innovative-plastics>. (Дата обращения 24.02.2018).
86. Kanters M., Wissen B, Nickel R. Relevant Tribological Testing Method for High Performance Plastic Gears // Proceedings of International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September 2017, Germany). 2017. 142–2294. 12 p.
87. Wu S-H, Wang F-Y., Ma C-M., Chang W-C., Kuo C-T., Kuan H-C., Chen W. Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Glass Fiber and Carbon Fiber Reinforced Polyamide 6 and Polyamide 6/Clay Nanocomposites // Mater. Lett., 2001, vol. 49, pp. 327–333.
88. Cho J. W., Paul D. R. Nylon 6 Nanocomposites by Melt Compounding // Polymer, 2001, vol. 42, no. 3, pp. 1083–1094.
89. Шилько С. В. [и др.]. Двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно-армированных композитов. Ч. 1 // Трение и износ. 2013. Т. 34. № 1. С. 82–86.
90. Шилько С. В. [и др.]. Двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно-армированных композитов. Ч. 2 // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 1. С. 52–61.
91. Шилько С. В. [и др.]. Расчет параметров армирующего наполнителя при оптимизации фрикционно-механических характеристик композитных зубчатых колес // Теория и практика зубчатых передач–2014: сборн. тр. Междунар. симпозиума (21–23 янв. 2014, г. Ижевск Россия). Ижевск, 2014. С. 115–122.
92. Shil'ko S. V., Starzhinsky V. E. Strain analysis of polymer gears // Proc. of 26<sup>th</sup> Working Meeting on Standardization of Terminology 2016 (4–9 Sep. 2016, Bucharest, Romania). Bucharest, 2016, pp. 57–64.
93. Shil'ko S. V., Starzhinsky V. E., Petrokovets E. M. Methods and Results of Composite Gears Design // Theory and Practice of Gearing and Transmissions: in Honor of Professor Faydor L. Litvin. Chapter 16 / eds. V. Goldfarb, N. Barmina. Switzerland: Springer, 2016. P. 341–368.
94. ТУ РБ 03535279.015–97. Полиэтилен функционализированный ПФ-1. Введ. 1998–04–01.
95. ТУ РБ 03535279.027–97. Полиэтилен функционализированный ПФ-2. Введ. 1998–04–01.
96. Кривогуз Ю. М., Макаренко О. А. Новые типы модификаторов на основе функционализированных смесей полимеров и сополимеров олефинов // Научно-технические проблемы развития производства химических волокон в Беларуси: 3-я Белорусская науч.-практ. конф. (13–15 дек. 2006 г.) / Концерн «Белнефтехим»; редкол.: Б. Э. Геллер [и др.]. Могилев, 2007. С. 341–351.
97. Песецкий С. С., Кривогуз Ю. М. Функционализированные полимеры и сополимеры олефинов и их применение в составе полимерных композитов. Глава 23. // Перспективные материалы и технологии / под ред. В. В. Клубовича. Витебск: ВГТУ, 2013. С. 473–495.
98. Datta S., Zohse D. Y. Polymeric Compatibilizers. Uses and Benefits in Polymer Blends. Munich; Vienna; New York: Hanser Publ., 1996.
99. Jurkowski B., Pesetskii S. S. and Krivoguz Y. M. Functionalization of Olefin Polymer and Copolymer Blends in The Melt // Polyolefin Blends / ed. D. Nwabunma and T. Kyu. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp. 273–308.
100. Mehat N. M., Zakarria N. S. and Kamaruddin Sh. Investigation the Effects of Blending Ratio and Injection Parameters on the Tensile Properties of Glass Fiber-Filled Nylon 66 Composite Gear // Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 548–549, pp. 43–47. doi: 10.4028/548-549.43.
101. Ranjit K. Roy. Design of Experiments Using Taguchi Approach. 16 Steps to Product and Process Improvement. USA: Jon Wiley&Sons, 2001. 600 p.
102. Design of Experiments (DOE) Using the Taguchi Approach 35 pages [Электронный ресурс]. URL: [www.Nutekus.com](http://www.Nutekus.com) (Дата обращения 24.02.2018).
103. Mao K. [et. al.] Experimental Investigation of Polymer Composite Gear Performance // Proceedings of International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September

- 2017, Germany), 2017. 153–2294. 12 p.
104. Tsukamoto N., Mimura H. and Uzuka K. A Study of Polyacetal Gears Filled with Talc // *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineering*, 1997, vol. 63, no. 610, pp. 298–305.
  105. Theberge J. E. How Fillers Improve Plastics // *Machine Design*, 1980, May, pp. 283–287.
  106. Yakut R., Demirci M. T., Düzçükoglu. The Load Capacity of PC/ABS Spur Gears and Investigation of Gear Damage // *Archives of Materials Science and Engineering*, 2009, vol. 40, no. 1, pp. 41–46.
  107. Tsukamoto N., Mimura H. A Study on Polyacetal Gears Filled with Glass Fibers // *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineering*, 1997, vol. 63, no. 614, pp. 298–307.
  108. Mao K. A New Approach for Polymer Composite Gear Design // *Wear*, 2007, vol. 262, no. 3–4, pp. 432–441.
  109. Hooke C. J., Mao K., Walton D. Measurement and Prediction of the Surface Temperature in Polymer Gears and its Relation to Surface Wear // *Journal of Tribology*, 1993, vol. 115, no. 1, pp. 119–124.
  110. Pogučnik A., Tavcar J. An Accelerated Multilevel Test and Design Procedure for Polymer Gears // *Materials and Design*, 2015, vol. 65, no. 8, pp. 961–973.
  111. Pogučnik A., Kalin M. Parameters Influencing the Running-in and Long-Term Tribochemical Behavior of Polyamide (PA) Against Polyacetal (POM) and Steel // *Wear*, 2012, no. 290–291, pp. 140–148.
  112. GLOBAS-Distribution [Электронный ресурс]. URL: <http://globasdistribution.com/oblast-primeneniya-polimernyx-zubchatykh-koles/> (Дата обращения 24.02.2018).
  113. Кудинов А. Т. [и др.]. Взаимосвязь технологической усадки и геометрических параметров литых зубчатых колес из термопластов // *Пластические массы*, 1990. № 3. С. 61–64.
  114. Design and Production of Gears in Acetal Copolymer, Celanese Plastics Co., Network, 1969.
  115. Старжинский В. Е., Осипенко С. А., Кудинов А. Т., Шалобаев Е. В. Экспериментальное исследование технологической точности пластмассовых зубчатых колес // *Вестник машиностроения*. 1997. № 8. С. 11–14.
  116. Кудинов А. Т. Технологическая точность литых пластмассовых зубчатых колес и методы ее повышения: дис. канд. техн. наук.: 05.02.18. Гомель, 1993. 165 с.
  117. Старжинский В. Е., Кудинов А. Т., Осипенко С. А., Ли С. Ч. Анализ методов геометрического расчета параметров формообразующих матриц для пластмассовых зубчатых колес // *Вестник машиностроения*. 1995. № 6. С. 3–7.
