

Научная статья

УДК 621.941.01

doi:

Особенности проектирования инструмента для физического моделирования процесса шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес

Андрей Андреевич Маликов¹, д.т.н.,

Андрей Викторович Сидоркин², к.т.н.,

Юрий Вячеславович Ковалев³, аспирант.

^{1, 2, 3} Тульский государственный университет, Тула, Россия

¹ tppizi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6757-5584>

² alan-a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ y@vkvov.me, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

***Аннотация.** Рассмотрены аспекты проектирования специальной конструкции комбинированного режущее-деформирующего инструмента для изучения основных характеристик протекания процесса чистовой зубообработки цилиндрических колес шевингованием-прикатыванием. Существенное внимание уделено вопросам формообразования основных режущих элементов инструмента и возможности его изготовления в условиях современного инструментального производства. Обоснована необходимость использования цельной конструкции инструмента в разрезе его работы по аналогии с процессом точения.*

Ключевые слова: шевингование-прикатывание, цилиндрические колеса, процесс, инструмент, резец, проектирование, твердотельное моделирование

Для цитирования: Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ковалев Ю.В. Особенности проектирования инструмента для физического моделирования процесса шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 5 (143). С. 8–14. doi:

Peculiarities of tool design for physical modeling of shaving-rolling cylindrical gear-wheels

Andrey A. Malikov¹, D. Eng.,

Andrey V. Sidorkin², PhD. Eng.,

Yuri V. Kovalev³, PG student.

^{1, 2, 3} Tula State University, Tula, Russia

¹ tppizi@yandex.ru,

² alan-a@mail.ru,

³ y@vkvov.me

***Abstract.** Projection aspects of a combined cutting and deforming tool special design for studying the main characteristics of finishing gear-working of shaving-rolling cylindrical gear wheels. Large focus is given to the issues of shaping the main cutting elements of the tool and the possibility of its manufacture in the conditions of modern tool production. The necessity of using an integral tool design in the context of its operation in a manner similar to the turning process is substantiated.*

Keywords: shaving-rolling on, cylindrical wheels, process, tool, cutter, design, solid modeling

For citation: Malikov A.A., Sidorkin A.V., Kovalev Yu.V. Peculiarities of tool design for physical modeling of shaving-rolling cylindrical gear-wheels / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 5 (143). P. 8–14. doi:

Введение

В Тульском государственном университете на протяжении последних десятилетий

серьезное внимание уделяется аспектам построения высокопроизводительных ресурсосберегающих процессов комбинированной

(режуще-деформирующей) чистовой и отделочной зубообработки цилиндрических зубчатых колес (ЦЗК). В многочисленных работах профессоров Е.Н. Валикова, А.С. Ямникова, О.И. Борискина и их учеников, в частности [1 – 3], отмечается высокая эффективность процесса шевингования-прикатывания для чистовой стадии зубообработки при обеспечении стабильно высоких точностных и качественных параметров венцов, обрабатываемых ЦЗК.

Дальнейшее экспериментальное исследование рассматриваемого процесса подразумевает обработку партий из нескольких тысяч ЦЗК с использованием специализированного технологического оборудования, что в условиях современных реалий, в рамках чисто академического исследования (проводимого на кафедре вуза без какой-либо поддержки со стороны промышленных предприятий), представляется малоосуществимым. Следовательно,

физическое моделирование процесса шевингования-прикатывания ЦЗК в процессе точения, при использовании метода аналогии в кинематике и режимах резания, позволяет с высокой степенью точности изучить ход протекания процесса комбинированной чистовой зубообработки и механизм износа зубьев режуще-деформирующего инструмента, задействованного в нем [4].

Основные принципы и граничные условия построения модели

Для реализации моделирования необходимо спроектировать специальный инструмент – резец, целиком выполняемый, по аналогии с шевром-прикатником, из быстрорежущей стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265-73), закаляемый до твердости 60...65 HRC [3] и имитирующий один из его режущих зубьев (рис. 1).

