

УДК 621.81:004
DOI 10.17513/snt.40278

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЬНО-СОПРЯЖЕННОЙ ЧЕРВЯЧНОЙ ПАРЫ

Суханова О.А., Трифанов И.В., Спирина Д.А., Соболев К.В., Никитина Л.Н.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева», Красноярск, e-mail: olkasukhanova@mail.ru

Целями исследования в статье являются разработка методов изготовления радиусно-сопряженной глобоидно-цилиндрической пары привода с нелинейчатый червяком, профиль витка которого очерчен по вогнутой эвольвенте, а зубьев сопряженного колеса – по выпуклой эвольвенте, а также обоснование технологической схемы их изготовления и выходных параметров процесса ротационного точения винтовой поверхности глобоидного червяка. В разделе «Материалы и методы исследования» проведен анализ технологий нарезания глобоидных винтовых поверхностей, предложена технологическая схема изготовления профильно-сопряженной червячной пары путем нарезания черновых витков на стальном корпусе червяка ротационным точением, а затем – последующего чистового нарезания витков червяка методом обкатки с профилированием по методу копирования дисковым многолезвийным инструментом с эвольвентным профилем режущих элементов. Приведены расчеты оборотов многолезвийного инструмента, контактных напряжений, на основании проведенных исследований разработана технологическая схема изготовления профильно-сопряженной червячной передачи. Установлена эмпирическая зависимость шероховатости винтовой поверхности глобоидного червяка с вогнутым профилем от технологических режимов. Измерения температуры проводили при помощи тепловизора модели HotFindDTX. Определение погрешности винтовой поверхности по шаговому размеру и профилю производили при помощи координатно-измерительной машины RommerArmc. Предложены материалы, которые будут использоваться для изготовления червячной пары, а также в качестве антифрикционного покрытия вместо традиционно жидкой смазки, – слоистые твердосмазочные материалы.

Ключевые слова: сопряженная червячная пара, технологическая схема, ротационное точение, многолезвийный инструмент, радиус приведенной кривизны

IMPROVEMENT OF THE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF A PROFILE-COUPLED WORM PAIR

Sukhanova O.A., Trifanov I.V., Spirina D.A., Sobol' K.V., Nikitina L.N.

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, e-mail: olkasukhanova@mail.ru

The purpose of the research in the article is to develop methods for manufacturing a radius-conjugated globoid-cylindrical pair of a drive with a non-linear worm, the profile of which is outlined by a concave involute, and the teeth of the conjugated wheel by a convex involute, as well as substantiating the technological scheme for their manufacture and the output parameters of the rotary turning process of the screw surface of a globoid worm. In the section «Materials and research methods», an analysis of technologies for cutting globoid screw surfaces is carried out, a technological scheme for manufacturing a profile-conjugated worm pair is proposed by cutting rough turns on a steel worm body by rotary turning, and then subsequent finishing of the worm turns is carried out by the run-in method with profiling using the copying method with a disk multi-blade tool with an involute profile of cutting elements. Calculations of the revolutions of a multi-blade tool and contact stresses are given, and based on the research carried out, a technological scheme for manufacturing a profile-coupled worm gear has been developed. The empirical dependence of the roughness of the helical surface of a globoid worm with a concave profile on the technological modes has been established. The temperature measurements were carried out using a thermal imager model HotFindDTX. The error of the screw surface was determined by the pitch dimensions and profile using a RommerArmc coordinate measuring machine. Materials that will be used for the manufacture of a worm pair are proposed, as well as layered solid lubricants as an antifricition coating instead of the traditional liquid lubricant.