  118. Lee S. Ch. A Study on the Design and Manufacturing Technology for Plastic Gears Seoul: Korea Institute of Science and Technology, 1994.
  119. Starzhinsky V. E., Lee S. Ch., Osipenko S. A., Kudinov A. T. PC-aided Design of Injection Molding Tool for Spur and Helical Plastic Gears // *International XXXVIII Machine Parts Departments Conference* (September 8–10, 1997, Bratislava, Gabčíkovo, Slovakia). Bratislava, 1997, pp. 167–171.
  120. Kapelevich A. L., McNamara T. M. Direct Gear Design for Optimal Gear Performance // *SME's Gear Processing and Manufacturing, Clinic*. October 6, 2003. AGMA's Gear EXPO'03 in Columbus, OH. 16 p.
  121. Старжинский В. Е., Кудинов А. Т. О разработке методики расчета точности формообразующего инструмента для литых пластмассовых зубчатых колес // *Вестник машиностроения*. 1985. № 10. С. 38–41.
  122. Старжинский В. Е., Кудинов А. Т., Осипенко С. А. Расчет технологической усадки литых зубчатых колес из термопластов // *Пластические массы*. 1992. № 4. С. 53–55.
  123. Старжинский В. Е., Гоман А. М., Ишин М. Н. Пластмассовые зубчатые колеса: Методика и программа автоматизированного расчета корректировок размеров формообразующих зубчатых матриц // *Вестник национального технического университета «ХПИ»*. Сборник научных трудов. Харьков. 2008. С. 51–60.
  124. Старжинский В. Е., Кудинов А. Т., Осипенко С. А. Перспективы нормирования точности литых зубчатых колес из пластмасс. // *Взаимозаменяемость и точность деталей из пластмасс: материалы VI Ленинградской научно-тех. конф.*, Л.: ЛДНТП, 1987. С. 35–41.
  125. Кудинов А. Т., Старжинский В. Е., Осипенко С. А. Источники погрешностей пластмассовых зубчатых колес, изготавливаемых литьем под давлением и механообработкой // *Проблемы качества механических передач и редукторов. Точность и контроль зубчатых колес и передач / под ред. Б. П. Тимофеева и Е. В. Шалобаева*. Л.: ЛДНТП, 1991. С. 92–93.
  126. Старжинский В. Е., Кудинов А. Т. Влияние литьевой усадки и точности формирующего инструмента на точность пластмассовых зубчатых колес // *Вопросы взаимозаменяемости и точности деталей из пластмасс в свете задач 11-ой пятилетки*. Л.: ЛДНТП, 1981. С. 46–52.
  127. Брагинский В. А. Точное литье изделий из пластмасс. М., 1977. 112 с.
  128. Moulding Manual for Du Pont Minlon and Zytel Resins. Du Pont (Web document, Moulding Manual TRZ 30 – Part 1).
  129. Rosato D., Di Mattia D., Rosato D. Designing with Plastics and Composites. A Handbook, Van Nostrand Reinhold, (1991).
  130. Supplement to Standards and Practices of Plastic Molders, The Society of Plastics Industry (SPI).
  131. Кудинов А. Т., Старжинский В. Е., Песецкий С. С., Гуревич М. Л., Корецкий В. Г. Способы повышения точности массивных зубчатых колес из термопластов / *Пластические массы*. 1988. № 7. С. 27–30.
  132. Дубов К. Х., Шнейдерман М. А. Литьевые формы для деталей из термопластов: каталог-справочник. М.: ЦНИИТЭСтроймаш, 1978. 285 с.
  133. Витгоф Н. Б. Основы конструирования литьевых форм для термопластов. М.: Машиностроение, 1979. 204 с.
  134. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учебное пособие / под общей ред. В. Е. Старжинского и М. М. Кане. Минск: Технопринт, 2003. 766 с.
  135. Дубов К. Х. [и др.]. Технологическая оснастка для переработки термопластов. М.: ЦНИИТЭСтроймаш, 1983. 383 с.
  136. Пантелеев А. П., Шевцов Ю. М., Горячев М. А. Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс. М.: Машиностроение, 1986. 400 с.
  137. Басов Н. И., Брагинский В. А., Казанков Ю. В. Расчет и конструирование формирующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: учебник для ВУЗов. М.: Химия, 1991. 352 с.
  138. Менгес Г., Микаэли В., Морен П. Как делать литьевые формы: пер. с англ. / под ред. В. Г. Дувидзона, Э. Л. Калининца. СПб.: Профессия, 2007. 640 с.
  139. Казмер Д. О. Разработка и конструирование литьевых форм: пер. с англ. / под ред. В. Г. Дувидзона. СПб.: Профессия, 2011. 464 с.
  140. Гастров Г. Конструирование литьевых форм в 130 примерах: пер. с нем. / под ред. А. П. Пантелеева и А. А. Пантелеева. СПб.: Профессия, 2006. 336 с.
  141. EOC Normalien. Standard Mould Making Components. Ludenscheid. G., 1998.
  142. EOC Normalien/THERMOPLAY. Каталог горячеканальных нормализованных элементов пресс-форм. 1998.
  143. АБ Универсал [Электронный ресурс]. URL: <http://abuniversal.ru/company.php>. 2000 (Дата обращения 24.02.2018).
  144. HASCO [Электронный ресурс]: URL: <https://www.hasco.com/hasco/ru/> (Дата обращения 24.02.2018).
  145. Ямагути С. Точность и нагрузочная способность формованных зубчатых колес из АБС-пластика и полиацетала // *Госэйдзюси*. 1968. Т. 16. № 10. С. 633–659.
  146. А. с. 279025 СССР. Пресс-форма для изготовления изделий из пластмасс / С. В. Щербakov, В. Т. Жулего, В. Н. Турко, Э. Я. Коновалов. N 1326018/23-5; Заявл. 24.04.1969; опубл. 21.08.1970, Бюл. 26. 1 с.
  147. А. с. 385735 СССР. Литьевая форма для изготовления изделий из термопластичных материалов / С. В. Щербakov, Н. М. Климашевич, Э. Я. Коновалов, В. И. Сиротенко. N 1619838/23-5; Заявл. 08.02.1971; опубл. 14.06.1973, Бюл. 26. 2 с.
  148. А. с. 259354 СССР. Литьевая форма для изготовления армированных металлом изделий из термопластов / С. В. Щербakov, В. М. Кенько, Э. Я. Коновалов. N 1223491/23-5; Заявл. 11.03.1968; опубл. 12.12.1969, Бюл. 2. 2 с.
  149. А. с. 1281432 СССР. Литьевая форма для изготовления полимерных изделий / Э. Я. Коновалов, С. С. Песецкий,

- А. Т. Кудинов, Б. И. Димент, В. Е. Старжинский, Н. В. Смоленчук. N 3879140/23-05; Заявл. 08.04.1985; опубл. 07.01.1987, Бюл. 1. 2с.