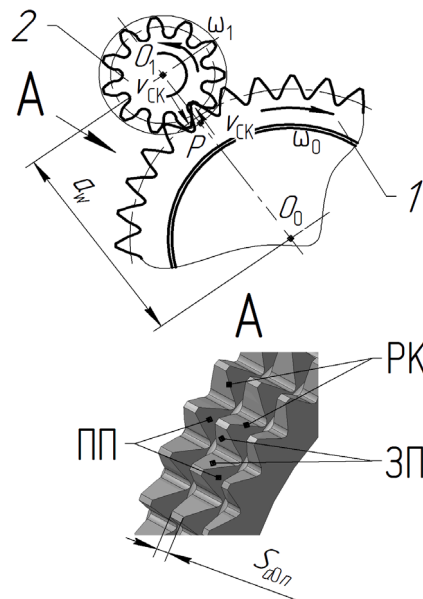


Рис. 1. Схема зубообработки ЦЗК шевингованием-прикатыванием и полутоновой фрагмент аксонометрии комбинированного инструмента:

1 – инструмент; 2 – обрабатываемое ЦЗК; P – полюс зацепления; a_w – номинальное межосевое расстояние; ω_1 и ω_0 – угловые скорости обрабатываемого ЦЗК и инструмента; $v_{ск}$ – скорость скольжения боковых поверхностей зубьев; $S_{д0л}$ – толщина зуба на окружности вершин инструмента; РК – режущие кромки; ПП – передние поверхности; ЗП – задние поверхности

Воспользовавшись методами курса «Начертательная геометрия» [5] и возможностями системы графического моделирования, предоставляемыми, например САПР «Компас» фирмы «АСКОН», можно составить схему для определения положения и координат точек сечений передних поверхностей резца во вспомогательных плоскостях – нижней (н.п.) и

верхней (в.п.) (рис. 2). Данные плоскости, для удобства дальнейших построений, можно считать равноудаленными, соответственно, от основной плоскости резца и его плоскости прижима на расстоянии ΔH (для рассматриваемого примера ΔH удобно принять равному 1,0 мм) и параллельными им.

