

Д.В. Криворучко, д-р техн. наук,  
И.О. Осадчий, Сумы, Украина

## **СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Проведений аналіз останніх досягнень науки в галузі створення зубчастих коліс із застосуванням неметалевих матеріалів, зокрема з композиційних матеріалів на основі вуглепластику. Наведені методи збільшення поверхневої міцності зубів. Розглянуті сучасні виробничі методи виготовлення зубчастих коліс із композиційних матеріалів, проблеми в цій галузі та шляхи їх вирішення.*

*Проведен анализ последних достижений науки в области создания зубчатых колес с применением неметаллических материалов, в частности, из композиционных материалов на основе углепластика. Приведены методы увеличения поверхностной прочности зубьев. Рассмотрены современные производственные методы изготовления зубчатых колес из композиционных материалов, проблемы в этой области и пути их решения.*

*In this paper, the analysis of the latest scientific advances in the field of non-metallic carbon fiber reinforced plastic (CFRP) gears utilization was conducted. Methods of teeth surface strength increasing were characterized. The modern production methods of CFRP gears manufacture were reviewed. Problems of gears manufacture and their solutions were outlined.*

### **Введение**

В последние десятилетия композитные шестерни нашли широкое применение в машиностроении. Внедрение современных композиционных материалов позволяет использовать новые принципы проектирования и изготовления изделий, основанные на том, что материал и изделие создаются одновременно в рамках одного и того же технологического процесса.

В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется комплекс свойств композита, не только отражающий исходные характеристики его компонентов, но и включающий свойства, которыми изолированные компоненты не обладают. В частности, прочность, жёсткость, износостойкость, усталостная прочность, появление этих свойств в композитах связані с гетерогенной структурой, обуславливающей наличие большой поверхности раздела между волокнами и матрицей. Так, наличие границы раздела между армирующими элементами и матрицей существенно повышает трещиностойкость материала.

Современные композиты имеют не только широкий спектр физико-механических свойств, но и способны к направленному их изменению,

например, повышать вязкость разрушения, регулировать жесткость, прочность и другие свойства. Эти возможности расширяются при применении в волокнистых композиционных материалах (ВПКМ) волокон различной природы и геометрии, т. е. при создании гибридных композитов. Кроме того, для данных материалов характерно появление согласованного совместного действия нескольких факторов в одном направлении, так называемого синергетического эффекта.

Совокупность этих факторов содействовала расширению сфер применения ВПКМ. Одним из наиболее перспективных является изготовление композитных шестерен, широко применяющихся в машиностроении. Это связано с уменьшением шума, самосмазывающейся функцией, снижением веса, экономией средств.

Сложности изготовления и механической обработки этих типов деталей машин обусловлены необходимостью высокой прочности, износостойкости и долговечности. Как показывает опыт, даже разрушение одного зуба может привести к выходу из строя всей зубчатой передачи.

Широкое применение пластических масс и композиционных материалов, из которых изготавливают детали устройств и механизмов, в целом является существенной особенностью современного развития техники. Во многих случаях детали из новых материалов полностью заменяют металлические в классическом исполнении. В качестве примера можно привести такие материалы, как слюдоситаллы на основе фторфлогопита, обрабатываемые на стандартном металлорежущем оборудовании с достаточной точностью исполнения [1]. Многие новые неметаллические материалы предназначены для литья и формования. В этих случаях их используют в промышленности в виде порошка или гранул. Таким образом, изготовление зубчатых колёс осуществляют с помощью литья, формования и резания. Следует также отметить, что одной из важнейших особенностей современного периода совершенствования зубчатых передач является использование для изготовления зубчатых звеньев пластических масс и композиционных материалов. К примеру, достаточно широко используются неметаллы для изготовления зубчатых венцов фирмами Parvalux Electric Motors Ltd, ITT Heyne, Ovoid, SF Opperman, Moss Gear Company, Siemens AG [2].

**Целью настоящей работы** является исследование современных достижений в области производства зубчатых колес с применением неметаллических материалов и, в частности, изготовленных на основе волокнистых полимерных композиционных материалов; выявление основных проблем, препятствующих их широкому внедрению в современных машинах,

и поиск основных необходимых направлений исследований в области изготовления зубчатых колес из композиционных материалов.

