

УДК 621.833

А. С. Ильин, аспирант
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕТАРНО-ВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧИ С ЗАЦЕПЛЕНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТЕЛ

В статье предложены варианты оптимизации технологии мелкосерийного производства основных элементов планетарно-волновой передачи с зацеплением промежуточных тел: генератора волн; промежуточного тела; сепаратора; профильного колеса. Актуальность работы обоснована непрерывно ужесточающимися требованиями к минимизации производственных издержек с учетом совершенствования металлообрабатывающего оборудования и технологий. Целью оптимизации технологии изготовления основных элементов передачи является снижение производственных издержек и, как следствие, повышение конкурентоспособности изделий на основе планетарно-волновой передачи с зацеплением промежуточных тел. Оптимизация технологического процесса производства основных элементов передачи рассмотрена в синтезе со следующими факторами: серийностью производства; производственными издержками; конструктивными особенностями изделий; условиями эксплуатации; требованиями к точностям формы и расположения поверхностей элементов; свойствами материалов. В части оптимизации технологии изготовления эквидистанту образующей генератора волн предложено получать на токарной операции с использованием специальной технологической оснастки. К промежуточному телу предъявлены основные требования, и с экономической точки зрения данный элемент передачи рекомендовано приобретать как массовый продукт производства подшипниковой индустрии. Для сепаратора рассмотрены электроэрозионная и фрезерная операции получения окон и даны рекомендации по выбору соответствующей технологии обработки в зависимости от назначения изделия. К профильному колесу предъявлены основные требования и рекомендованы материалы, применение которых позволяет сократить число технологических операций и переходов при обработке профиля.

Руководствуясь предложенными рекомендациями, можно существенно снизить производственные издержки, повысив конкурентоспособность изделий на основе планетарно-волновой передачи с зацеплением промежуточных тел.

Ключевые слова: планетарно-волновая передача; генератор волн; промежуточное тело; сепаратор; профильное колесо; технология производства.

Элементы планетарно-волновой передачи с зацеплением промежуточных тел

Интерес к планетарно-волновым передачам с зацеплением промежуточных тел существенно возрос с развитием технологии электроэрозионной обработки, основанной на вырывании частиц материала с поверхности импульсом электрического разряда и позволяющей с высочайшей точностью обработать профиль сложной формы (профильное колесо) с производительностью, практически не зависящей от физических свойств обрабатываемого электропроводного материала.

Рассмотрим варианты оптимизации технологии мелкосерийного производства основных элементов планетарно-волновой передачи с зацеплением промежуточных тел [1] (рис. 1) с точки зрения минимизации производственных издержек.

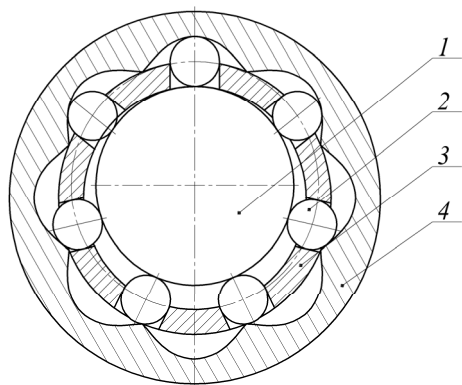


Рис. 1. Основные элементы планетарно-волновой передачи зацеплением с промежуточными телами: 1 – генератор волн с одним периодом профиля (подшипник качения не показан); 2 – промежуточные тела; 3 – сепаратор; 4 – профильное колесо

Генератор волн

Образующей генератора волн с одним периодом профиля является окружность. Для получения эквидистанты образующей достаточно токарного станка и специальной технологической оснастки, использование которой обосновано конструктивной особенностью генератора волн, а именно, смещением образующей на величину эксцентриситета e относительно оси вращения генератора волн. В случае построения многорядной ступени редуктора смещение образующей последующего ряда (рядов) передачи выполняется с поворотом на 180° для 2-, 4-рядного редуктора (рис. 2) или 120° для 3-рядного редуктора.



Рис. 2. Генератор волн 4-рядного редуктора

Специальная технологическая оснастка, используемая для получения эквидистанты образующей профиля генератора волн на токарном станке, представляет собой оправку со смещенными на величину эксцентриситета e и повернутыми на необходимый угол центральными отверстиями (рис. 3).