Keywords: conjugate worm pair, technological scheme, rotary turning, multi-blade tool, radius of reduced curvature

Введение

Повышение эксплуатационных параметров глобоидных червячных приводов, а также комбинированных приводов, созданных на их основе, требует совершенствования технологии, позволяющей изготовить профильно-сопряженные червячные пары. Известны преимущества червячных передач, такие как возможность осуществлять передачу одноступенчато с большим передаточным числом $i=500$ и более в кинематических приводах. Силовые механизмы могут иметь $i=8..180$ [1, с. 164–165]. Получение точных и малых перемещений, плавность и бесшумность хода, большая кинематическая точность, самоторможение приводов, а также компактность и сравнительно небольшая масса конструкции, демпфирующие свойства по снижению уровня вибрации машин обуславливают предпочтение при использовании червячных передач в различных специальных механизмах [2].

матических приводах. Силовые механизмы могут иметь $i=8..180$ [1, с. 164–165]. Получение точных и малых перемещений, плавность и бесшумность хода, большая кинематическая точность, самоторможение приводов, а также компактность и сравнительно небольшая масса конструкции, демпфирующие свойства по снижению уровня вибрации машин обуславливают предпочтение при использовании червячных передач в различных специальных механизмах [2].

Однако высокие контактные напряжения и трения в зацеплении [3, с. 13–14] из-за малого пятна контакта линейчатого червяка и зубьев колеса, а также полусухое или сухое трение из-за недостаточно хорошей смазки вызывают износ сопряженных деталей, сильный нагрев передачи при длительной работе из-за потерь мощности на трение и выделение тепла, которое необходимо отводить. Все эти факторы являются существенными недостатками червячных передач, ограничивающими их мощность в пределах не более 50 кВт.

Существующие технологии изготовления линейчатого червяка резанием или накатыванием не позволяют обеспечить большое пятно контакта взаимодействующих поверхностей [4, 5]. Такие технологии дают возможность при сопряжении червячной пары обеспечить линейчатый контакт, при котором могут возникать большие контактные напряжения, а также может нарушаться механизм жидкостного трения при скольжении витков червяка по зубу колеса [6]. За счет этого увеличивается износ, происходит заедание, снижается КПД, например в самотормозящих передачах – до 0,5, а также выделяется тепло, которое необходимо постоянно отводить.

Требуется проведение научно-технологических исследований по разработке рациональных методов изготовления профильно-сопряженной червячной пары с нелинейчатым червяком, профиль витков которого очерчен по вогнутой эвольвенте, способной снизить контактные и тепловые деформации [7]. При этом в качестве формообразующего звена выбирается сопряженное прямозубое цилиндрическое колесо вместо червячного [8, с. 162–165; 9].

Целями исследования в статье являются разработка методов изготовления радиусно-сопряженной глобоидно-цилиндрической пары привода с нелинейчатым червяком, профиль витка которого очерчен по вогнутой эвольвенте, а зубьев сопряженного колеса – по выпуклой эвольвенте, а также обоснование технологической схемы их изготовления и выходных параметров процесса ротационного течения винтовой поверхности глобоидного червяка.

Материалы и методы исследования

В работе проведен анализ сложности технологий нарезания глобоидных винтовых поверхностей с выпукло-вогнутым профилем [3] (нелинейчатым) сопряженной пары червяка и колеса, который показал необходимость совершенствования технологии изготовления профильно-сопряженных глобоидно-цилиндрических передач. Рас-

смотрены конструкторско-технологические решения. Разработана технологическая схема изготовления профильно-сопряженной червячной пары: витков нелинейчатого червяка ротационным точением, принудительно вращаемым многолезвийным инструментом, а сопряженного с ним прямозубого цилиндрического колеса – модернизированной цилиндрической червячной фрезой. Проведены экспериментальные исследования зависимости шероховатости глобоидной винтовой поверхности червяка вогнутого от величины переднего угла режущего инструмента [7], а также режимов обработки. Разработаны рекомендации по снижению трудоемкости изготовления профильно-сопряженной червячной пары, а также предложен метод снижения трения в зацеплении за счет применения антифрикционного твердосмазочного покрытия и жидкой смазки.