150. А. с. 1256980 СССР. Литвевая форма для изготовления полимерных изделий (ее варианты) / А. Т. Кудинов, С. С. Песецкий, В. Е. Старжинский, Э. Я. Коновалов, Б. И. Димент. N 3882744/23-05; Заявл. 08.04.1985; опубл. 15.09.1986, Бюл. 34. 2 с.
  151. Ямагути С. Размерная точность и рабочие характеристики литья пластмассовых зубчатых колес, наполненных твердыми смазками // Когакуин дойгаку кэнкю хококу. 1969. № 26. С. 11–32.
  152. Computer-aided Analysis Programs: TMconcept®, Plastics & Computer, Milan, Italy [Электронный ресурс]. URL: [www.plastics-computer.it](http://www.plastics-computer.it) (Дата обращения 24.02.2018).
  153. Барвинский И. А., Барвинская И. Е. Компьютерные технологии Moldflow для литья пластмасс. Препринт. 18.05.1999. 12 с.
  154. Медунецкий В. М., Романов Н. А. Компьютерное моделирование и визуализация технологии изготовления нестандартных зубчатых колес из полимерных композиционных материалов // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 5. С. 397–399.
  155. Медунецкий В. М. Обеспечение качественных показателей комбинированных цилиндрических передач. СПб: Политехника, 2002. 160 с.
  156. Медунецкий В. М., Горбунов С. А. Вопросы изготовления малогабаритных зубчатых передач с нестандартными параметрами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2007. Вып. 44. С. 181–185.
  157. Тимофеев Б. П., Фролов Д. А. Расчет геометрических параметров цилиндрических эвольвентных передач с несимметричными зубьями // Теория механизмов и машин. СПб: СПбГПУ, 2005. Т. 3. Вып. 2 (6). С. 15–29.
  158. Конструкционные пластики/Полиацеталь [Электронный ресурс]: URL: <http://www.eldi.com.ua/index.php?route=product/> (Дата обращения 24.02.2018).
  159. Освальд Т., Тунг Л.-Ш., Грэмман П. Дж. Литье пластмасс под давлением: пер. с англ. / под ред. Э. Л. Калиничева. СПб: Профессия, 2006. 712 с.
  160. Полянский А., Зорин С. Конструкция и виды пресс-форм [Электронный ресурс]: URL: [http://www.vzrt.ru/mould\\_design.php](http://www.vzrt.ru/mould_design.php) (Дата обращения 24.02.2018).
  161. Шилько С. В., Рябенко Т. В., Гавриленко С. Л., Шалобаев Е. В. Применение компьютерной механики при подготовке САД моделей для 3D-печати градиентных материалов и изделий // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. докл. Междунар. научно-практ. симп. (24 мая 2017 г.). Минск, 2017. С. 194–207.
  162. Перепелица Ф. А., Шалобаев Е. В., Шилько С. В. Отечественное программное обеспечение для аддитивных технологий // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. докл. Междунар. научно-практ. симп. (24 мая 2017 г.). Минск, 2017. С. 128–135.
  163. VDI 2545. Zahnräder aus Thermoplastischen Kunststoffen. Dusseldorf, 1981. 31 p.
  164. Predki W., Wassermann J. Design and Optimization of Gressed Helical Gears Made from a Combination of Steel and Plastic // Proceedings of the International Conference on Gears (14–16 September 2005). Germany, 2005, pp. 65–75.
  - Thermoplastic Gears]. *Izv. VUZov. Tehnologija legkoj promyshlennosti*, 1960, no. 6, pp. 130–134.
  7. Sache H. Betriebsarten von Kunststoffzahnradern. *Feinwerktechnik*, 1960, vol. 64, no. 3, pp. 98–102.
  8. Acital Resin Gears. *Engineering Materials and Design*, 1962, vol. 5, no. 4, pp. 246–250.
  9. Reichherzer R. Runststoffe in Zahnäder and Getriebebau. *Technica*, 1963, no. 12, pp. 835–838.
  10. Rothe W. Zahnäder aus Kunststoffen. *Leipzig Fachberg*, 1964, vol. 72, no. 8, pp. 306–313.
  11. Vörös I. Tragfähigkeit von Kunststoffzahnäderu mit Wildhaber-Novikov-Verzahnung. *Antriebstechnik*, 1964, no. 7, pp. 251–255.
  12. Belyj V. A., Sviridenok A. I., Scherbakov S. V. *Zubchatye peredachi iz plastmass* [Plastics Gear Drives]. Minsk: Nauka i tehnika Publ., 1965. 248 p.
  13. Ermakov V. A. *Zubchatye kolea iz nemetallicheskih materialov* [Gears Nonmetallic Materials]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1966. 68 p.
  14. Gavrilenko V. A. Moskalev M. A., Ostapenko O. I. *Melkomodul'nye metalopolimernye zubchatye peredachi* [Fine-pitch Gear Drives]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972. 136 p.
  15. Belyj V. A., Starzhinskij V. E., Scherbakov S. V. *Metalopolimernye zubchatye peredachi* [Metal-Polymer Gear Drives]. Minsk: Nauka i Tehnika Publ., 1981. 352 p.
  16. Krause W. *Plastzahnäder*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1985. 159 p.
  17. Clifford E. Adams S. E. *Plastics Gearing*. New York; Basel: Marcel Dekker Publ., 1986. 384 p.
  18. Belchev B., Arnaudov K., Kozlova A. *Zubni predavki s plastmasovi kolela* [Gear Drives of Plastic Gears]. Sofija: Tehnika Publ., 1988. 91 p.
  19. Starzhinskij V. E. [i dr.]. *Plastmassovye zubchatye kolea v peredachah tochnogo priborostroenija* [Plastic Gears in Instrument-Making Gear Drives]. Minsk: Navuka i Tjehnika Publ., 1993. 360 p.
  20. Starzhinskij V. E. [i dr.]. *Plastmassovye zubchatye kolea v mehanizmah priborov. Raschet i konstruirovanie* [Plastic Gears in Instrument Mechanisms. Calculation and Design]. Saint-Petersburg; Gomel: IMMS NANB Publ., 1998. 538 p.
  21. Al'shic I. Ja., Anisimov N. F., Blagov B. N. *Proektirovanie detal' iz plastmass: spravochnik* [Gear Drives/Design of Plastic Parts: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 248 p.
  22. Hugo I. [i dr.]. *Konstrukcionnye plastmassy. Svoystva i primenenie* [Gear Drives/Structural Plastics. Properties and Applications]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 336 p.
  23. *Osnovy konstruirovaniya izdelij iz plastmass* [Application of Plastics for Gears/Basics of Designing Plastic Items]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. 272 p.
  24. Mirzoev R. G. *Plastmassovye detali mashin i priborov* [Plastic Parts of Machines and Devices] Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1971. 368 p.