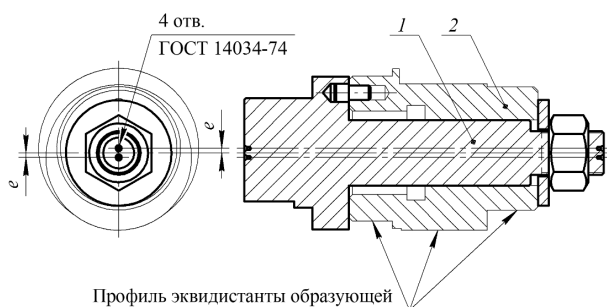


Рис. 3. Технологическая оснастка для изготовления генератора волн: 1 – оправка со смещенными на 180° центровыми отверстиями; 2 – генератор волн 4-рядного редуктора

При обработке заготовка генератора волн фиксируется на оправке, которая базируется в токарном станке посредством соответствующих центровых отверстий.

Термической обработки эквидистанта профиля образующей генератора не требует, так как на него напрессовывается подшипник качения, наружное кольцо которого контактирует с промежуточными телами. Вследствие чего для изготовления генератора волн можно использовать широкий спектр конструкционных материалов.

Промежуточное тело

В конструкции передачи в качестве промежуточных тел рекомендуется использовать ролики цилиндрические с прямолинейной образующей и плоскими торцами в соответствии с требованиями ГОСТ 22696, применяемые в подшипниках качения.

Поскольку наиболее нагруженной парой с позиции контактных напряжений является промежуточное тело – зуб профильного колеса [2], то материалы именно этих элементов будут лимитировать суммарный вращающий момент входного звена передачи.

Для максимального раскрытия потенциала передачи ролики цилиндрические (рис. 4) рекомендуется изготавливать из сталей ГОСТ 801 ШХ15 и ШХ15СГ с твердостью от 61 до 65 HRC, обеспечивая тем самым сравнительно высокий порог восприятия контактных напряжений промежуточными телами.

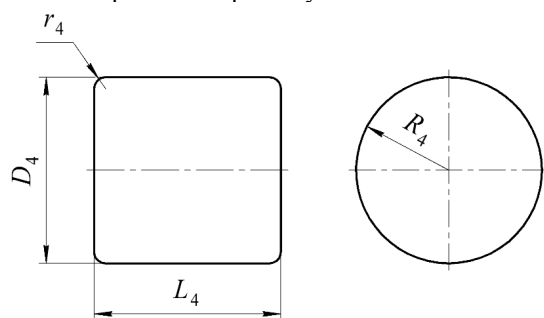


Рис. 4. Ролик цилиндрический

Сепаратор

Для удержания промежуточных тел в осевом направлении и восприятия радиальной реакции в сепараторе (рис. 5) предусмотрены окна.

Форма окна сепаратора может отличаться в зависимости от технологии изготовления.

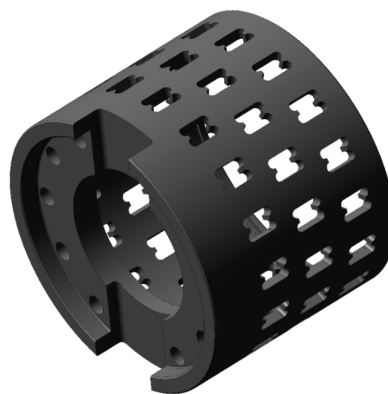


Рис. 5. Сепаратор 3-рядного редуктора со смещенными на 120° окнами

На рис. 6 представлена геометрическая форма окна, получаемая на электроэрозионной операции прошивным фасонным электродом.

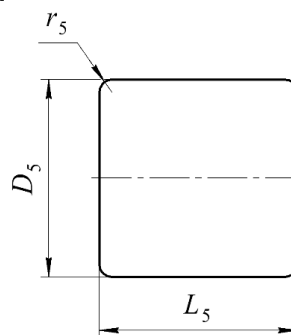


Рис. 6. Геометрическая форма окна сепаратора при электроэрозионной обработке

D_5 – высота окна сепаратора, из соображений минимального люфта передачи и отсутствия заклинивания роликов рекомендуемое значение

$$D_5 = 2R_4$$

с полем допуска по F7 (для механизмов повышенной точности) или D9 (для механизмов обычной точности).