Результаты исследования и их обсуждение

Предложено глобоидно-цилиндрическую передачу с нелинейчатым червяком изготавливать путем нарезания черновых витков на стальном корпусе червяка ротационным точением, принудительно вращаемым многолезвийным инструментом [10]. После нарезания на черновые витки предлагается наносить антифрикционный материал методом наплавки, а затем проводить последующее чистовое нарезание витков червяка методом обкатки с профилированием по методу копирования дисковым многолезвийным инструментом с эвольвентным профилем режущих элементов [6].

Число оборотов многолезвийного инструмента определялось по формуле:

$$h_2 = h_1 \cdot \frac{K}{Z}, \quad (1)$$

где K – число заходов червяка, z – число режущих элементов многолезвийного инструмента. Число оборотов червяка h_1 определяется по формуле:

$$h_1 = \frac{1000V}{\pi \cdot D}, \quad (2)$$

где V – скорость резания, D – наружный диаметр заготовки червяка.

Нарезание таким способом витков глобоидного червяка и зубьев цилиндрического колеса цилиндрической фрезой позволяет образовать сопряженную червячную пару по радиусу с большей площадью контакта, чем червячная передача с линейчатым червяком.

Контактные напряжения δ_n , рассчитанные с учетом коэффициента K_1 , учитывающего условия эксплуатации, могут быть снижены в зацеплении согласно уточненной формуле Герца [11, с. 251]:

$$\delta_n = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)} \cdot \frac{W}{\rho_{np}}} \cdot K_1, \quad (3)$$

где $W = F_1 / b_m$ – нормальная нагрузка на единицу длины контактной линии, F_r – сила нормальная к площади контакта, b_m – длина контактной линии;

$$\rho_{np} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 \pm \rho_2}, \quad (4)$$

где ρ_1 и ρ_2 – радиус кривизны в точках контакта (знак «минус» – для случая контакта выпуклой поверхности радиуса ρ_1 с выгнутой поверхностью радиуса ρ_2);

E_1 и E_2 , ν_1 и ν_2 – соответственно модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов звеньев червячной пары; K_1 – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации червячного редуктора, $K_1 = 0,5 - 0,8$ и определяется экспериментальным методом.

Из формулы Герца следует, что при увеличении приведенного радиуса кривизны контактные напряжения уменьшаются [11, с. 251].

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана технологическая схема изготовления профильно-сопряженной червячной пары (рис. 1) с применением ротационного точения витков червяка с вогнутым эвольвентным профилем, а для изготовления зубьев цилиндрического червячного колеса применяется модернизированная цилиндрическая червячная фреза.

Технологическая схема устанавливает изготовление многолезвийного инструмента для ротационного точения витков нелинейчатого червяка на основе сопряженного цилиндрического колеса, взятого в качестве формообразующего звена. Такой подход позволяет повысить точность сборки сопряженной червячной пары. Для нарезания зубьев цилиндрического прямозубого колеса применяется модернизированная фреза, выполненная по технологии гостовской фрезы. При этом затраты на технологическое оснащение процесса изготовления глобоидно-цилиндрической профильно-сопряженной пары с нелинейчатым глобоидным червяком снижаются в 3–5 раз по сравнению с существующей технологией.

Для проведения экспериментов по нарезанию витков нелинейчатого червяка применялся горизонтально зубофрезерный станок модели ЕЗ-66, позволяющий реализовывать предложенный метод обработки.

