

УДК: 621.833-558-412:620.22

**Д.В. КРИВОРУЧКО** д-р техн. наук,  
**И.О. ОСАДЧИЙ**, Сумы, Украина.

## **КАЧЕСТВО ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА ОСНОВЕ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Зубчасті колеса є основним елементом зубчастої передачі. Зубчасті передачі та механізми досить поширені в машинобудуванні. Поява нових композиційних матеріалів дає поштовх до підвищення їх точності, несучої здатності зубчастих передач і зниження маси. Аналіз літератури виявив тільки окремі дослідження в цій області, присвячені стабілізації розмірів ЗК в результаті додавання в пластичні маси волокон склопластику при цьому знижується деформації після видалення з форми. Велика увага в процесі виготовлення зубчастих коліс повинна приділятися якості і точності продукції, її відповідності необхідним технічним стандартам. Метою цієї роботи є оцінка показників якості зубчастих коліс (ЗК) виготовлених із застосуванням волокнистих полімерних композиційних матеріалів (ВПКМ). Результати були отримані за допомогою вимірів зубчастих коліс спеціальними зубовимірвальними приладами. Зубчасті колеса з ВПКМ, дозволяють вирішити завдання забезпечення геометричної точності при формуванні і забезпечити можливість фінішної обробки у разі отримання коліс високого ступеня точності. У роботі показано, що ступінь точності ЗК, виконаних з вуглепластика, знаходиться на рівні ЗК з інших неметалічних матеріалів, при застосуванні процесу формування, проте тільки у вуглепластикових ЗК є великий резерв підвищення точності за рахунок застосування фінішних методів обробки та оптимізації схем укладки волокон, які неможливо застосувати для інших неметалічних матеріалів.

Зубчатые колеса являются основным элементом зубчатой передачи. Зубчатые передачи и механизмы, широко распространенные в машиностроении. Появление новых композиционных материалов дает толчок к повышению их точности, нагрузочной способности зубчатых передач и снижению массы. Анализ литературы выявил только отдельные исследования в этой области, посвященные стабилизации размеров ЗК в результате добавления в пластические массы волокон стеклопластика при этом снижается деформации после удаления формы. Большое внимание в процессе изготовления зубчатых колес должно уделяться качеству и точности выпускаемой

---

© Д.В. Криворучко, И.О. Осадчий, 2015

продукции, ее соответствию требуемым техническим стандартам. Целью настоящей работы является оценка показателей качества зубчатых колес (ЗК) изготовленных с применением волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ). Результаты были получены при помощи измерений зубчатых колес специальными зубоизмерительными приборами. Зубчатые колеса из ВПКМ, позволяют решить задачу обеспечения геометрической точности при формовке и обеспечить возможность финишной обработки в случае получения колес высокой степени точности. В работе показано, что степень точности ЗК, выполненных из углепластика, находится на уровне ЗК из других неметаллических материалов, при применении процесса формовки, однако только у углепластиковых ЗК есть большой резерв повышения точности за счет применения финишных методов обработки и оптимизации схем укладки волокон, которые неприменимы для других неметаллических материалов.

The wheel gears are the primary element in the gear. Gears and mechanisms are widespread in manufacturing engineering. The occurrence of new composite materials gives rise to increase accuracy, load capacity and reduce weight of gears. Literature review revealed only individual studies on the stabilization of the size of the wheel gears through adding in plastics fiberglass, thus reducing the strain after removing the mold. Much attention in the manufacturing process of gears should be given to the quality and accuracy of the parts in accordance with the standards. The aim of this paper is to assess the quality rating of fiber reinforced plastic (FRP) wheel gears. Results were obtained by measuring gears with special gear-measuring devices. Usage of FRP in the manufacture process of wheel gears production solves the task of ensuring geometrical accuracy during molding, and enable finishing wheels in the case of a high degree of accuracy. It was established that the degree of accuracy of FRP wheel gears, is comparable with one for other non-metallic materials after forming process, but only FRP wheel gears has a large reserve for increasing accuracy through the use of mechanical polishing and optimization of fiber lay up schemes, which are inapplicable for other nonmetallic materials.

