



## Интегрированная технология изготовления зубчатых колес из волокнистых полимерных композиционных материалов

И. О. Осадчий<sup>1)</sup>, Д. В. Криворучко<sup>2)</sup>, И. С. Родин<sup>3)</sup>

<sup>1), 2), 3)</sup> Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007

### Article info:

Paper received:

09 December 2014

The final version of the paper received:

26 December 2014

Paper accepted online:

08 January 2015

### Correspondent Author's Address:

<sup>1)</sup> osadchiy-igor@yandex.ru

<sup>2)</sup> dmytro.kryvoruchko@gmail.com

<sup>3)</sup> rodin-illia@yandex.ru

Зубчатые передачи являются неотъемлемой частью многих механизмов и машин. Появление новых композиционных материалов дает толчок увеличению нагрузочной способности зубчатых передач и снижению их массы. Целью настоящей работы является разработка интегрированной технологии изготовления зубчатых колес (ЗК) с применением волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ). Анализ литературы выявил только отдельные разрозненные исследования в этой области, посвященные разработке способов повышения работоспособности ЗК. Технологическая наследственность при изготовлении зубчатых колес из ВПКМ значительно сильнее, и поэтому влияние этапов технологического процесса должно быть обязательно принято во внимание при его проектировании. Это позволит при оптимизации схемы укладки армирующих волокон учесть не только необходимость обеспечения их ориентации в направлении наибольших нагрузок, но и минимизировать их повреждения при последующей обработке резанием в случае получения колес высокой степени точности. В работе показано, что нагрузочная способность ЗК, выполненных из углепластика, находится на уровне нагрузочной способности ЗК из других неметаллических материалов, однако только у углепластиковых ЗК есть большой резерв повышения нагрузочной способности за счет оптимизации схем укладки волокон и технологии изготовления, который еще не исчерпан.

**Ключевые слова:** интегрированная технология, волокнистый полимерный композиционный материал, механическая обработка, зубчатое колесо, волокно.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Зубчатые передачи являются неотъемлемой частью многих механизмов и машин. Они входят в конструкции большинства металлообрабатывающих станков, пресового оборудования, транспортных машин, энергетических установок, приборов и многих других изделий.

Снижение массы механизмов является одним из приоритетных направлений развития современного машиностроения. Новые конструктивные материалы позволяют повысить энергоэффективность машин и механизмов. Уменьшение массы узлов без потери прочности и надежности может быть достигнуто за счет применения современных волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ). Применение таких материалов в механических передачах позволяет снизить динамические эффекты и нагрузки на подшипники при их работе. ВПКМ имеют большую удельную прочность по сравнению со сталью и другими неметаллическими материалами. Поэтому использование этих материалов в механизмах, которые должны перемещаться с высокой скоростью и ускорением, и обеспечивать быстрый разгон и торможение, является чрезвычайно актуальным [1].

ВПКМ являются анизотропным материалом, включающим в себя высокопрочные волокна и полимерную матрицу. Поэтому работоспособность изделий

зависит от схемы армирования, технологии изготовления и доводки изделий. Методики конструирования и технологии изготовления корпусных деталей из ВПКМ уже вполне глубоко разработаны, в то время как применительно к зубчатым колесам механических передач такие подходы практически отсутствуют. Из-за этого потенциал прочности ВПКМ в зубчатых колесах (ЗК) не используется в полной мере. Исследованию этой проблемы посвящены лишь отдельные исследования. Так, М. Kurokawa, К. Мао исследовали работоспособность зубчатых колес и предложили выполнять армирование ВПКМ волокнами стекла и углеровинга для повышения стойкости колеса [2]. S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy изучили неравномерность распределения волокон в теле зуба и влияние несогласованности волокон в теле зуба на деформацию шестерни после формовки [3]. Они показали, что направленная укладка волокон в зубьях колеса позволяет повысить геометрическую точность и снизить деформацию колеса после формовки. М. Kurokawa, Y. Uchiyama включили в технологический процесс изготовления зубчатых колес из ВПКМ операцию нанесения покрытия на поверхность зуба, что способствует снижению сил трения и повышению максимального передаваемого момента. Наибольший эффект показал политетрафторэтилен [4].