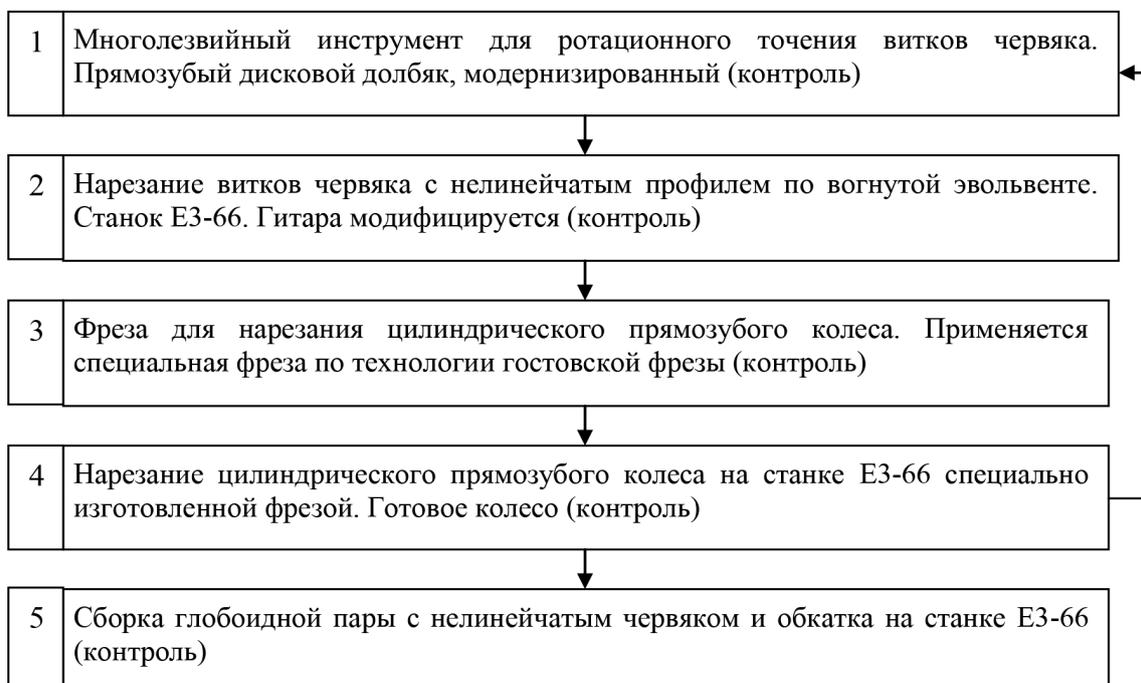


Рис. 1. Технологическая схема для изготовления профильно-сопряженной червячной пары

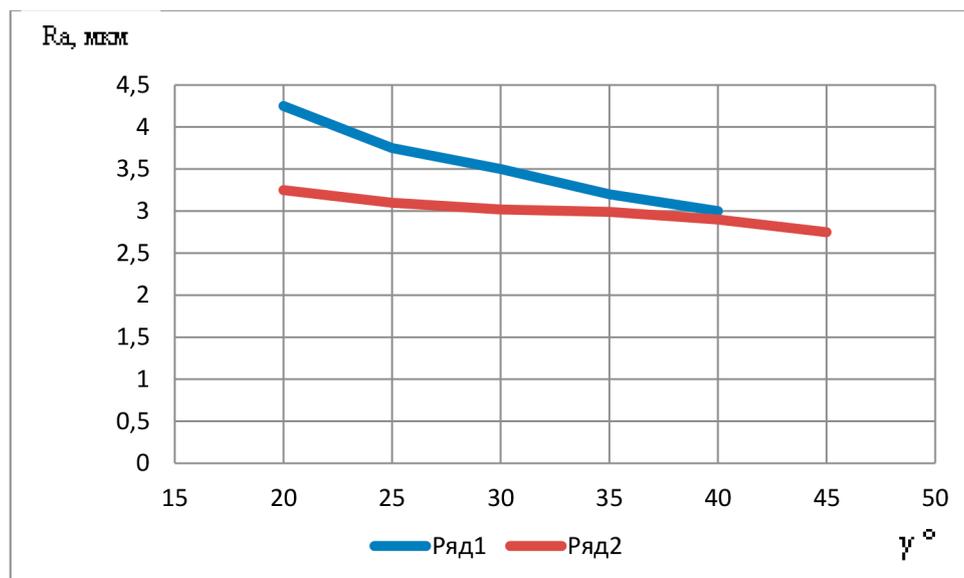


Рис. 2. Зависимость шероховатости глобоидной ВП червяка из стали 40Х вогнутого профиля от величины переднего угла γ режущего инструмента: 1 – при скорости резания $V=26$ м/мин, подачи инструмента $S=2$ мм/об.; 2 – при скорости резания $V=32$ м/мин, подачи инструмента $S=2$ мм/об.