## **1 Введение**

В современных условиях конкурентоспособность продукции определяется двумя основными показателями: качеством и быстротой реакции на ее изменение за счет освоения новых технологий. Особое место в машиностроении занимает процесс обработки зубчатых колес связанный с высокой сложностью и трудоемкостью. Привычные технологии не обеспечивают достаточную эффективность, так как

необходимо проводить многоэтапную зубообработку. Решение задачи обеспечения качества и сокращения технологического цикла может быть найдено при условии применения альтернативных методов получения заготовки и обработки деталей. Одним из перспективных направлений в машиностроение является приближение по форме и размерам к готовой детали. Высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, низкая теплопроводность, делают углепластики лучшим материалом для проектирования и создания новых материалов и конструкций из них. Возможность сочетать в одном материале высокую прочность и химическую инертность, а также вибро-, звукопоглощение обуславливает выбор именно этого материала для изготовления конструкций различных редукторов и других механизмов с высоким ускорением и скоростью перемещения. Е. [Nakimian](#), изучая точность ЗК рассматривал такие три фактора как параметры впрыска, коробление и усадку, при помощи внедрения стекловолокна. Результатом стало минимизация значения коробления (0,0051 мм) и усадки (2,28%) [1]. М. Kurokawa, включил в технологический процесс изготовления зубчатых колес из ВПКМ операцию нанесения покрытия на поверхность зуба, что способствует снижению сил трения и повышению степени точности. Наибольший эффект показал поли-тетра-фтор-этилен [2]. G. Kapil в своей статье анализирует оптимизацию параметров микро-геометрии общее отклонение профиля  $F_a$  и накапливается отклонение шага  $F_p$  и благодаря применению метода «Vox-Behnken» точность получаемых шестерен повышалась с 7 до 5.

Таким образом, качество зубчатых колес из ВПКМ зависит от конструкции заготовки и методов финишной обработки. Поэтому **целью настоящей работы** является оценка показателей качества зубчатых колес изготовленных с применением волокнистых полимерных композиционных материалов.

## 2 Технология получения заготовок

Процесс формовки зубчатых колес из композиционных материалов весьма специфичен. Определяющее влияние на качество готового

продукта имеет способ армирования (направление армирования). На основе расчета поля напряжений разработана схема укладки волокон, которая предполагает расчет направления укладки волокон в теле зуба и сил, действующих в зубчатом зацеплении. В связи с техническими трудностями, сопровождающими проведение натурального эксперимента, была предложена программа поискового модельного эксперимента.

Для повышения адекватности конечно-элементной модели заготовки зубчатого колеса были выполнены испытания стандартных образцов углепластика, которые показали положительный результат при испытаниях на разрыв.

Таблица 1 – Свойства применяемых материалов

Материал свойства	Флубон	ПОМ	Полиамид	3D печать	Углепластик вдоль волокон	Углепластик поперек волокон
E, ГПа	1,2	2,6	8,0	2.0	130	10
$\sigma_{в}$ , МПа	26	140	160	-	1200	35

В результате проведения модельного эксперимента установлены рациональные схемы укладки волокон углеленты: расположение волокна вдоль оси зуба. Ниже представлен рисунок иллюстрирующий компьютерное моделирование напряжений в теле зуба и предложенную схему укладки. Приведена фотография отформованной заготовки из углепластика с расположением волокон вдоль оси зуба.