## **1. Способы производства зубчатых колес из неметаллических материалов**

Существует несколько методов изготовления зубчатых колес из полимеров[3]:

1. Литьё шестерён под давлением из пластмасс.

Достоинствами этого метода являются высокая прочность, постоянство размеров и относительная дешевизна получаемых изделий.

2. Изготовление шестерни механообработкой из капролона.

К достоинствам этого метода следует отнести высокую прочность и точность зубчатых колес. Однако наряду с вышеупомянутыми достоинствами существуют и недостатки, обусловленные быстрым накоплением погрешностей установки и базирования, как следствие брак, при мелкосерийном производстве.

3. Метод быстрого прототипирования.

Однозначным достоинством данного метода является высокая скорость изготовления изделий, которая, однако, перекрывается рядом недостатков. Среди них низкая прочность и неремонтпригодность исключают возможность применения этого метода при изготовлении высоконагруженных деталей.

Основные проблемы зубчатых колес из чистых полимерных материалов: низкая геометрическая точность, гигроскопичность, недостаточная прочность – могут быть решены заменой их на шестерни, изготовленные с применением ВПКМ. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются угле- и стеклопластики.

Проведенный патентный поиск показал, что известным способом изготовления зубчатых колес из композиционных материалов является формование в закрытых формах [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Способы формовки направлены на укладку волокон в тело зуба так, чтобы тот выдерживал максимальную нагрузку.

## **2. Основные направления повышения работоспособности зубчатых колес из композиционных материалов**

Несмотря на более высокие прочностные свойства по сравнению с полимерными шестернями, при использовании шестерен из ВПКМ существуют ограничивающие факторы: температурное разрушение матрицы ВПКМ, низкая ударная прочность и труднообрабатываемость [12]. Над каждой из этих проблем ведется активная работа.

К. Мао в своем исследовании показал, что повышение износа зубчатых колес из ВПКМ зависит от температуры трущихся поверхностей шестерен. Выдвинуто предположение, что износ повышается из-за резкого роста температуры в зоне контакта, что приводит к разрушению связки в композите [13].

Группа исследователей в составе М. Kurokawa, Y. Uchiyama предложили повысить прочность зубчатых колес армированием нанотрубками. Практическая реализация состоит в том, что методом литья под давлением была получена заготовка из композита, которую впоследствии поддавали механической обработке, а обработка была проведена методом зубофрезерования [14].

Существуют методы нанесения покрытий на поверхность зуба. Результаты показывают, что политетрафторэтилен (ПТФЭ,PTFE) способствует наибольшему снижению сил трения [15], а отказ состоит преимущественно в отслоении покрытия и абразивном износе.

Практикуется несколько методов комбинирования металлических материалов с композитами при изготовлении зубчатых колес в зависимости от предъявляемых к конструкции требований:

- зубчатый венец, диск и ступицу выполняют полностью из композита или пластмассы;
- зубчатый венец изготавливают из неметаллов, а диск и ступицу - из металлов и их сплавов;
- зубчатый венец - из металла, а другие элементы зубчатого колеса в различных комбинациях (сочетаниях) - из пластмасс и композитов [16].

Композиционные материалы, армированные углеродными волокнами, в зависимости от типа матрицы делятся на:

- армированные пластмассы;
- армированные металлы.

Рассмотрим их особенности на примере широко применяемых на практике углепластиков. Среди всех армирующих волокон только арамидные волокна имеют плотность, меньшую плотности углеродных волокон. Но высокопрочные углеродные волокна прочнее арамидных, а высокомодульные углеродные волокна имеют модуль упругости, близкий к модулю упругости борных волокон [17, 18]. Поэтому именно углеродные волокна нашли широкое применение в конструкциях, которые должны иметь ограниченный вес. Среди всех армированных пластмасс углепластики обладают наиболее высокими стойкостью к усталостным испытаниям и долговечностью.

Углепластики имеют очень низкий коэффициент линейного расширения и оказываются наиболее подходящими материалами для конструирования зубчатых колес и других высоконагруженных конструкций.