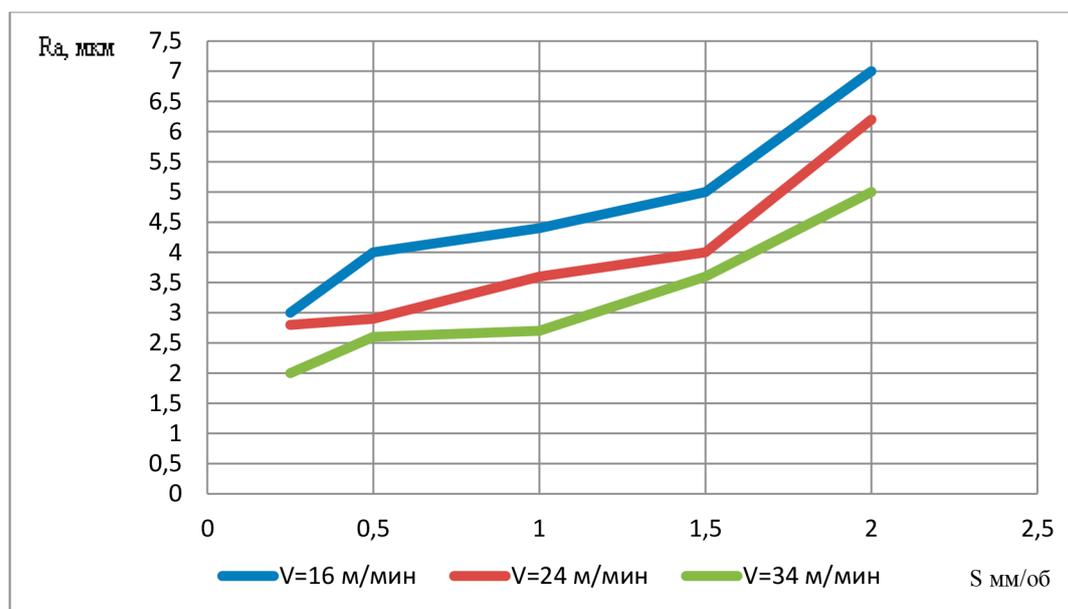


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности витков червяка, выполненного из стали 40ХН, от скорости резания V и радиальной подачи S

При проведении экспериментов использовался многолезвийный инструмент, изготовленный из быстрорежущей стали Р6М5 для ротационного нарезания витков червяка, с числом режущих элементов $z=20$, модулем $m=5$. Червяк с вогнутым профилем витков изготавливали из сталей 40Х и 40ХН.

На рисунке 2 показаны графики изменения шероховатости обрабатываемой глобоидной винтовой поверхности (ВП) вогнутого профиля червяка, выполненного из стали 40Х, от скорости резания V , радиальной подачи S и переднего угла режущего элемента γ .

На рисунке 3 показано изменение шероховатости поверхности от скорости резания

V и радиальной подачи S при ротационном точении глобоидной винтовой поверхности вогнутого эвольвентного профиля червяка, выполненного из стали 40ХН.