  25. Zemljakov I. P. *Prochnost' detal' iz plastmass* [Strength of Plastic Parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972. 158 p.
  26. Mirzoev R. G. [i dr.]. *Osnovy konstruirovaniya i rascheta detal' iz plastmass i tehnologicheskoy osnastki dlja ih izgotovlenija* [Basic of Design and Calculation of Plastic Parts and Technological Attachments for Their Producing]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1972. 416 p.
  27. Al'shic I. Ja., Blagov B. N. *Proektirovanie detal' iz plastmass* [Design of Plastic Parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 216 p.
  28. Erhard G. Stricle E. *Maschinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen*. Band 2. Lager und Antriebs-elemente. Dusseldorf: VDI Verlag GmbH, 1978. 311 p.
  29. Kolouch J. *Strojni Součásti z plastú*. Praha: SNTL Publ., 1981. 258 p.
  30. Starzhinskij V. E. [i dr.]. *Tochnye plastmassovye detali i tehnologija ih poluchenija* [Precision Plastic Parts and Technology of Their Making]. Minsk: Navuka i Tjehnika Publ., 1992. 307 p.
  31. Starzhinskij V. E. *Zubchatye peredachi. Spravochnik po tehnologii izdelij iz plastmass*. [Gear Drives. Handbook on Plastic Item Technology]. Moscow: Himija Publ., 2000. pp. 124–156.
  32. Wassermann J. Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit von Schraubradgetrieben der Werkstoffpaarung Stahl/Kunststoff. Diss. zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur. Bochum,

## References

1. Ryzhov K. 100 velikih izobretenij [One Hundred Great Inventions]. Available at: <http://motor-reductor.com/stati> (accessed 24 February 2018).
2. Hall K. W., Alword H. H. Capacity of Nylon Plastic Gears. *Machine Design*, 1956, no. 8, pp. 120–122.
3. Aus Kunststoffen hergestellte Zahnäder. *Technica*, 1956, vol. 5, no. 4, pp. 153–154, 183.
4. Formulae for Nylon Gears. *Practical Plastics*, 1959, no. 6, pp. 19–23, 25.
5. Takanashi S. Zubchatye kolea iz plastmass [Gears of Plastics]. *Purastikku sjejkkej gidzjucu*, 1959, vol. 10, no. 10. pp. 30–40.
6. Bobrovnikov G. A. Novyj metod izgotovlenija zubchatyh kolea iz termoplasticheskih mass [New Method of Manufacturing

2005. 319 p.
33. Minoru Iwai. *Purasutikku sjejkkej gidzjucu*, 1988, vol. 5, no. 5, pp. 10–18.
  34. Masakadzu Nakai. *Purasutikku sjejkkej gidzjucu*, 1988, vol. 5, no. 5, pp. 23–33.
  35. Hideo Goto. *Purasutikku sjejkkej gidzjucu*, 1988, vol. 5, no. 5, pp. 34–40.
  36. Bushimata Tejsuke. *Purasutikku sjejkkej gidzjucu*, 1988, vol. 5, no. 5, pp. 41–45.
  37. Masudzava Joshiki. *Purasutikku sjejkkej gidzjucu*. 1988, vol. 5, no. 5, pp. 46–52.
  38. Kryzhanovskij V. K., Kerber M. L., Burlov V. V., Panimatchenko A. D. *Proizvodstvo izdelij iz polimernih materialov: uch.-sprav. Posobie* [Production of Items of Polymeric Materials: Handbook]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2005. 464 p.
  39. Osval'd T., Tung L. Sh., Grjemman P. Dzh. *Lit'e plastmass pod davleniem* [Injection Molding Handbook]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2006. 512 p.
  40. Kryzhanovskij V. K., Burlov V. V., Panimatchenko A. D., Kryzhanovskaja Ju. V. *Tehnicheskie svojstva polimernih materialov: spravochnik* [Mechanical Properties of Polymeric Materials: Handbook]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2007. 248 p.
  41. Shvarc O., Jebeling F. V., Furt B. *Pererabotka plastmass* [Plastics Processing]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2008. 320 p.
  42. Nikolaev A. F., Kryzhanovskij V. K. [i dr.]. *Tehnologija polimernih materialov* [Technology of Polymeric Materials]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2008. 544 p.
  43. Mihajlin Ju. A. *Konstrukcionnye polimernye kompozicionnye materialy* [Structural Polymeric Composite Materials]. Saint-Petersburg: Nauchnye osnovy i tehnologii Publ., 2008. 822 p.
  44. Fisher Dzh. *Usadka i koroblenie otlivok iz termoplastov: spravochnik* [Handbook of Molded Part Shrinkage and Warp-age]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2009. 424 p.
  45. Lozhechko Ju. P. *Lit'e pod davleniem termoplastov* [Injection Molding of Thermoplastics]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2010. 224 p.
  46. Kerber M. L., Vinogradov V. M., Golovkin G. S., Gorbati-ka Ju. A. [i dr.] *Polimernye kompozicionnye materialy. Struktura. Svojstva. Tehnologii* [Polymeric Composite Materials]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2008. 560 p.
  47. *Plastmassy so special'nymi svojstvami*. [Plastics with Especial Properties]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2011. 344 p.
  48. Kryzhanovskij V. K. *Tehnicheskie svojstva plastmass* [Technical Properties of Plastics]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2014. 256 p.
  49. Lee S. C., Huh Y. J., Kim C. Y. and Kwon O. K. Unified Design Method of the Cavity for Injection Molded Spur Gears. *Conference proceeding at Antec'98*. Atlanta, 1998, pp.3035–3040.
  50. Kleiss R. and Kleiss J. A Practical Guide for Molding Better Plastic/Geared Transmissions. *Conference proceeding at Antec'98*. Atlanta, 1998, pp 3045–3051.
  51. Starzhinskij V. E., Shalobaev E. V., Shil'ko S. V. [i dr.]. *Jelementy privodov priborov. Raschet, konstruirovanie, tehnologii* [Elements of Instrument Drives. Computation, Designing, Technologies]. Minsk: Belaruskaja Navuka Publ., 2012. 769 p.
  52. Antonjuk V. E. [i dr.]. *Tehnologija proizvodstva i metody obespechenija kachestva zubchatyh koles i peredach* [Production Technology and Methods of Providing Gears and Gear Drives Quality. Textbook]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2007. 832 p.
  53. *Zubchatye peredachi i transmissii v Belarusi: proektirovanie, tehnologija, ocenka svojstv* [Gears and Transmissions in Belarus: Design, Technology, Property Estimation]. Minsk: Belaruskaja Navuka Publ., 2017. 406 p.
  54. Oberle S. The New VDI 2736 Standard for Thermoplastic Gear Wheels. Part 3: Crossed Helical Gears. *Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2015 (5–6 October, 2015, Garching, Germany)*. Available at: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (accessed 24 February 2018).