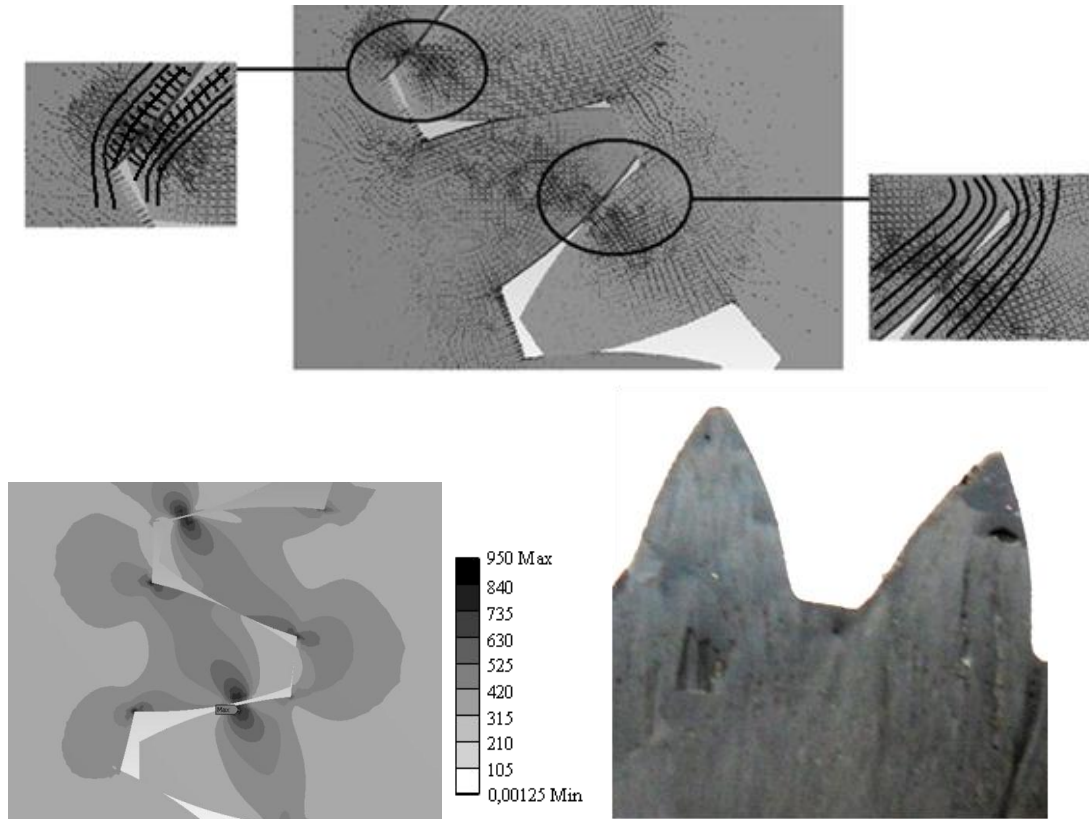


Рисунок – Поле максимальных главных напряжений в зубьях колес прямозубой цилиндрической передачи и предлагаемая схема укладки волокон

### 3 Параметры точности

Для каждой степени точности зубчатых колес и передач устанавливаются нормы: кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев зубчатых колес в передаче. Для определения колебания длинны общей нормали применялся нормалемер БВ-5045-В, 6-ь измерений проводились по периметру зубчатого венца. Шероховатость измерялась при помощи профилометра П-283. Предельное отклонение шага было определено при помощи шагомера БВ-5070, после настройки размера концевыми мерами проводились измерение.

Таблица 2 – Показатели точности зубчатых колес  $m=2$ ,  $z=30$ ,  $W=21,3$ 

Материал	Метод формообразования	Шероховатость $R_a$ , мкм	Предельное отклонение шага $F_{Pt}$ , мкм	Колебание длины общей нормали $F_s$ , мкм	Степень точности по ГОСТ 1643-81 DIN 3962
Флубон (НВ 58)	Зубо-долбежная	1,18	30	20	8
ПОМ (НВ 177)	Зубо-долбежная	1.45	50	70	9
Полиамид (НВ 134)	Зубо-долбежная	1,82	30	20	8
3D печать (НВ 114)	печать	9,46	140	80	10
Углепластик (хаотичные волокна) (НВ 180)	формовка	1,6	110	60	9
Углепластик (хаотичные волокна) (НВ 144)	Зубо-долбежная	1,7	16	20	8
Углепластик (упорядоченные волокна) (НВ 219)	формовка	1,4	80	70	9
Углепластик (упорядоченные волокна) (НВ 219)	Зубо-шлифовка	0,8	10	10	6