Установлена эмпирическая зависимость шероховатости $Ra=f(\gamma, V, S)$ в пределах $Ra=2,8-6,5$ мкм винтовой поверхности глобоидного червяка с вогнутым профилем от технологических режимов: в интервале скорости резания 16–34 м/мин, величины подачи инструмента $S=0,5-2$ мм/об. инструмента, переднего угла режущего элемента многолезвийного инструмента $\gamma=20^\circ-45^\circ$. Показано, что наиболее рациональными режимами и геометрическими параметрами режущей части, обеспечивающими более низкую шероховатость поверхности глобоидного червяка ротационным точением при черновой обработке, являются скорость резания 26–34 м/мин, радиальная подача 1,5–2 мм/об. при переднем угле режущего элемента $42-45^\circ$. При снижении радиальной подачи S до 0,25–0,5 мм/об. возможно снижение шероховатости обрабатываемой поверхности глобоидного червяка до Ra 2,8 мкм на чистовых режимах.

Определение погрешности винтовой поверхности по шаговым размерам и профилю производили при помощи координатно-измерительной машины (КИМ) RommerArm с погрешностью $\pm 0,016$ мм и объемной погрешностью 0,023 мм. Погрешность обработки витков глобоидного червяка на черновых операциях соответствовала 9–8-й степени точности, а на чистовых операциях – 7-й степени точности. Во время ротационного точения процесс резания осуществляется прерывисто, при этом образуется элементная стружка, что повышает травмобезопасность по сравнению с обработкой червяка непрерывно резцом, когда процесс обработки связан с трением скольжения и при этом образуется сливная стружка. При ротационном точении многолезвийным принудительно вращаемым инструментом наблюдается трение скольжения и трение качения, что позитивно сказывается на температурном режиме в зоне резания и стойкости режущих элементов многолезвийного инструмента.

Температура во время ротационного точения витков глобоидного червяка замерялась бесконтактным способом при помощи тепловизора модели HotFindDTX. На поверхности стружки в зоне резания при ротационном точении температура составляет $47,5-273,5^\circ\text{C}$, режущего лезвия инструмента, изготовленного из быстрорежущей стали P6M5, на выходе из зоны резания – $47,5-265,5^\circ\text{C}$. Температуры оценивались в про-

цессе проведения экспериментов на основании полученных термограмм.

Известно, что изготовление червяка и колеса с радиусным профилем червячной передачи не позволяет улучшить сопротивление заеданию зубьев колеса и витков червяка, а также не обеспечивает низкое трение скольжения и износостойкость, поэтому одну из деталей выполняют из антифрикционного материала, например бронзы.

Такая технология не всегда обеспечивает высокий ресурс на всех режимах работы червячной передачи. В связи с указанными недостатками могут также применяться слоистые твердые смазки для нанесения плазменным методом, способные работать в тяжелых условиях. Предложено применять никель в качестве связующего. Никель имеет коэффициент линейного температурного расширения $13,4 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, близкий к коэффициенту линейного расширения стали $12,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Никель является связующей металлической матрицей с равномерно распределенным в ней слоистыми частицами: дисульфида молибдена, графита и графеновых нанотрубок. Такие композиционные системы антифрикционных покрытий способны сочетать в себе высокие показатели износостойкости, а также могут сохранять свои механические свойства при низких и высоких температурах – от -140°C до $+400^\circ\text{C}$. Наряду с увеличением пластичности и теплопроводности антифрикционного твердосмазочного покрытия металлическое связующее никель способствует образованию более равномерной микроструктуры, что, в свою очередь, обеспечивает хорошие показатели когезии компонентов, входящих в антифрикционный слой. Плазменное напыление является технологичным способом, позволяющим формировать качественные антифрикционные слои достаточно простым и экономичным методом.