L_5 – ширина окна сепаратора, из соображений отсутствия заклинивания роликов рекомендуемое значение

$$L_5 = 2R_4 + 0,1$$

с полем допуска по H14.

r_5 – радиус скругления (радиус инструмента) назначается на 10 % меньше радиуса скругления ролика, т. к., с одной стороны, необходимо обеспечить свободное движение ролика, с другой – минимизировать концентраторы напряжения в окне сепаратора

$$r_5 = 0,9r_4.$$

Данный вид технологии получения окон малопроизводителен в сравнении с фрезерной обработкой, но позволяет получать наиболее точную геометрию формы и расположения окон, так как электроэрозионная операция выполняется на финальной

стадии изготовления детали (после термической обработки), что исключает нарушение геометрии детали в результате термических поводок. Также немаловажен факт минимизации механического воздействия инструмента на деталь при обработке.

Электроэрозионная обработка окон сепаратора рекомендуется к применению при изготовлении изделий повышенной точности позиционирования ведомого звена.

Фрезерная обработка окон является наиболее распространенной технологией, так как более производительна в сравнении с электроэрозионной. Геометрия окна сепаратора при фрезерной обработке представлена на рис. 7.

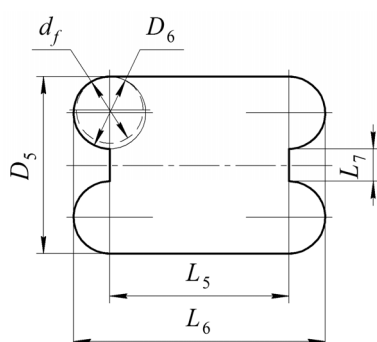


Рис. 7. Геометрическая форма окна сепаратора при фрезерной обработке

Производительность при фрезерной обработке окон существенно зависит от диаметра используемой фрезы d_f . Для повышения производительности найдем максимально возможный диаметр фрезы для обработки окна под промежуточное тело радиусом R_4 . Примем минимальную ширину упорного бурта

$$L_7 = 0,4R_4.$$

Когда фреза завершает прямолинейную траекторию и переходит на внутренний радиус, ее дуга контакта увеличивается, а значит, параметры резания больше не соответствуют фактической дуге контакта, что приводит к колебаниям и даже к поломке фрезы. Для того чтобы избежать негативных факторов при резании, необходимо оптимизировать траекторию перемещения фрезы (форму окна) и обеспечить равномерную дугу контакта, что способствует сокращению времени цикла обработки. Специалисты компании Seco (одного из ведущих производителей металлорежущего инструмента в мире) рекомендуют применять разницу к соотношению диаметров не менее 5 % [3]

$$D_6 = 1,05d_f,$$

тогда максимально допустимый диаметр фрезы

$$d_f = 0,76R_4.$$

L_6 – технологическая ширина окна сепаратора

$$L_6 = L_5 + 1,05d_f$$

с полем допуска по Н14.

Фрезерная операция более производительна, чем электроэрозионная, однако имеет недостатки, выраженные в точности геометрии и формы расположения окон, связанные с жесткостью системы СПИД.

Фрезерная обработка окон сепаратора рекомендуется к применению при изготовлении изделий общепромышленного назначения, не требующих повышенной точности позиционирования ведомого звена.

Материалы и их физические свойства, рекомендуемые при изготовлении сепаратора в зависимости от ресурса и условий работы изделия, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Рекомендуемые материалы сепаратора и их физические свойства

Ресурс работы, ч	От 400 до 3200	От 3200 до 12500	От 12500 до 50000
Вид нагрузки	Переменная (пульсирующая)	Знакопеременная (симметричная)	
Материал	Сталь 40Х ГОСТ 8731	Сталь 30ХГСА ГОСТ 8731	Сталь 38Х2Н2МА ГОСТ 4543
Объемная твердость, HRC	От 42 до 47		От 37 до 42
Поверхностная твердость, HV	От 413 до 471	От 550 до 750	От 649 до 867
Шероховатость D_5, Ra	0,8		
Шероховатость L_5, Ra	1,6		

Сталь 40Х ГОСТ 8731 – один из самых дешевых и доступных материалов, рекомендуемых для изготовления сепаратора. Однако для ответственных изделий с большим ресурсом работы и знакопеременной нагрузкой рекомендуется использовать материалы, менее склонные к развитию усталостных трещин, такие как сталь 30ХГСА ГОСТ 8731 или сталь 38Х2Н2МА ГОСТ 4543.

Профильное колесо

Зубчатый профиль колеса (рис. 8) описывается кривой второго порядка, в связи с чем при его обработке требуются высокоточные станки с числовым программным управлением.