Таким образом, работоспособность зубчатых колес из ВПКМ механических передач зависит не только от их геометрической конструкции, но от «конструкции» ВПКМ в конкретном изделии, технологии его изготовления и доводки. Поэтому **целью настоящей работы** является разработка интегрированной технологии изготовления зубчатых колес механических передач малой массы с применением волокнистых полимерных композиционных материалов.

Концепция интегрированной технологии включает в себя не только термическую и механическую обработку зубчатых колес из ВПКМ, но и весь комплекс работ по проектированию свойств ВПКМ, включая, но не ограничиваясь, компьютерным проектированием расположения волокон в детали, оптимизацией несущей способности конструкции ЗК и программирования свойств конечного продукта.

## 2. МАТЕРИАЛЫ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Традиционными материалами зубчатых колес являются металлы. Наиболее часто используются стали за-за своей высокой прочности и твердости. Последнее время находят применение различные пластики, имеющие значительно меньшую плотность по сравнению с металлами при достаточно высокой прочности. Так удельная массовая прочность полиамида достигает величины этого показателя для закаленной стали 45 (табл. 1). Дополнительное армирование пластиков высокопрочными волокнами потенциально позволяет еще больше повысить прочность неметаллического материала. В связи с этим находят применение ВПКМ на основе углеродных волокон. Потенциально удельная прочность ВПКМ более чем в 5 раз превышает прочность закаленной стали 45 (табл. 1), однако из-за анизотропии свойств этот потенциал редко используется в полной мере. Высокий модуль упругости ВПКМ дает дополнительные преимущества этому материалу по сравнению с другими пластиками, обеспечивая возможность создания жестких колес с повышенной твердостью поверхности (табл. 1).

Низкая тепло- и химическая стойкость матрицы ВПКМ ограничивает применение этих материалов в особых условиях. Так для эпоксидных смол типа D.E.R. 317 и K-115 характерна теплостойкость на

уровне 150–200°C [5], что в несколько раз меньше теплостойкости стали. Достаточно высокий коэффициент трения скольжения – 0,35 – 0,4 [6, 7] в соединениях ВПКМ – ВПКМ приводит к достаточно большому силе трения и износу поверхности скольжения. Однако возможность модификации матрицы ВПКМ различными антифрикционными добавками позволяет существенно уменьшить коэффициент трения без применения смазочных материалов [7].

## 3. ИНТЕГРИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Качество ЗК напрямую зависит от тесноты связей и интеграции технологических операций при их изготовлении. Опыт показывает, что технологическая наследственность при изготовлении ЗК из ВПКМ значительно сильнее влияет на качество готового изделия, чем при изготовлении ЗК из металлов.

Действительно, если нагрузочная способность металлического ЗК в большей степени определяется химическим составом исходного материала, финишными операциями формирования геометрии и свойств поверхности зубьев, то работоспособность ЗК из ВПКМ дополнительно напрямую зависит от укладки волокон, их ориентации, плотности расположения и их адгезии с матрицей. Поэтому технологический процесс изготовления ЗК из ВПКМ должен включать дополнительные этапы, интегрируя между собой «программирование» свойств материала заготовки и механическую обработку поверхностей зубьев для обеспечения высокой геометрической точности (рис. 1). Этап «программирования» свойств ВПКМ предполагает выбор таких параметров укладки волокон, которые в конкретных условиях работы ЗК обеспечат его наибольшую нагрузочную способность и долговечность. Этот этап должен базироваться на предварительном конечно-элементном расчете зубчатых колес передачи, целью которого является определение мест концентрации напряжений и направлений главных напряжений в этих местах (рис. 2). Для эвольвентных ЗК наиболее опасными местами будут являться основание ножки зуба и боковая поверхность зуба. Но если у основания ножки зуба материал должен сопротивляться изгибу, то на боковой поверхности – изгибу и смятию. Вместе с тем оче-

Таблица 1 – Сравнение удельной массовой прочности

Материал		E, ГПа	$\sigma_b$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная массовая прочность, МПа/(кг/м <sup>3</sup> )	
Сталь	Сталь 45, 180 НВ	205	540	7850	0,068	
	Сталь 45, 400 НВ		1200		0,15	
Волокнистый полимерный композиционный материал	Смола Lorit 285	50	85	1250	0,068	
	Углеволокно ЛУ-П-01 (однонаправленное)	250–270	2000	1500	1,33	
	Углеродистый	При растяжении вдоль волокон	115–140	1250	1400	0,89
		При сжатии вдоль волокон		600		0,42
		При сжатии перпендикулярно направлению волокон	8–10	150		0,11
При растяжении перпендикулярно направлению волокон		35		0,025		
Пластик	Полюоксиметилден (ПОМ)	2,6	140	1000	0,14	
	Флудон 20	1,2	26	2000	0,013	
	Полиамид 612	8,0-9,5	160	1020	0,16	