Заключение

Глобоидные червячные передачи превосходят цилиндрические по нагрузочной способности (в 2–3 раза), КПД, надежности и долговечности. Перспективным является применение профильно-сопряженных червячных пар радиусного профиля для повышения эксплуатационных параметров червячных передач. Необходимо отметить благоприятное сочетание вогнутой эвольвентной поверхности витка червяка и выпуклой эвольвентной поверхности зубьев колеса, которые обеспечивают увеличение пятна контакта и лучшую смазку при соприкосновении рабочих поверхностей сопряженной

червячной пары. Это позволяет изготавливать редукторы с высокими эксплуатационными параметрами. Угол подъема витка изменяется по длине глобоидного червяка, принимая максимальное значение в его горловом сечении и минимальное у краев. Такая конфигурация позволяет обеспечить плавность зацепления. В передачах с эвольвентным червяком, по сравнению с другими червяками, улучшен геометрический контакт, повышены контактная прочность, КПД и износостойкость. Однако из-за сложности изготовления профильно-сопряженных червячных пар радиусного профиля глобоидные червячные профильно-сопряженные передачи имеют в настоящее время ограниченное применение. Нелинейчатые винтовые поверхности червяков (вогнутый эвольвентный профиль) и червячных колес (выпуклый эвольвентный профиль) эффективно обрабатываются методом ротационного точения с многолезвийным инструментом, обеспечивающим снижение трудоемкости. При ротационном точении в несколько раз повышается стойкость режущих элементов многолезвийного инструмента за счет снижения трения и тепловой нагрузки, что способствует обеспечению точности и повышению производительности при изготовлении витков глобоидного червяка с вогнутым профилем.

Поддержание локализованного контакта на протяжении всего диапазона передаваемых усилий в силовых глобоидных передачах является необходимым условием для минимизации износа и ускорения процесса приработки.

Производство червячных передач направлено на получение эксплуатационных свойств, соответствующих нормативным документам, с условием локализации пятна контакта в заданной области поверхности зуба и без стадии дополнительной прира-

ботки. Плавность работы передачи зависит от сочетания погрешностей шагов P_g витков червяка и P_k зубьев колеса. При изготовлении глобоидного червяка и зубчатого колеса по разработанной технологии можно увеличить суммарное пятно контакта в 1,4–1,5 раза.

Список литературы

1. Балдин В.А. Детали машин и основы конструирования. Передачи. М.: Юрайт, 2024. 333 с.
2. Radzevich S.P., Storchak M. *Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design* // Springer. 2022. 629 p. DOI: 10.1007/978-3-030-92262-7.
3. Сандлер А.И., Лагутин С.А., Верховский А.В. Производство червячных передач / под общ. ред. С.А. Лагутина. М.: Машиностроение, 2008. 271 с.
4. Сандлер А.И., Лагутин С.А., Гудков Е.А. Технология продольной локализации контакта в червячных передачах // СТИН. 2013. № 12. С. 24-31.
5. Шадский Г.В., Фефилова И.И. Конструкторско-технологические особенности червячной передачи с цилиндрическим червяком // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 8-2. С. 316-322.
6. Малько Л.С., Сулягин А.В., Трифанов И.В., Захарова Н.В., Суханова О.А. Экспериментальная оценка конструкторско-технологических решений при зубообработке сопряженных звеньев глобоидной передачи с исходным цилиндрическим эвольвентным колесом // СТИН. 2020. № 10. С. 16-21.
7. Сулягин А.В., Малько Л.С., Трифанов И.В. Влияние технологических режимов на выходные параметры процесса ротационного точения винтовой поверхности глобоидного червяка // Фундаментальные исследования. 2016. № 2-1. С. 99-103.
8. Dudás I. *The theory and practice of worm gear drives*. // Butterworth-Heinemann. 2005. 320 p.
9. Парфенов В.Э., Хандожко А.В., Киричек А.В. Конструкция черновой червячной фрезы для обработки зубчатого колеса крупного модуля // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 7(80). С. 23-29.
10. Суханова О.А., Малько Л.С., Захарова Н.В., Трифанов И.В., Патраев Е.В. Способ изготовления глобоидно-цилиндрической передачи с нелинейчатым червяком // Патент РФ № 2803611. Патентообладатель СибГУ им. М.Ф. Решетнева. 2023. Бюл. №26.
11. Иванов М. Н. Детали машин. М.: Юрайт, 2024. 457 с.