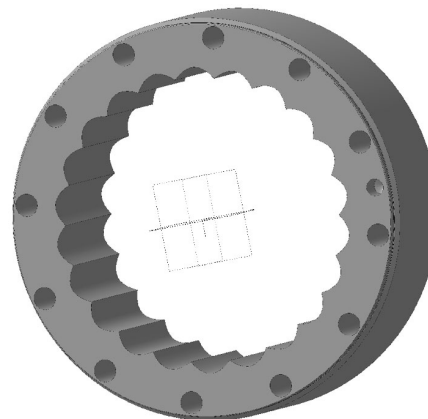


Рис. 8. Профильное колесо

Оптимальной технологией изготовления профильного колеса с точки зрения минимизации издержек (минимальное количество термических и механических операций) является технология, при которой получение зубчатого профиля производится на электроэрозионной операции, когда в качестве электрода используется проволока. Операция получения зубчатого профиля выполняется на финишной стадии изготовления детали, после термической обработки.

В качестве материала для изготовления профильного колеса из соображений восприятия максимальных контактных напряжений рекомендуется применять конструкционную подшипниковую сталь по ГОСТ 801 ШХ15 или ШХ15СГ (отличается лучшей прокаливаемостью).

В случае когда высота зуба (разница между радиусом впадин зубьев и радиусом вершин) позволяет добиться прокаливаемости впадины профиля до твердости 52 HRC, рекомендуется избегать предварительной черновой обработки, заключающейся в получении эквидистанты зубчатого профиля, а ограничиться лишь черновой токарной обработкой внутреннего диаметра профильного колеса. Это позволяет существенно сократить машинное время электроэрозионной обработки детали и разгрузить технологические мощности оборудования с ЧПУ.

Материалы и их физические свойства, рекомендуемые при изготовлении профильного колеса в зависимости от конструкции, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Рекомендуемые материалы и их физические свойства

Материал	ШХ15 ГОСТ 801	ШХ15СГ ГОСТ 801
Допустимая высота зуба (без черновой обработки профиля), мм	До 6	От 6 до 15
Объемная твердость во впадине зуба, HRC	От 52 до 56	
Шероховатость зубчатого профиля, Ra	0,32	

Заключение

Руководствуясь предложенными рекомендациями по оптимизации технологии изготовления основных элементов передачи, можно существенно снизить производственные издержки, повысив конкурентоспособность изделий на основе планетарно-волновой передачи с зацеплением промежуточных тел.

Библиографические ссылки

1. An I-Kan, A. S. Il'in, A. V. Lazurkevich. Aspects of geometric calculation of the planetary gear train with intermediate rollers. Part 1. 2016 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 124, conference 1. DOI:10.1088/1757-899X/124/1/012003.
2. An I-Kan, A. S. Il'in, A. V. Lazurkevich. Load analysis of the planetary gear train with intermediate rollers. Part 2. 2016 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 124, conference 1. DOI:10.1088/1757-899X/124/1/012004.
3. Т. ван Астен. Методы черного фрезерования при оптимизированной траектории перемещения фрезы [Электронный ресурс] // Твердый сплав. 2013. 12 декабря. – URL: <http://tverdysplav.ru/metody-chernovogo-frezerovaniya-ot-seco-tools> (дата обращения: 26.02.2017).

A. S. Ilyin, Post-graduate, Tomsk National Research Polytechnic University

Optimization of Production Technology for Basic Elements of Planetary-Wave Gears with Intermediate Rollers

The paper highlights the technology optimization of basic elements small-series production of planetary-wave gears with intermediate rollers: wave generator; intermediate rollers; a separator and a side wheel. The relevance of the paper is justified by continuously growing requirements to minimize the production costs concerning the improvement of metalworking equipment and technologies. Optimization of gear production technology is targeted on production cost reduction as well as improving its competitiveness on the basis of planetary-wave gears with intermediate rollers. Basic gear elements production technology optimization is considered together with the following factors: large-scale production; production costs; design features of products; form and elements surface position accuracy requirements; properties of materials. To optimize the production technology, the equidistant of wave generator is suggested to be obtained by turning operation with the application of special technological facilities. The intermediate roller is presented with the basic requirements and in the economic aspect it is suggested to be purchased as a mass product of the bearing industry. For the separator, the electroerosive and milling operations for obtaining windows are considered and recommendations on appropriate processing technology are given, depending on the purpose of the product. The basic requirements to the side wheel production are given as well as materials, which allow reducing the number of technological operations and transitions during profile processing, are recommended. Following the proposed recommendations can significantly reduce production costs, improve the competitiveness of products on the basis of planetary-wave gear train with intermediate rollers.

Keywords: planetary-wave gear; wave generator; intermediate tools; separator; side wheel; production technology.

Получено: 10.03.17