Причины выхода из строя зубчатых колес из композиционных материалов: трение, износ, температурное разрушение.

### **3. Проблема трения в паре зубчатых колес**

Этим вопросом активно занимаются ученые из Японии, такие, как K.D. Dearn, Y. K. Chen. Ими проводилось изучение трения и износа в области вершины зубьев (рис. 1) при переходе от качения к скольжению, что оказывает существенное влияние на долговечность полимера, использованного в зубчатом колесе. Исследуется материал полиэфирэфиркетон (ПЭЭК, РЕЭК), для упрощения понимания процессов применяют два трущихся диска [19, 20]. Наблюдаемые механизмы разрушения были связаны со структурой контактных поверхностей, а также включено плавление поверхности и контактной усталости.

Также ученые определили, что шестерни из (РЕЭК) способны работать на низких коэффициентах скольжения при низких и высоких нагрузках. Их работоспособность уменьшается с увеличением коэффициента скольжения.

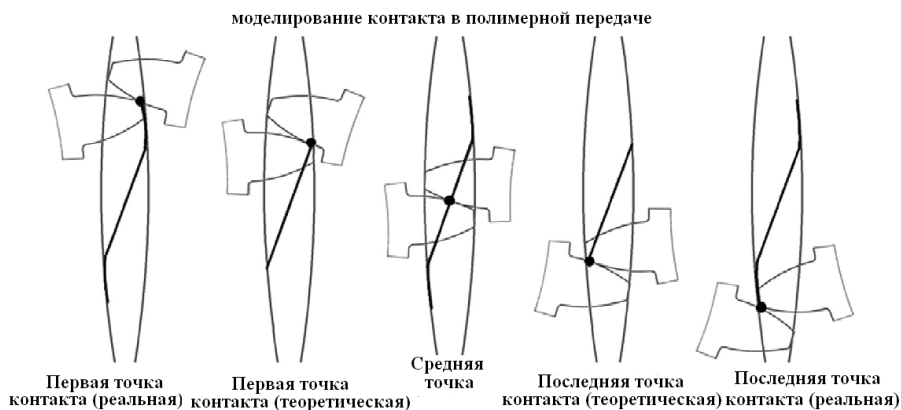


Рисунок 1 – Трение при переходе от качения к скольжению в паре зубчатых колес из композита [19]

N.A Wright, S.N Kukureka свою работу направили на симуляцию контактных условий во время переключения скоростей хода, так как, по утверждению автора, до этого износостойкость полимерной матрицы и композитов не изучалась систематически [21, 22].

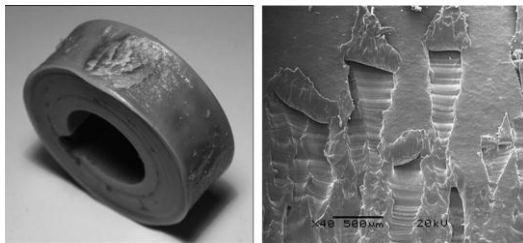


Рисунок 2 – Диск из композита после испытаний на трение [21]

Методы испытаний на износ сравниваются, включая прямое тестирование колеса и тестирование диска (рис. 2), вместе с электронным измерением, измерением потери веса и прямыми измерениями. Представленный новый метод, характеризующий износ передач, касается реальных условий контакта и износа зубьев. Тема и методы данных исследований явно перекликаются с описанным выше.

#### 4. Износ зубчатых колес, изучение температурных эффектов

Ученые из Великобритании К. Мао, W. Li, С. J. Hooke, D. Walton проводят исследования, направленные на изучение термических эффектов в зоне контакта зубьев и износа, при работе зубчатой пары из композиционного материала [23, 24]. Материал тестируемых шестерен – армированный стеклопластик. Была определена зависимость между температурой шестерни и передаваемой нагрузкой и износом, получены сложные нелинейные зависимости интенсивности износа в микрометрах крутящим моментом и критической температурой на поверхности зубьев (рис. 3).