  55. Merken D. Experimental Assessment of Injection Molded Plastic Spur Gears under Dry Running Conditions. *Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2015 (5–6 October, 2015, Garching, Germany)*. Available at: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (accessed 24 February 2018).
  56. Pogučnik A. Accelerating Tested Method for Polymer Gears. *Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2015 (5–6 October, 2015, Garching, Germany)*. Available at: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (accessed 24 February 2018).
  57. Beermann S. VDI 2736 – New Guideline – Old Challenges. *Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2015 (5–6 October, 2015, Garching, Germany)*. Available at: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (accessed 24 February 2018).
  58. Schmidt W. From Injection Molded Plastic Gears to Assem-Bled Complex Actuators. *Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2015 (5–6 October, 2015, Garching, Germany)*. Available at: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (accessed 24 February 2018).
  59. Pogučnik A., Beermann S. Measuring Permissible Root/Flank Stress of Plastic Gears According to the VDI 2736-4. *International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September 2017, Germany)*. 145–2294. 12 p.
  60. Cathelin J., Janssen R. Material Data for Advanced Plastic Gear Simulation. *International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September 2017, Germany)*. 146–2294. 11 p.
  61. Hasl C. [et al.] Bending Strength of Oil-Lubricated Cylindrical Plastic Gears. Modified Bending Strength Calculation Based on VDI 2736. *International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September 2017, Germany)*. 155–2294. 12 p.
  62. Gierl B. Performance Improvements of Spur Gears Using Internal/External Material Modifications Following VDI 2736. *Program of International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September 2017, Germany)*. Available at: [www.vdi.de/plasticgears](http://www.vdi.de/plasticgears) (accessed 24 February 2018).
  63. VDI 2736. Blatt 1. Thermoplastische Zahnräder Werkstoffe, Werkstoffauswahl, Herstellverfahren, Herstellgenauigkeit. Germany, 2016. 47 p.
  64. VDI 2736. Blatt 2. Thermoplastische Zahnräder Stirnradgetriebe Tragfähigkeitsberechnung. Germany, 2013. 38 p.
  65. VDI 2736. Blatt 3. Thermoplastische Zahnräder Stirnradgetriebe Paarung Zylinderschnecke Schrägstirnrad Tragfähigkeitsberechnung. Germany, 2012. 20 p.
  66. VDI 2736. Blatt 4. Thermoplastische Zahnräder Ermittlung von Tragfähigkeitskennwerten an Zahnradern. Germany, 2016. 23 p.
  67. Star Gear. Available at: <http://www.stargear.com> (accessed 24 February 2018).
  68. KISSsoft. Available at: [www.kisssoft.AG](http://www.kisssoft.AG) (accessed 24 February 2018).
  69. ARM Win Machine 8.5. Available at: [www.sapr.ru](http://www.sapr.ru) (accessed 24 February 2018).
  70. Plastics Gearing Technology, Inc. Available at: [www.abapgt.com](http://www.abapgt.com) (accessed 24 February 2018).
  71. LMS Virtual. Lab. Gear Motion. Available at: [www.limsintl.com](http://www.limsintl.com) (accessed 24 February 2018).
  72. Indirect Optimization on the Base of Self-Organization (IOSO). Available at: [www.iosotech.com](http://www.iosotech.com) (accessed 24 February 2018).
  73. Kapelevich A. L. *Direct Gear Design*. Boca Raton: CRC Press, 2013. 300 p.
  74. Kapelevich A., Shechtman Yu. Area of Existence of Involute Gears. *Power Transmissions'09 (1–2 October 2009, Greece): Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference / Ed. Athanassios Mihailidis*. Sofia, 2009, pp. 3–8.
  75. Kapelevich A. McNamara T. Plastic Gearing for Small Engine Applications. *Proceedings of the SAE International Conference*. San Antonio, 2006–32–1038. 7 p.
  76. Svidetel'stvo № 370 ot 08.12.2011g. o registracii komp'juternoj programy «Avtomatizirovanoe proektirovanie cilindricheskikh zubchatyh peredach s plastmassovymi kolesami i rascheta formujshhego instrumenta dlja izgotovlenija zubchatyh koles (Gear Pair)» [Automated Design of Cylindrical Gear Drives with Plastic Gears and Calculating Forming Tools for Gear Manufacturing] avtor: Starzhinskij V.E. Zajavka № s20110088 ot 16.11.2011g. na reg. KP. Zajavitel': IMMS NAN Belarusi.
  77. Starzhinsky V. E., Supin V. V., Antonyuk V. E. Design Automation of Gear Drive and Gear Forming Tool. *Teorija mehanizmov i mashin*, 2016, no. 27, pp. 80–91.
  78. Franz Morat Group. Available at: <https://franz-morat.com> (accessed 24 February 2018).
  79. Risse & Co. GmbH Available at: <https://www.risse->

- warstein.de/de/hochleistungskunststoffe (accessed 24 February 2018).
80. Juken. Available at: <http://www.jukentech.com/precision-engineering-plastic-products.php>, <http://en.juken.com/> (accessed 24 February 2018).
  81. Starzhinskij V. E., Sviridenok A. I., Kudinov A. T., Shil'ko S. V. Metallopolimernye zubchatye peredachi: jetapy stanovlenija i razvitiya [Metal-Polymer Gear Drives: Stages of Establishing and Development] *Zubchatye peredachi i transmissii v Belarusi: proektirovanie, tehnologija, ocenka svojstv* [Gears and Gear Transmissions in Belarus: Design, Technology, Property, Estimation]. Minsk: Belaruskaja navuka Publ., 2017, pp. 77–114.
  82. *Proizvodstvo izdelij iz polimernih materialov: uchebn. posobie* [Production of Items of Polymeric Materials. Textbook]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2004. 464 p.
  83. Peseckij S. S. [i dr.]. Polimernye materialy: issledovanie, proizvodstvo, primenenie [Polymer Materials: Investigation, Production, Application]. *Nauka i Innovacii*, 2008, no. 3, pp. 50–55; no. 4, pp. 51–54.
  84. AGMA 920-A01 Materials for Plastic Gears (AGMA Information Sheet). USA, 2000. 40 p.
  85. Sabic. Available at: <https://www.sabic.com/en>, <https://sfs.sabic.eu/>, <http://www.inpolimer.ru/predpriyatiya/3435/sabik-innoventiv-plastiks-rus-sabic-innovative-plastics>: (accessed 24 February 2018).
  86. Kanters M., Wissen B, Nickel R. Relevant Tribological Testing Method for High Performance Plastic Gears. *Proceedings of International Conference on High Performance Plastic Gears 2017*. Germany, 2017. 142–2294. 12 p.
  87. Wu S-H, Wang F-Y., Ma C-M., Chang W-C., Kuo C-T., Kuan H-C., Chen W. Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Glass Fiber and Carbon Fiber Reinforced Polyamide 6 and Polyamide 6/Clay Nanocomposites. *Mater. Lett.*, 2001, vol. 49, no. 7, pp. 327–333.