Рис. 1. Технологический процесс изготовления зубчатых колес из металлов (а) и ВПКМ (б)

видная ориентация волокон в зубе, как будет показано далее, не обеспечивает полного использования потенциала прочности ВПКМ, и, следовательно, требуются дальнейшие исследования в этом направлении.

На следующем этапе технологического процесса, используя информацию о необходимой схеме укладки волокон, выполняется формовка зубчатых колес. Результатом этого этапа являются уже готовые ЗК 8–9 степени точности. Получению более точных колес мешают усадка, коробления и поводки заготовки, возникающие в процессе формовки и термической термообработки. Поэтому для повышения точности ЗК из ВПКМ, также как и металлические ЗК, должны быть подвергнуты обработке резанием на зубообрабатывающем оборудовании. В результате возможно получение ЗК 5-6-й степеней точности. Вместе с тем выполнение этих технологических операций осложняется низкой стойкостью режущего зуборезного инструмента из-за высокой интенсивности абразивного износа при срезании высокопрочных армирующих волокон ВПКМ.

В силу того что для получения заготовки ЗК из ВПКМ необходимы достаточно низкие температуры, энергетические затраты на изготовление ЗК из ВПКМ меньше, чем из металлов.

К сожалению, в существующей технологии изготовления ЗК из ВПКМ этап «программирования» свойств ВПКМ не предполагает связи с последующими операциями обработки резанием, в результате чего важные слои армирующих волокон часто оказываются срезанными и уменьшают нагрузочную способность ЗК. Это можно видеть из следующего эксперимента.

#### 4. НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В эксперименте были проведены испытания зубчатых колес из полиамида 612, ПОМа, флубона 20 и углепластика, а также стали 45 (180 НВ) (см. табл. 1).

Зубчатые колеса в эксперименте были выполнены с одинаковой геометрией для всех материалов: модуль – 2 мм, число зубьев – 30, ширина венца – 10 мм, степень точности – 8.

Заготовки из углепластика были получены методом вакуумной формовки. После укладки углеволокна в форму она помещалась в вакуумный мешок, откачивался воздух, и форма заполнялась эпоксидной смолой. Термическая обработка также выполнялась под вакуумом.

Шестерни из углепластика были получены двумя различными способами. Первый образец из углепластика формовался в виде заготовки типа диск и подвергался обработке точением и зубодолблению. Второй образец был получен после формовки уже в виде готового зубчатого колеса, по форме соответствующего чертежу. В отличие от первого образца, волокна углеволокна в зубьях второго образца оказались неповрежденными резанием.

Зубчатые колеса из полиамида, ПОМа, флубона 20 и стали 45 были получены методом механической обработки.

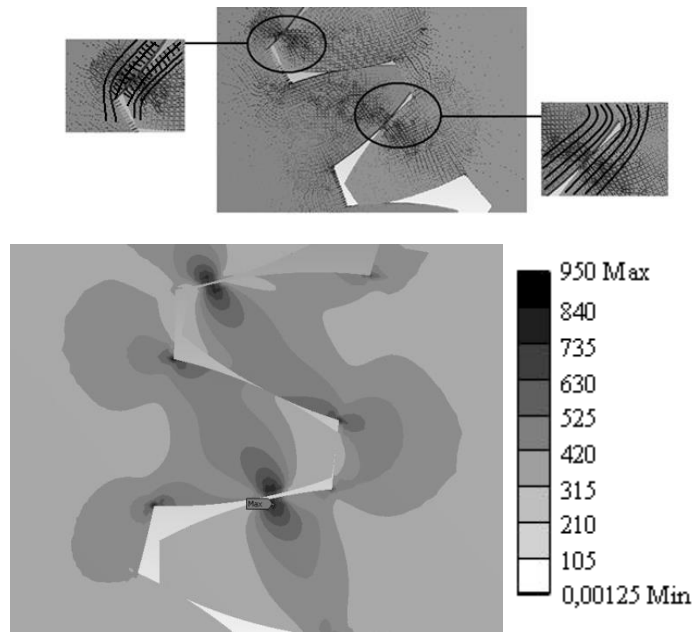


Рис. 2. Поле максимальных главных напряжений в зубьях колес прямозубой цилиндрической передачи и предлагаемая схема укладки волокон