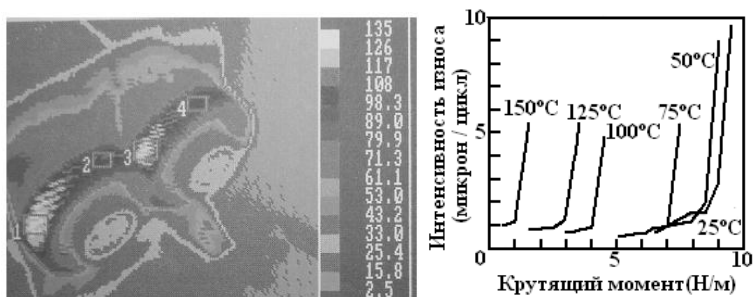


Рисунок 3 – Влияние различных факторов на износ зубчатых колес из композиционных материалов [23]

В работе М. Tsai [25, 26] рассматривались возможности применения пары материалов нейлон – ацетал, исследовались величина и геометрия износа поверхности в зависимости от нагрузки и выбора материала ведущей и ведомой шестерен в паре нейлон – ацетал. Ученый сделал вывод о высокой стойкости передачи с использованием ведущего зубчатого колеса из ацетала и разработал рекомендации по минимизации износа рабочих поверхностей зубчатых колес. Были установлены зависимости между износом зубчатых колес и количеством рабочих циклов. Изучен характер повреждений поверхности эвольвентного профиля зуба (рис. 4).

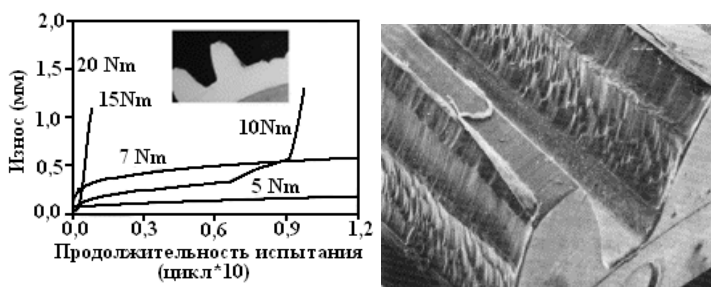


Рисунок 4 – Зависимость износа от нагрузки при динамическом испытании [25]

Вопросом термических эффектов в зубчатых передачах также занимались Е. Letzelter, М. Guingand, J. Vaujany, Р. Schlosser. Ими был предложен метод, основанный на применении инфракрасной камеры, позволяющей записывать тепловой режим, а также направление распространения теплового потока как функцию времени [27, 28].

S.Yousef изучал механизм износа зубчатых колес из полимерных материалов с добавлением нанотрубок. Модификация материала шестерен нанотрубками карбона позволила получить композит с физико-механическими свойствами в полтора раза выше, чем немодифицированный материал. Практическая реализация состояла в том, что методом литья под давлением была получена заготовка, которую впоследствии поддавали механической обработке, зубчатый венец был получен методом зубофрезерования.

Результаты выявили, что сопротивление износу повышается с добавлением нанотрубок. Прочность, модуль упругости и жесткость также увеличиваются, в то время как твердость не меняется.

Похожее направление исследований ведут ученые из Индии S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy. На сегодняшний день активно проводятся исследования по модификации ВПКМ и их структуры путем сопоставления результатов моделирования и натуральных лабораторных исследований,

направленных на прогнозирование влияния ориентации волокон в ВПКМ, при изготовлении заготовок методом литья под давлением [29]. Большое количество работ посвящено вопросам прогнозирования и предотвращения усадки материала при остывании после литья.

Исследования показали, что несогласованность волокон по сечению зубьев деформирует толщину зуба и увеличивается погрешность шага, что приводит к отклонениям от проектных значений точности зубчатой передачи (рис. 5).