  88. Cho J. W., Paul D. R. Nylon 6 Nanocomposites by Meit Compounding. *Polymer*, 2001, no. 3, pp. 1083–1094.
  89. Shil'ko S. V. [i dr.]. Dvuhurovnevij metod rascheta tribosopryazhenij iz dispersno-armirovannykh kompozitov. Ch. 1 [Two-Level Technique of Calculation of Tribojoints from Dispersion-Reinforcing Composites. Part 1]. *Trenie i Iznos* [Friction and Wear], 2013, vol. 34, no. 1, pp. 82–86.
  90. Shil'ko S. V. [i dr.]. Dvuhurovnevij metod rascheta tribosopryazhenij iz dispersno-armirovannykh kompozitov. Ch. 2 [Two-Level Technique of Calculation of Tribojoints from Dispersion-Reinforcing Composites. Part 2] *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2014, vol. 35, no. 1, pp. 52–61.
  91. Shil'ko S. V. [i dr.]. Raschet parametrov armirujushhego napolnitelja pri optimizacii frikcionno-mehaničeskikh harakteristik kompozitnykh zubchatykh koles [Calculation of Reinforcing Filler Parameters at Optimization of Frictional and Mechanical Characteristics of Composite Gears] *Trudy Meždunarodnogo simpoziuma "Teorija i praktika zubchatykh peredach – 2014"* [Proc. Int. Symp. "Theory and Practice of Gear Drives"], Izhevsk, 2014, pp. 115–122.
  92. Shil'ko S. V., Starzhinsky V. E. Strain Analysis of Polymer Gears. *Proc. of 26th "Working Meeting on Standardization of Terminology 2016"*, Bucharest, 2016, pp. 57–64.
  93. Shil'ko S. V., Starzhinsky V. E., Petrokovets E. M. Methods and Results of Composite Gears Design. *Theory and Practice of Gearing and Transmissions*. Switzerland: Springer, 2016, pp. 341–368.
  94. TU RB 03535279.015–97. Polijetilen funkcionalizirovannyj [Polyethylene Functionalized] PF-1.
  95. TU RB 03535279.027–97. Polijetilen funkcionalizirovannyj [Polyethylene Functionalized] PF-2.
  96. Krivoguz Ju. M., Makarenko O. A. Novye tipy modifikatorov na osnove funkcionalizirovannykh smesej polimerov i sopolimerov olefinov [New Types of Modifiers Based on Functionalized Blends of Polymers and Copolymers Polyolefines]. *Trudy 3 Belorusskoj konferencii "Nauchno-tehnicheskie problemy razvitiya proizvodstva himičeskikh volokon v Belarusi"* [Proc. of 3th Belorussian Conf. "Scientific and Engineering Problems of Production Development Chemical Fillers in Belarus]. Mogilev, 2007. pp. 341–351.
  97. Peseckij S. S., Krivoguz Ju. M. Funkcionalizirovannye polimery i sopolimery olefinov i ih primenenie v sostave polimernykh kompozitov [Functionalized Polymers and Copolymers of Polyolefines and Their Application as Part of Polymeric Composites] *Perspektivnye materialy i tehnologii*. Vitebsk: VGTU Publ., 2013, pp. 473–495.
  98. Datta S., Zohse D. Y. *Polymeric Compatibilizers. Uses and Benefits in Polymer Blends*. Munich; Vienna; New York: Hanser Publ., 1996.
  99. Jurkowski B., Pesetskii S. S. and Krivoguz Y. M. Functionalization of Olefin Polymer and Copolymer Blends in the Melt. *Polyolefin Blends* / ed. D. Nwabunma and T. Kyu. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp. 273–308.
  100. Mehat N. M., Zakarria N. S., Kamaruddin Sh. Investigation the Effects of Blending Ratio and Injection Parameters on the Tensile Properties of Glass Fiber-Filled Nylon 66 Composite Gear. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 548–549, pp. 43–47. doi: 10.4028/548-549.43.
  101. Ranjit K. Roy. *Design of Experiments Using Taguchi Approach 16 Steps to Product and Process Improvement*. USA: Jon Wiley&Sons, 2001. 600 p.
  102. Design of Experiments (DOE) Using the Taguchi Approach, 35 p. Available at: [www.Nutekus.com](http://www.Nutekus.com) (accessed 24 February 2018).
  103. Mao K., et. al. Experimental Investigation of Polymer Composite Gear Performance. *Proceedings of International Conference on High Performance Plastic Gears 2017 (13–14 September 2017, Germany)*, 2017, 153–2294. 12 p.
  104. Tsukamoto N., Mimura H., Uzuka K. A Study of Polyacetal Gears Filled with Talc. *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineering*, 1997, vol. 63, no. 610, pp. 298–305.
  105. Theberge J. E. How Fillers Improve Plastics. *Machine Design*, 1980, May, pp. 283–287.
  106. Yakut R., Demirici M. T., Düzcükoglu. The Load Capacity of PC/ABS Spur Gears and Investigation of Gear Damage. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2009, vol. 40, no. 1, pp. 41–46.
  107. Tsukamoto N., Mimura H. A Study on Polyacetal Gears Filled with Glass Fibers. *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineering*, 1997, vol. 63, no. 614, pp. 298–307.
  108. Mao K. A New Approach for Polymer Composite Gear Design. *Wear*, 2007, vol. 262, no. 3–4, pp. 432–441.
  109. Hooke C. J., Mao K., Walton D. Measurement and Prediction of the Surface Temperature in Polymer Gears and Its Relation to Surface Wear. *Journal of Tribology*, 1993, vol. 115, no. 1, pp. 119–124.
  110. Pogučnik A., Tavcar J. An Accelerated Multilevel Test and Design Procedure for Polymer Gears. *Materials and Design*, 2015, vol. 65, no. 8, pp. 961–973.
  111. Pogučnik A., Kalin M. Parameters Influencing the Running-In and Long-Term Tribological Behavior of Polyamide (PA) Against Polyacetal (POM) and Steel. *Wear*, 2012, no. 290–291, pp. 140–148.
  112. GLOBAS-Distribution. Available at: <http://globasdistribution.com/oblast-primeneniya-polimernyx-zubchatykh-koles/> (accessed 24 February 2018).
  113. Kudinov A. T. [i dr.]. Vzaimosvjaz' tehnologičeskoj usadki i geometričeskikh parametrov litykh zubchatykh koles iz termoplastov [Interrelation between the Technological Shrinkage and Geometrical Parameters of Injection Molded Gears of Thermoplastics]. *Plasticheskie massy*, 1990, no. 3, pp. 61–64.
  114. Design and Production of Gears in Acetal Copolymer. Celanese Plastics Co., Network, 1969.
  115. Starzhinskij V. E., Osipenko S. A., Kudinov A. T., Shalobaev E. V. Jeksperimental'noe issledovanie tehnologičeskoj točnosti plastmassovykh zubchatykh koles [Experimental Investigation of Technological Shrinkage of Plastic Gear Technological Accuracy]. *Vestnik mashinostroenija*, 1997, no. 8, pp. 11–14.