Точность изготовления зубчатых колес и передач задается степенью точности, а требования к боковому зазору - видом сопряжения по нормам бокового зазора. Проведя измерения и анализ обработанных материалов

было определено величину отклонения длинны общей нормали, отклонение шага, шероховатость поверхности и среднюю длину общей нормали. Наибольшую погрешность по всем критериям показала 3D печать, высокая шероховатость и низкая геометрическая точность обусловлены послойной структурой материала. Флубон ПОМ и Полиамид показали схожую шероховатость и отклонение шага, но большее в сравнении с углепластиком колебание длины общей нормали, что обусловлено высоким уровнем пластической деформации.

Касательно углепластиков наихудшие параметры показали – формовка и зубодолбежная операция это связано с неточностью изготовления формы и изменением геометрических параметров при термообработке углепластиков также хаотичностью расположения волокон. Шероховатость находится в одном диапазоне как после формовки, так и после лезвийной обработки углепластиков. Однако при абразивной обработке шероховатость повысилась до  $R_a = 0,8$  что является высоким показателем для неметаллических материалов. Также положительно на шероховатость влияет упорядоченное расположение волокон в теле зуба. При срезании слоя припуска не образуются дефекты на эвольвентной поверхности зуба.

Попытки применения заготовок с предварительно оформленными зубьями не получили широкого распространения в связи с возможностью повышения точности на 1-2 степени. При получении металлической заготовки степень точности равна 10-12, чего недостаточно для применения только финишной обработки, что сводит на нет все преимущества от экономии материала заготовки. Применение формованных углепластиковых заготовок 8-9 степени точности позволяет сразу проводить финишную обработку и получать зубчатые колеса 6-7 степени точности.

#### **4 Выводы**

В ходе исследований было показано, что степень точности при изготовлении зубчатых колес из ВПКМ значительно выше, чем у колес изготовленных из других неметаллических материалов. Поэтому технологический процесс изготовления зубчатых колес из ВПКМ должен

включать финишные методы обработки для получения ЗК 6-7 степени точности.

Это может быть достигнуто за счет формовки упорядоченных волокон ЗК для получения точной заготовки 8-9 степень точности и механической обработки поверхностей зубьев для обеспечения высокой геометрической точности в одном технологическом процессе. 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 степень точности ЗК, выполненных из углепластика, находится на уровне ЗК из других неметаллических материалов, при применении процесса формовки, однако только у углепластиковых ЗК есть большой резерв повышения точности за счет применения финишных методов обработки и оптимизации схем укладки волокон, которые неприменимы для других неметаллических материалов.

**Список использованных источников:** 1. [Hakimian E.](#) Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method / E. [Hakimian](#), Y. // [Materials & Design](#). – 2012. – Vol. 42. – pp.62-71. 2. [Kurokawa M.](#) Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone / M. [Kurokawa](#), Y. [Uchiyama](#) // [Tribology International](#). – 1999. – Vol. 32. – pp.491–497. 3. [Kapil G.](#) Analysis and optimization of micro-geometry of miniature spur gears manufactured by wire electric discharge machining / G. [Kapil](#), J [Neelesh](#) // [Precision Engineering](#). – 2014. - Vol. 38. – pp.728–737.

**Bibliography (transliterated):** 1. [Hakimian E.](#) Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method / E. [Hakimian](#), Y. // [Materials & Design](#). – 2012. – Vol. 42. – pp.62-71. 2. [Kurokawa M.](#) Performance of plastic gear made of carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone / M. [Kurokawa](#), Y. [Uchiyama](#) // [Tribology International](#). – 1999. – Vol. 32. – pp.491–497. 3. [Kapil G.](#) Analysis and optimization of micro-geometry of miniature spur gears manufactured by wire electric discharge machining / G. [Kapil](#), J [Neelesh](#) // [Precision Engineering](#). – 2014. - Vol. 38. – pp.728–737.