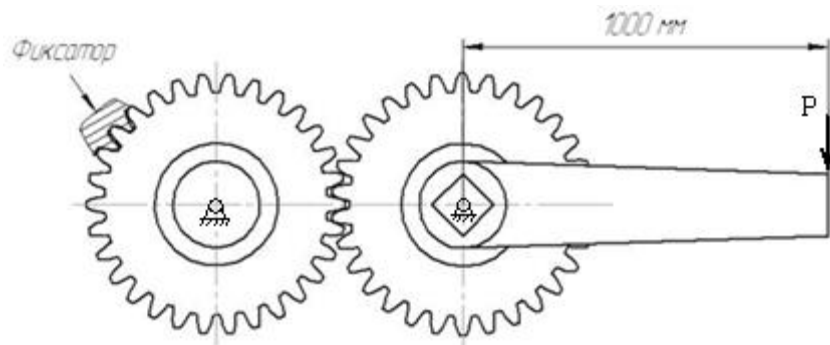


Рис. 3. Схема нагружения зубчатых колес

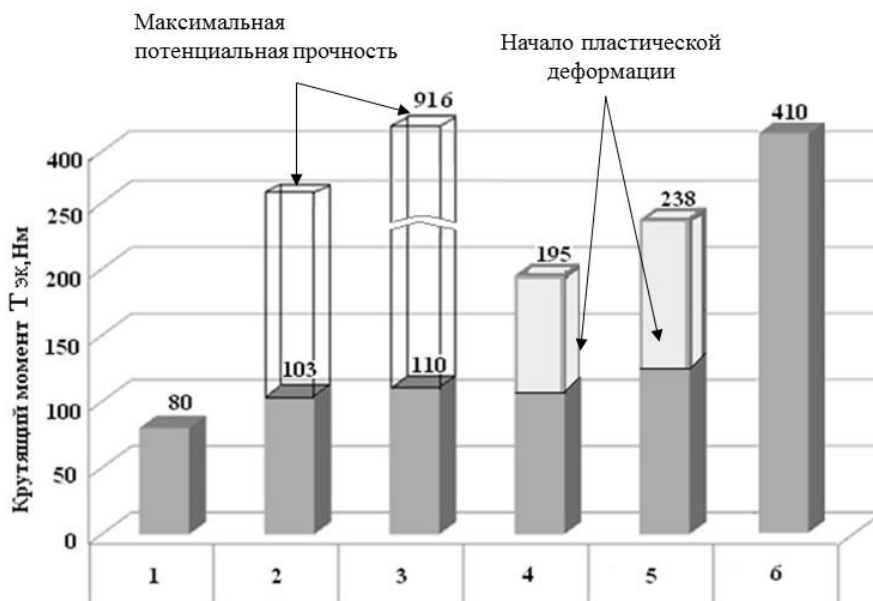


Рис. 4. Разрушающий крутящий момент для зубчатых колес из различных материалов: 1 – флубон; 2 – обработанный углепластик; 3 – углепластик без обработки; 4 – ПОМ; 5 – полиамид; 6 – сталь 45 (180 НВ)

Испытания проводились методом ступенчатого статического нагружения крутящим моментом. Испытательная установка представляет собой одноступенчатый редуктор (рис. 3). Валы редуктора были установлены в подшипниках. На ведущем валу были закреплены стальная шестерня и рычаг, к которому посредством грузов прикладывался крутящий момент. На ведомом валу устанавливалось испытуемое зубчатое колесо, фиксировавшееся от поворота зубчатым сектором.

Нагружение выполнялось до момента разрушения зубьев путем постепенного добавления грузов.