  116. Kudinov A. T. Tehnologičeskaja točnost' litykh plastmassovykh zubchatykh koles i metody ee povyšhenija. Dis. kand. tehn. nauk [Technological Accuracy of Injection Molded Plastic Gears and Methods of Their Arizing]. Gomeľ, 1993. 165 p.
  117. Starzhinskij V. E., Kudinov A. T., Osipenko S. A., Li S. Ch. Analiz metodov geometričeskogo rascheta parametrov formobrazujushchih matric dlja plastmassovykh zubchatykh koles [Analysis of Technique of Geometrical Calculation of Shape-Generating Female Die Parameters for Plastic Gears]. *Vestnik mashinostroenija*, 1995, no. 6, pp. 3–7.



118. Lee S. Ch. A Study on the Design and Manufacturing Technology for Plastic Gears. Seoul: Korea Institute of Science and Technology, 1994.
119. Starzhinsky V. E., Lee S. Ch., Osipenko S. A., Kudinov A. T. PC-aided Design of Injection Molding Tool for Spur and Helical Plastic Gears. *International XXXVIII Machine Parts Departments Conference (8–10 September 1997, Bratislava, Gabcikovo, Slovakia)*. Bratislava, 1997, pp. 167–171.
120. Kapelevich A. L., McNamara T. M. Direct Gear Design for Optimal Gear Performance. *SME's Gear Processing and manufacturing. Clinic. October 6, 2003*. AGMA's Gear EXPO'03 in Columbus, OH. 16 p.
121. Starzhinskij V. E., Kudinov A. T. O razrabotke metodiki rascheta tochnosti formoobrazujushhego instrumenta dlja lityh plastmassovyh zubchatykh koles [Calculation of Thermoplastic Gear Processing Shrinkage]. *Vestnik mashinostroenija*, 1985, no. 10, pp. 38–41.
122. Starzhinskij V. E., Kudinov A. T., Osipenko S. A. Raschet tehnologicheskoy usadki lityh zubchatykh koles iz termoplastov [Plastic Gears: Technique and Automated Calculation Software for Updating Dimensions of Shape-Generating Female Dies]. *Plasticheskie massy*, 1992, no. 4, pp. 53–55.
123. Starzhinskij V. E., Goman A. M., Ishin M. N. Plastmassovye zubchatye kolea: Metodika i programma avtomatizirovannogo rascheta korrekcirovok razmerov formoobrazujushhih zubchatykh matric [Technique and Software of Automated Computation of Forming Female Die Corrections of National Technical University "KhPI"]. *Vestnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta, Har'kov*. 2008, pp. 51–60.
124. Starzhinskij V. E., Kudinov A. T., Osipenko S. A. Perspektivy normirovaniya tochnosti lityh zubchatykh koles iz plastmass. [Aspects of accuracy Normalization of Injection Molded Plastic Gears]. *Vzaimozamenyaemost' i tochnost' detaley iz plastmass: Materialy VI Leningradskoj nauchnoteh. konf.* [Interchangeability and Accuracy of Plastic Parts], Leningrad: LDNTP, 1987. pp. 35–41.
125. Kudinov A. T., Starzhinskij V. E., Osipenko S. A. Istochniki pogreshnostej plastmassovyh zubchatykh koles, izgotavlivaemykh lit'em pod davleniem i mehanooobrabočkoj [Possibilities of Accuracy Normalization of Injection Molded Thermoplastic Gears]. *Problemy kachestva mehanicheskikh peredach i reduktorov. Tochnost' i kontrol' zubchatykh koles i peredach*. Leningrad: LDNTP Publ., 1991, pp. 92–93.
126. Starzhinskij V. E., Kudinov A. T. Vliyanie lit'evoy usadki i tochnosti formujushhego instrumenta na tochnost' plastmassovyh zubchatykh koles [Influence of Molding Shrinkage and Accuracy of Forming Tool on Plastic Gear Accuracy]. *Voprosy vzaimozamenyaemosti i tochnosti detaley iz plastmass v svete zadach 11-oy pjatiletki*. Leningrad: LDNTP Publ., 1981, pp. 46–52.
127. Braginskij V. A. *Tochnoe lit'e izdelij iz plastmass* [Precision Molding Plastic Items]. Moscow, 1977. 112 p.
128. Moulding Manual for Du Pont Minlon and Zytel Resins. Du Pont (Web document, Moulding Manual TRZ 30 – Part 1).
129. Rosato D., Di Mattia D., Rosato D. Designing with Plastics and Composites. A Handbook, Van Nostrand Reinhold, 1991.
130. Supplement to Standards and Practices of Plastic Molders, The Society of Plastics Industry (SPI).
131. Kudinov A. T., Starzhinskij V. E., Peseckij S. S., Gurevich M. L., Koreckij V. G. Sposoby povysheniya tochnosti massivnykh zubchatykh koles iz termoplastov. *Plasticheskie massy*, 1988, no. 7, pp. 27–30.
132. Dubov K. H., Shneiderman M. A. *Lit'evye formy dlja detaley iz termoplastov: katalog-spravochnik* [Molding Female Dies for Thermoplastic Parts]. Moscow.: CNIITJeStrojmach Publ., 1978. 285 p.
133. Vitgof N. B. *Osnovy konstruirovaniya lit'evykh form dlja termoplastov* [Basic of Designing Injection Molding Female Dies for Thermoplastics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 204 p.
134. *Tehnologija proizvodstva i metody obespechenija kachestva zubchatykh koles i peredach* [Production Technology and Techniques of Providing Gear and Gear Drive Quality]. Minsk: Tehnoprnt Publ., 2003. 766 p.
135. Dubov K.H., et. al. *Tehnologicheskaja osnastka dlja pererabotki termoplastov* [Technological Attachment for Thermoplastic Processing]. Moscow: CNIITJeStrojmach Publ., 1983. 383 p.
136. Pantelev A. P., Shevcov Ju. M., Gorjachev M. A. *Spravochnik po proektirovaniyu osnastki dlja pererabotki plastmass* [Handbook on Attachment Design for Plastic Processing]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 400 p.
137. Basov N. I., Braginskij V. A., Kazankov Ju. V. *Raschet i konstruirovaniye formujushhego instrumenta dlja izgotovlenija izdelij iz polimernykh materialov* [Calculation and Design of Forming Tool for Item Manufacturing of Polymeric Materials]. Moscow: Himija Publ., 1991. 352 p.
138. Menges G., Mikajeli V., Moren P. *Kak delat' lit'evye formy* [How to Make Injection Molds]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2007. 640 p.
139. Kazmer D. O. *Razrabotka i konstruirovaniye lit'evykh form* [Injection Mold Design Engineering]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2011. 464 p.
140. Gastrov G. *Konstruirovaniye lit'evykh form v 130 primerah* [Design of Molds in 130 Examples]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2006. 336 p.