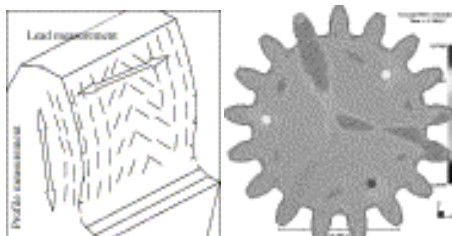


Рисунок 5 – Деформация зуба при неравномерном расположении волокон композита [29]

По результатам изучения усадки полимерного материала после литья была установлена взаимосвязь между усадкой и условиями спекания [29, 30]. Рассматривались микроструктура материала и физико-механические свойства полученного композита. Приведена сравнительная характеристика получаемой микротвердости в зависимости от метода спекания – под вакуумом или под давлением воздуха.

### **Выводы**

В результате проведенного анализа современных достижений в области изготовления зубчатых колес из неметаллических материалов можно сделать вывод, что преимущественными методами производства являются: литьё под давлением, изготовление шестерни механообработкой и метод быстрого прототипирования. Преимущества перед металлическими шестернями: уменьшение шума, самосмазывающаяся функция, снижение веса, экономия средств. Основные исследования направлены на решение таких проблем шестерен из ВПКМ, как температурное разрушение матрицы ВПКМ, низкая ударная прочность и труднообрабатываемость. Анализ зарубежных публикаций показал актуальность темы. По вопросу изготовления зубчатых колес из композиционных материалов ведутся активные научные изыскания во всех странах мира. Главное направление – это замена пластиков композиционными материалами. Важную роль в исследованиях занимает



вопрос изучения трения и износа в паре зубчатых колес, так как трение неметаллических материалов имеет иную природу, нежели трение металлов. Из-за низкой плотности и высокого модуля упругости зубчатые колеса из композиционных материалов имеют собственные высокие частоты, что дает возможность применения их в высокоскоростных передачах. Современной тенденцией является комбинирование металлических и композитных частей зубчатого колеса. В результате анализа патентов можно сделать вывод, что ведется активная работа над методами формовки зубчатых колес из композиционных материалов. Несмотря на изобилие исследований в этой области, вопрос механической обработки зубчатых колес из композиционных материалов остается недостаточно изученным. Такие важные вопросы, как подбор методов и режимов обработки, остаются нераскрытыми.