Испытания показали (рис. 4), что наибольшая нагрузочная способность из всех неметаллических ЗК оказалась у колеса из ПОМ, однако все равно она была на уровне половины нагрузочной способности стального ЗК. Углепластиковые ЗК показали нагрузочную способность примерно на половину от нагрузочной способности ПОМ, однако в отличие от ПОМ не проявили значительной пластической деформации. По нагрузочной способности без пластических деформаций ПОМ полиамид и углепластик оказались практически на одном уровне – 100 Нм. В то же время нагрузочная способность стального ЗК составила 410 Нм, т. е. в 4 раза больше. При этом удельная массовая нагрузочная способность указанных неметаллических ЗК составила 0,071 Нм/(кг/м<sup>3</sup>), а стального только 0,051 Нм/(кг/м<sup>3</sup>), т. е. на 30 % меньше.

Интересным является то, что нагрузочная способность ЗК из углепластика без обработки оказалась на 10 % больше, чем обработанного углепластикового ЗК. Это указывает на необходимость «программирования» свойств ВПКМ с учетом последующей механической обработки. При этом потенциал прочности углепластика явно недоиспользован. Покажем это следующим расчетом.

Предположим, что разрушение зуба в эксперименте произошло при растяжении перпендикулярно направлению волокон – худший из вариантов расположения армирующих элементов в теле зуба. Тогда нагрузочная способность при оптимальной укладке волокон, когда все волокна будут воспринимать только растяжение, может достигнуть

$$T_{\max} = \frac{\sigma_{B(BB)}}{\sigma_{B(PB)}} \cdot T_{ЭК}, \quad (1)$$

где  $T_{ЭК}$  – крутящий момент, полученный по результатам экспериментальных исследований;

$\sigma_{B(BB)}$  – предел прочности при растяжении вдоль волокон (табл. 1);

$\sigma_{B(PB)}$  – предел прочности при сжатии перпендикулярно направлению волокон (табл. 1).

Тогда

$$T_{\max} = (1250/150) \cdot 110 = 916 \text{ Нм.}$$

Возможность повышения максимального крутящего момента для материалов 2 и 3 показана тонкой линией на рис. 4. Видно, что потенциальная нагрузочная способность углепластиковых зубчатых колес почти в два раза выше, чем стальных, а удельная потенциальная нагрузочная способность – более чем в 10 раз больше. Ясно, что это теоретический предел, но вместе с тем очевидно, что у углепластиковых ЗК есть большой резерв повышения нагрузочной способности, который еще не исчерпан.

## 5. ВЫВОДЫ

В ходе исследований было показано, что технологическая наследственность при изготовлении зубчатых колес из ВПКМ значительно сильнее, чем у колес, изготовленных из металла. Поэтому технологический процесс изготовления зубчатых колес из ВПКМ должен учитывать влияние этапов как формовки заготовок, так и их механической обработки.

Это может быть достигнуто интегрируя между собой «программирование» свойств материала заготовки из ВПКМ и механическую обработку поверхностей зубьев для обеспечения высокой геометрической точности в единый технологический процесс. Это позволит при оптимизации схемы укладки армирующих волокон учесть не только необходимость обеспечения их ориентации в направлении наибольших нагрузок, но и минимизировать их повреждения при последующей обработке резанием в случае получения колес высокой степени точности.

Нагрузочная способность ЗК, выполненных из углепластика, находится на уровне нагрузочной способности ЗУ из других неметаллических материалов, однако только у углепластиковых ЗК есть большой резерв повышения нагрузочной способности за счет оптимизации схем укладки волокон и технологии изготовления, который еще не исчерпан.

## Integrated technology of FRP gear manufacturing

I. O. Osadchiy<sup>1)</sup>, D. V. Kryvoruchko<sup>2)</sup>, I. S. Rodin<sup>3)</sup>

<sup>1), 2), 3)</sup> *Sumy State University, 2 Rimsky Korsakov Str., Sumy, Ukraine, 40007*

Gears are an integral part of many mechanisms and machines. The advent of new composite materials gives rise to an increase in load capacity of gears and in reduction their weight. The aim of this work is to develop an integrated manufacturing technology of gears using fiber reinforced plastic composite (FRP). Literature review identified only some scattered research in this area, dedicated to the development of ways to increase the load capacity of the gears. Technological heredity in the manufacture of FRP gears is much stronger and therefore the influence of manufacturing steps must necessarily be taken into account in design of manufacturing plan. This allows optimization of fiber reinforcement scheme including as orientation in the direction of the greatest loads as minimize damage during subsequent machining of high accuracy gears. It is shown that the load capacity of the carbon FRP gears is at the level of the load capaci-

ty of gears made from other non-metallic materials, but only for CFRP gears has a large reserve for increase of the load capacity by optimizing the schemes of fiber reinforcement and manufacturing technology, which has not yet been achieved.