141. EOS Normalien. Standard Mould Making Components. Ludenscheid. G., 1998.
142. EOC Normalien/THERMOPLAY. Katalog gorjachekanal'nykh normalizovannykh jelementov pressform. 1998.
143. AB Universal. Available at: <http://abuniversal.ru/company.php>. 2000 (accessed 24 February 2018).
144. HASCO Available at: <https://www.hasco.com/hasco/ru/> (accessed 24 February 2018).
145. Jamaguti S. Tochnost' i nagruzochnaja sposobnost' formovannykh zubchatykh koles iz ABS-plastika i poliactalja [Accuracy and Load Capacity of Injection Molded Gears of ABS-Plastic and Polyacetal]. *Gosfej dzjusi*, 1968, vol. 16, no.10, pp. 633–659.
146. Shherbakov S. V., Zhulego V. T., Turko V. N., Konovalov Je. Ja. Press-forma dlja izgotovlenija izdelij iz plastmass [Molding Dies for Manufacturing Plastic Items]. Patent SSSR, no. 279025, 1970.
147. Shherbakov S. V., Klimashevich N. M., Konovalov Je. Ja., Sirotenko V. I. Lit'evaja forma dlja izgotovlenija izdelij iz termoplastichnykh materialov [Molding Dies for Manufacturing Items of Thermoplastic Materials]. Patent SSSR, no. 385735, 1973.
148. Shherbakov S. V., Ken'ko V. M., Konovalov Je. Ja. Lit'evaja forma dlja izgotovlenija armirovannykh metallom izdelij iz termoplastov [Molding Dies for Manufacturing Thermoplastic Items Reinforced by Metal Inserts]. Patent SSSR, no. 259354, 1970.
149. Konovalov Je. Ja., Peseckij S. S., Kudinov A. T., Diment B. I., Starzhinskij V. E., Smolenchukov N. V. Lit'evaja forma dlja izgotovlenija polimernykh izdelij [Molding Dies for Manufacturing Polymeric Items]. Patent SSSR, no. 1281432, 1987.
150. Kudinov A. T., Peseckij S. S., Starzhinskij V. E., Konovalov Je. Ja., Diment B. I. Lit'evaja forma dlja izgotovlenija polimernykh izdelij (ee varianty) [Molding Dies for Manufacturing Polymeric Items hers variants]. Patent SSSR, no. 1256980, 1986.
151. Jamaguti S. Razmernaja tochnost' i rabochie karakteristiki lit'ja plastmassovyh zubchatykh koles, napolnen-nykh tverdymi smazkami [Dimensional Accuracy and Working Characteristics of Injection Molded Plastic Gear Filled by Grease Lubrications]. *Kogakuin dojgaku kjenkju hokoku*, 1969, no. 26. pp. 11–32.
152. Computer-aided analysis programs: TMconcept®, Plastics & Computer, Milan, Italy, [www.plastics-computer.it](http://www.plastics-computer.it)
153. Barvinskij I. A., Barvinskaja I. E. *Komp'juternye tehnologii Moldflow dlja lit'ja plastmass* [Computer Technologies Moldflow for Plastic Injection Molding]. Preprint. 18.05.1999. 12 p.
154. Medunecij V. M., Romanov N. A. Komp'juternoe modelirovanie i vizualizacija tehnologii izgotovlenija nestandartnykh zubchatykh koles iz polimernykh kompozicionnykh materialov [Computer Modelling and Visualization of Manufacturing Technology of Substandard Gears of Polymeric Composite Materials]. *Izv. VUZov. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 397–399.
155. Medunecij V. M. *Obespechenie kachestvennykh pokazatelej kombinirovannykh cilindricheskikh peredach* [Providing Quality Parameters of Combined Cylindrical Gear Drives]. Saint-Petersburg: Politehnika Publ., 2002. 160 p.
156. Medunecij V. M., Gorbunov S. A. Voprosy izgotovlenija malogabaritnykh zubchatykh peredach s nestandartnymi parametrami [Problems of Small-Sized Gear Drive Manufacturing with Substandard Parameters]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnykh tehnologij, mehaniki i optiki*, 2007, vol. 44,

- pp. 181–185.
157. Timofeev B. P., Frolov D. A. Raschet geometricheskikh parametrov cilindricheskikh jevol'ventnykh peredach s nesimmetrichnymi zub'jami [Calculation of Geometrical Parameters of Cylindrical Involute Gear Drives with Asymmetric Teeth]. *Teoriya mehanizmov i mashin*. Saint-Petersburg: SPbGPU Publ., 2005, vol. 3, no. 2 (6), pp. 15–29.
158. Konstrukcionnye plastiki/Poliacetal' Available at: [http://www.eldi.com.ua/index.php?route=product/product&path=62&product\\_id=338](http://www.eldi.com.ua/index.php?route=product/product&path=62&product_id=338) (accessed 24 February 2018).
159. Ossval'd T., Tung L.-Sh., Grjemann P. Dzh. *Lit'e plastmass pod davleniem* [Injection Molding Handbook]. Saint-Petersburg: Professija Publ., 2006. 712 p.
160. Poljanskij A., Zorin S. Konstrukcija i vidy press-form [Constructions and Kinds of Injection Molding Dies]. Available at: [http://www.vzrt.ru/mould\\_design.php](http://www.vzrt.ru/mould_design.php) (accessed 24 February 2018).
161. Shil'ko S. V., Rjabchenko T. V., Gavrilenko S. L., Shalobaev E. V. Primenenie komp'juternoj mehaniki pri podgotovke CAD modelej dlja 3D-pechati gradientnykh materialov i izdelij [Application of Computer Mechanics at Preparation of CAD-models for 3D-Printing Gradient Materials and Items]. *Perspektivy razvitiya additivnykh tehnologij v Respublike Belarus': sb. dokl. Mezhdunar. nauchno-prakt. simp.* [Aspects of Additive Technologies Development in Belarus]. Minsk, 2017, pp. 194–207.
162. Perepelica F. A., Shalobaev E. V., Shil'ko S. V. Otechestvennoe programnoe obespechenie dlja additivnykh tehnologij [Native Software Support for Additive Technologies]. *Perspektivy razvitiya additivnykh tehnologij v Respublike Belarus': sb. dokl. Mezhdunar. nauchno-prakt. simp.* [Aspects of Additive Technologies Development in Belarus]. Minsk, 2017, pp. 128–135.
163. VDI 2545. Zahnräder aus Thermoplastischen Kunststoffen. Dusseldorf, 1981. 31 p.
164. Predki W., Wassermann J. Design and Optimization of Gressed Helical Gears Made from a Combination of Steel and Plastic. *Proceedings of the International Conference on Gears, (14–16 September 2005, Germany)*. 2005, pp. 65–75.

---

Поступила в редакцию 06.06.2018

© В. Е. Старжинский, С. В. Шилько, Е. В. Шалобаев, 2018