**Список использованных источников:** 1. *Ричардсон М.* Промышленные полимерные композиционные материалы / Под ред. *П.Г. Бабаевского*. – М. : Химия, 1977. – 472 с. 2. ГОСТ 6168:1987. Specification for nonmetallic spur gears. ; Введ. 31.03.1987. – London, 1987. – 5 с. 3. *Рудой Б. Н.* Композиты. – М: Московский рабочий, 1976. – 144 с. 4. Способ изготовления зубчатых колес из слоистых пластиков : пат. 630083 СССР: МПК<sup>2</sup> В 29 D 15/00, В 29 С 17/00 / *Цулая С.И.*; заявитель и патентообладатель Специальное конструкторское бюро по проектированию приборов и средств автоматизации. – № 2405748/23-05 ; заявл. 13.09.76 ; опубл. 30.10.78, Бюл. № 40. 5. Способ изготовления зубчатых колес из композиционных полимерных материалов: пат. 766877 СССР: МПК<sup>3</sup> В 29 D 15/00/ *Пелех Б.Л., Колюк М.Д., Фикташ М.Д., Сенив П.Н.*; заявитель и патентообладатель Львовский филиал математической физики Института математики АН Украинской ССР. – № 2625158/23-05; заявл. 08.06.78; опубл. 30.09.80; Бюл. № 36. 6. Пресс-форма для изготовления зубчатых колес из композиционных полимерных материалов: пат. 766877 СССР: МПК<sup>3</sup> В 29 D 15/00/ *Пелех Б.Л., Колюк Е.А., Олейник И.П., Кошелев В.И., Колесник Э.С.*; заявитель и патентообладатель Хмельницкий технологический институт бытового обслуживания. – № 2723995/23-05; заявл. 12.02.79; опубл. 23.04.81; Бюл. № 15. 7. Способ изготовления зубчатых колес из композиционных материалов : пат. 942998 СССР: МПК<sup>3</sup> В 29 D 15/00, В 29 G 1/00/ *Пелех Б.Л., Колюк Е.А., Корниенко А.А., Кошелев В.И., Марчук М.В., Олейник И.П.*; заявитель и патентообладатель Хмельницкий технологический институт бытового обслуживания. – № 2958745/23-05; заявл. 10.07.80; опубл. 15.07.82; Бюл. № 26. 8. Способ изготовления зубчатых колес из армированных полимерных материалов: пат. 1121146 СССР: МПК<sup>3</sup> В 29 D 15/00/*Горбунов А.В., Спорягин Э.А., Горбунов В.А.* ; заявитель и патентообладатель Днепропетровский ордена Трудового Красного Знамени химико-технологический институт им. Ф.Э. Дзержинского. – № 3561337/23-05 заявл. 09.03.83; опубл. 30.10.84; Бюл. № 40. 9. Способ изготовления полимерных материалов зубчатых колес: пат. 531954 СССР: МПК<sup>2</sup> F 16 H 55/04/ *Коновалов Э.Я., Асадчев А.С., Михневич А.С.*; заявитель и патентообладатель Институт механики металлополимерных систем АН Белорусской ССР. – № 1898358/28; заявл. 27.03.73; опубл. 15.10.76; Бюл. № 38. 10. Способ изготовления комбинированных зубчатых колес: пат. 1328225 СССР: МПК В 29 D 15/00/ *Цылаков О.Г.*; заявитель и патентообладатель Красногорский механический завод. – №189282/23-5; заявл. 09.10.67; опубл. 23.08.72; Бюл. № 25. 11. Способ изготовления зубчатых колес из композиционного материала и его конструкции: пат. 348372 СССР: МПК В 29 D 15/00/ *Гуркин Ю.И.*; заявитель и патентообладатель Красногорский механический завод. – №3808288/23-5; заявл. 04.10.84; опубл. 07.08.87; Бюл. № 29. 11. *Андреева А. В.* Основы физикохимии и технологии композитов. – М: ИПРЖР, 2001. – 192 с. 12. *Mao K.* A new approach for polymer composite gear design // *Wear.* – 2007. -№ 262. – С. 432-441. 13. *Breeds A., Kukureka S.* и др. Wear behaviour of acetal gears // *Wear.* – 1993. – Вып. 166, –№ 1. – С. 85-89. 14. *Hooke S. 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. – Вып. 115, – № 1. – С. 119 - 124. **15.** Любин, Д. М. Справочник по композиционным материалам: в 2 т. / под ред. -М.: Машиностроение, 1988. –Т.2. – 584 с. **16.** Скюдра А. М., Булаас Ф. Я. Прочность армированных пластиков М: Химия, 1982. – 216 с. **17.** Mao K. The Performance of Dry Running Non-metallic Gears : Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Birmingham, 1993. **18.** Mohan N., Senthilvelan S. Preliminary bending fatigue performance evaluation of asymmetric composite gears // Mechanism and Machine Theory. – 2014. – № 78. – С. 92-104. **19.** Walton D., Shi Y. A comparison of ratings for plastic gears // Proc. Instit.Mech. Eng. -1989. - № 203. – С. 31-38. **20.** Wright N.A. Kukureka S.N. Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears // Wear. – 2001.– № 251. – С. 1567–1578. **21.