**Key words:** integrated manufacturing technology, FRP, machining, gear, fiber.

## Інтегрована технологія виготовлення зубчатих коліс із волокнистих полімерних композиційних матеріалів

І. О. Осадчий<sup>1)</sup>, Д. В. Криворучко<sup>2)</sup>, І. С. Родін<sup>3)</sup>

*1), 2), 3) Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007*

Зубчасті передачі є невід'ємною частиною багатьох механізмів і машин. Поява нових композиційних матеріалів дає поштовх збільшенню навантажувальної здатності зубчатих передач і зниженню їх маси. Метою цієї роботи є розроблення інтегрованої технології виготовлення зубчатих коліс (ЗК) із застосуванням волокнистих полімерних композиційних матеріалів (ВПКМ). Аналіз літератури виявив лише окремі розрізнені дослідження у цій сфері, присвячені розробленню способів підвищення працездатності ЗК. Технологічна спадковість при виготовленні зубчатих коліс із ВПКМ значно сильніша і тому вплив етапів технологічного процесу повинен бути обов'язково прийнятим до уваги під час його проектування. Це дозволить при оптимізації схеми укладанням армуючих волокон урахувати не лише необхідність забезпечення їх орієнтації в напрямку найбільших навантажень, а і мінімізувати їх пошкодження при подальшій обробці різанням у разі отримання коліс високого ступеня точності. У роботі показано, що навантажувальна здатність ЗК, виконаних із вуглепластика, перебуває на рівні навантажувальної здатності ЗК з інших неметалічних матеріалів, проте тільки у вуглепластикових ЗК є великий резерв підвищення навантажувальної здатності за рахунок оптимізації схеми укладання волокон і технології їх виготовлення, який ще не вичерпаний.

**Ключові слова:** інтегрована технологія, волокнистий полімерний композиційний матеріал, механічна обробка, зубчате колесо, волокно.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Любин Д. М. Справочник по композиционным материалам : в 2 т. / Д. М. Любин. – М. 0: Машиностроение, 1988. – Т. 2. – 584 с.
2. Mao K. A new approach for polymer composite gear design / K. Mao // *Wear*. – 2007. – Vol. 262. – P. 432–441.
3. Senthilvelan S. Damping characteristics of unreinforced, glass and carbon fiber reinforced nylon 6/6 spur gears / S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy // *Polymer Testing*. – 2006. – Vol. 25. – P. 56–62.
4. Kurokawa M. Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone / M. Kurokawa, Y. Uchiyama // *Tribology International*. – 1999. – Vol. 32. – P. 491–497.
5. Андреева А. В. Основы физикохимии и технологии композитов / А. В. Андреева. – М. : ИПРЖР, 2001. – 192 с.
6. Криворучко Д. В. Исследование свойств волокнистых полимерных композиционных материалов / Д. В. Криворучко, И. О. Осадчий, В. А. Колесник // *Современные технологии в машиностроении: сб. науч. работ* – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – Вып. 9. – С. 74–83 с
7. Zhoua X. H. Influences of carbon fabric/epoxy composites fabrication process on its friction and wear property / X. H. Zhoua, Y. S. Sunb, W. S. Wangc // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, Issue 9. – P. 4553–4557.

### REFERENCES

1. Lyubin D. M. (1988). *Spravochnik po kompozitsionnyim materialam*: vol. 2-h t. Moscow. Mashinostroenie. Vol. 2. 584 p. [in Russian].
2. Mao K. (2007). *Wear*. Vol. 262, pp. 432–441.
3. Senthilvelan S., Gnanamoorthy R. (2006). *Polymer Testing*. Vol. 25, pp. 56–62.
4. Kurokawa M., Uchiyama Y. (1999). *Tribology International*. Vol. 32, pp. 491–497.
5. Andreeva A. V. (2001). *Osnovy fizikohimi i tehnologii kompozitov*. Moscow. IPRZhR. 192 p. [in Russian].
6. Kryvoruchko, D. V. (2014). *Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii*. Vol. 9. pp. 74–83 [in Russian].
7. Zhoua, X. H. (2009) *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209. Issue 9, – pp. 4553–4557.