** Letzelter E., Guingand M. A new experimental approach for measuring thermal behaviour in the case of nylon 6/6 cylindrical gears // Polymer Testing. – 2010. – № 29. – С. 1041-1051. **22.** Senthilvelan S., Gnanamoorthy R. Damping characteristics of unreinforced, glass and carbon fiber reinforced nylon 6/6 spur gears // Polymer Testing. – 2006. № 25. – С.56-62. **23.** Lin A., Kuang J. Dynamic interaction between contact loads and tooth wear of engaged plastic gear pairs // Int. J. of Mechanical Science. – 2007. – № 50. – С. 205-213. **24.** Dearn K.D. Hoskins T.J., Petrov D.G., Applications of dry film lubricants for polymer gears // Wear. – 2013. № 15. – С. 99-108. **25.** Tsai M. H., Tsai Y. C. A method for calculating static transmission errors of plastic spur gears using FEM evaluation // Finite Element Analysis Design des. – 1997. – № 27. – С. 345-357. **26.** Vijayarangan S., Ganesan N. Stress analysis of composite spur gear using the finite element approach // Computers & Structures. – 1993. № 46. – С.869-785. **27.** Kurokawa M., Uchiyama Y. Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone // Tribology International. – 1999. – № 32. – С. 491-497. **28.** Hayretin D. Study on development of polyamide gears for improvement of load-carrying capacity // Tribology International. – 2009. – № 42. – С. 1146-1153. **29.** Kukureka S.N., Hooke S. J. The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact // Tribology International. – 1999. – № 32. – С. 107-116. **30.** Hakimian E., Sulong A. Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method // Materials & Design. – 2012. – № 42. – С 62-71.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Richardson M. Promyshlennye polimernye kompozicionnye materialy/Pod red. P. G. Babaevskogo. – М.: Himija, 1977. - 472 с. **2.** GOST 6168:1987. Specification for nonmetallic spur gears. ; Vved. 31.03.1987. - London, 1987. - 5 с. **3.** Rudoj B. N. Kompozitij. -M: Moskovskij rabochij, 1976. - 144 с. **4.** Sposob izgotovlenija zubchatyh koles iz sloistyh plastikov : pat. 630083 SSSR: MPK2 V 29 D 15/00, B 29 C 17/00 / Culaja S. I. ; zajavitel' i patentoobladatel' Special'noe konstruktorskoe bjuro po proektirovaniju priborov i sredstv avtomatizacii. - № 2405748/23-05 ; zajavl. 13.09.76 ; opubl. 30.10.78, Bjul. № 40. **5.** Sposob izgotovlenija zubchatyh koles iz kompozicionnyh polimernyh materialov : pat. 766877 SSSR: MPK3 V 29 D 15/00 / Peleh B. L., Konjuk M. D., Fiktash M. D., Seniv P. N. ; zajavitel' i patentoobladatel' L'vovskij filial matematicheskoj fiziki Instituta matematiki AN Ukrainskoj SSR. - № 2625158/23-05 ; zajavl. 08.06.78 ; opubl. 30.09.80 ; Bjul. № 36. **6.** Press-forma dlja izgotovlenija zubchatyh koles iz kompozicionnyh polimernyh materialov : pat. 766877 SSSR: MPK3 V 29 D 15/00 / Peleh B.L., Konjuk E.A., Olejnik I.P., Koshelev V.I., Kolesnik Je.S.; zajavitel' i patentoobladatel' Hmel'nickij tehnologicheskij institut bytovogo obsluzhivanija. - № 2723995/23-05 ; zajavl. 12.02.79 ; opubl. 23.04.81; Bjul. № 15. **7.** Sposob izgotovlenija zubchatyh koles iz kompozicionnyh materialov: pat. 942998 SSSR : MPK3 V 29 D 15/00, V 29 G 1/00 / Peleh B.L., Konjuk E.A., Kormienko A.A., Koshelev V.I., Marchuk M.V., Olejnik I.P.; zajavitel' i patentoobladatel' Hmel'nickij tehnologicheskij institut bytovogo obsluzhivanija. - № 2958745/23-05; zajavl. 10.07.80; opubl. 15.07.82; Bjul. № 26. **8.** Sposob izgotovlenija zubchatyh koles iz armirovannyh polimernyh materialov : pat. 1121146 SSSR : MPK3 V 29 D 15/00 /Gorbunov A. V., Sporjagin Je. A., Gorbunov V. A. ; zajavitel' i patentoobladatel' Dnepropetrovskij ordena Trudovogo Krasnogo Znamenii himiko– tehnologicheskij institut im. F. Dzerzhinskogo. - № 3561337/23-05 javl. 09.03.83 ; opubl. 30.10.84; Bjul. № 40. **9.** Sposob izgotovlenija polimernyh materialov zubchatyh koles : pat. 531954 SSSR: MPK2 F 16 H 55/04 / Konovalov Je. Ja., Asadchev A. S., Mihnevich A. S.; zajavitel' i patentoobladatel' Institut mehaniki metallopolimernyh sistem AN Belorusskoj SSR. - № 1898358/28; zajavl. 27.03.73; opubl. 15.10.76; Bjul. № 38.

- 10.** Sposob izgotovlenija kombinirovannyh zubchatyh koles : pat. 1328225 SSSR: MPK B 29 D 15/00 / Cypakov O. G.; zajavitel' i patentoobladatel' Krasnogorskij mehanicheskij zavod. - №189282/23-5; zajavl. 09.10.67; opubl. 23.08.72; Bjul. № 25. **11.** Sposob izgotovlenija zubchatyh koles iz kompozicionnogo materiala i ego konstrukcii : pat. 348372 SSSR : MPK B 29 D 15/00 / Gurkin Ju. I.; zajavitel' i patentoobladatel' Krasnogorskij mehanicheskij zavod. -№3808288/23-5; zajavl. 04.10.84 ; opubl. 07.08.87 ; Bjul. № 29. **11.** Andreeva A.V. Osnovy fizikohimi i tehnologii kompozitov. - M: IPRZhR, 2001. - 192 c. **12.** Mao K. A new approach for polymer composite gear design // Wear. - 2007. - № 262. - C. 432 - 441. **13.** Breeds A., Kukureka S. i dr. Wear behaviour of acetal gears // Wear. - 1993. - Vyp. 166, -№ 1. - C. 85- 89. **14.** Hooke S.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. - Vyp. 115, -№ 1. - C. 119 - 124. **15.** Ljubin.D. M. Spravochnik po kompozicionnym materialam: v 2 t. / pod red. -M.: Mashinostroenie, 1988. -T.2. - 584 c. **16.** Skudra A.M., Bulavs F.Ja. Prochnost' armirovannyh plastikov M: Himija, 1982. - 216 c. **17.** Mao K. The Performance of Dry Running Non-metallic Gears : Dis. ... kand. tehn. nauk : 05.03.01. - Birmingham, 1993. **18.** Mohan N., Senthilvelan S. Preliminary bending fatigue performance evaluation of asymmetric composite gears // Mechanism and Machine Theory. – 2014. - № 78. – S. 92–104. **19.** Walton D., Shi Y. A comparison of ratings for plastic gears // Proc. Instit.Mech. Eng. -1989. - № 203. - C. 31 - 38. **20.** Wright N.A. Kukureka S.N. Wear testing and measurement techniques for polymer composite gears // Wear. – 2001.- № 251. – S. 1567–1578. **21.** Letzelter E., Guingand M. A new experimental approach for measuring thermal behaviour in the case of nylon 6/6 cylindrical gears // Polymer Testing. - 2010. - № 29. - C. 1041- 1051. **22.** Senthilvelan S., Gnanamoorthy R. Damping characteristics of unreinforced, glass and carbon fiber reinforced nylon 6/6 spur gears // Polymer Testing. - 2006. № 25. – S.56-62. **23.** Lin A., Kuang J. Dynamic interaction between contact loads and tooth wear of engaged plastic gear pairs // Int. J. of Mechanical Science. - 2007. - № 50. - C. 205 - 213. **24.** Dearn K.D. Hoskins T.J., Petrov D.G., Applications of dry film lubricants for polymer gears // Wear. - 2013. № 15. – S. 99 - 108. **25.** Tsai M.H., Tsai Y.C. A method for calculating static transmission errors of plastic spur gears using FEM evaluation // Finite Element Analysis Design des. - 1997. -№ 27. - C. 345 - 357. **26.** Vijayarangan S., Ganesan N. Stress analysis of composite spur gear using the finite element approach // Computers & Structures. - 1993. № 46. – S.869 - 785. **27.** Kurokawa M., Uchiyama Y. Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone // Tribology International. - 1999. - № 32. - C. 491 - 497. **28.** Hayrettin D. Study on development of polyamide gears for improvement of load-carrying capacity // Tribology International. - 2009. - № 42. – S. 1146 - 1153. **29.** Kukureka S. N., Hooke S. J. The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact // Tribology International. - 1999. -№ 32. - C. 107 - 116. **30.** Hakimian E., Sulong A. Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method // Materials & Design. - 2012. - № 42. – S 62 - 71.

*Поступила в редколлегию 14.05.2014*