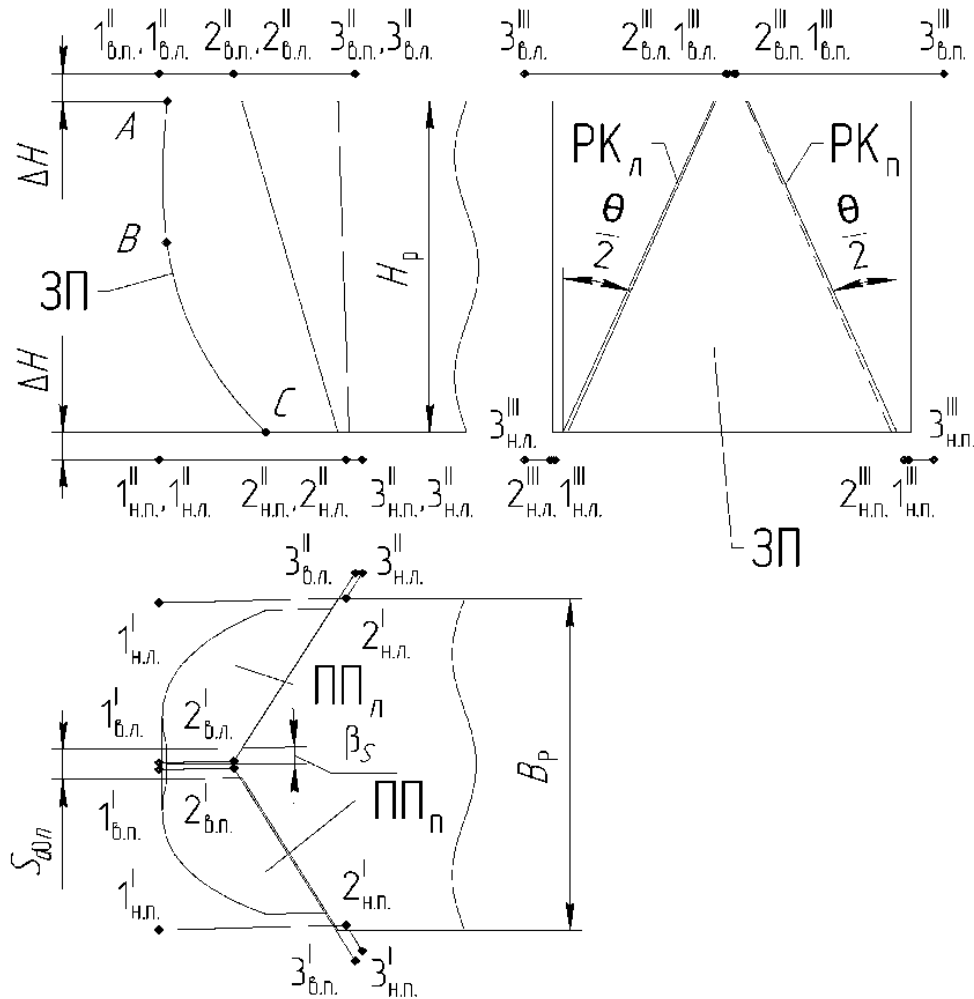


Рис. 2. Схема определения координат точек сечений передних поверхностей резца во вспомогательных плоскостях н.п. и в.п.

Рабочий участок AB , профилирующий заднюю поверхность (ЗП) очерчен боковой поверхностью эвольвентного профиля зуба инструмента (см. рис. 1). Нерабочий участок BC ЗП, в свою очередь, очерчен дугой окружности, плавно сопрягаемой с эвольвентой AB . Таким образом, задняя поверхность AC ограничивается основной плоскостью резца и параллельной ей плоскостью прижима.

Исходными параметрами для моделирования инструмента, помимо координат точек, формирующих эвольвентную заднюю поверхность AB , являются:

а) высота резца H_p (для рассматриваемого примера $H_p = 12$ мм); ширина резца B_p (для рассматриваемого примера $B_p = 12$ мм);

б) угол разворота правой ($ПП_{п}$) и левой ($ПП_{л}$) передних поверхностей резца β_s (для рассматриваемого примера $\beta_s = 1^{\circ}30'$) равный углу подъема винтовой стружечной канавки на

шевере-прикатнике и аналогичный углу γ для классического токарного резца;

в) толщина зуба инструмента на плоскости прижима, идентичная толщине зубьев шевера-прикатника на окружности вершин в направлении линии зуба $S_{доп}$, которая в свою очередь зависит от шага винтовой линии стружечной канавки $P_{винт}$, угла наклона ее боковых стенок θ [1, 3, 4] (для рассматриваемого примера при $P_{винт} = 6$ мм; $\theta = 45^{\circ}$, $S_{доп} = 1,08$ мм);

г) углы наклона правой $РК_{п}$ и левой $РК_{л}$ режущих кромок $\theta/2$ инструмента (для рассматриваемого примера $\theta/2 = 22^{\circ}30'$), которые по своему функционалу аналогичны углу λ для классического токарного резца.

Кроме рассмотренных выше основных конструктивных параметров существует также и ряд вспомогательных:

а) углы скосов между передними поверхностями резца и его боковыми гранями (в горизонтальной плоскости), которые назначаются из

конструктивных соображений (для рассматриваемого примера принимаются равными 60°);

б) угол наклона линии скосов между передними поверхностями резца и его боковыми гранями (в вертикальной плоскости), которые назначаются из конструктивных соображений (для рассматриваемого примера принимается равным 15°).

В результате графического моделирования в САПР получены координаты

точек: $1_{в.п.}...3_{в.п.}$, $1_{н.п.}...3_{н.п.}$; $1_{в.л.}...3_{в.л.}$, $1_{н.л.}...3_{н.л.}$, задающие линии пересечения ПП_п, ПП_л и поверхностей правого и левого скосов с в.п. и н.п. Практическое значение имеют координаты точек и, соответственно, линии пересечения, построенные по ним в горизонтальной проекции эскиза. Указанные линии могут быть легко импортированы САПР «Компас-3D» (рис. 3) и использованы, наряду с линией AC, для создания твердотельной модели резца.

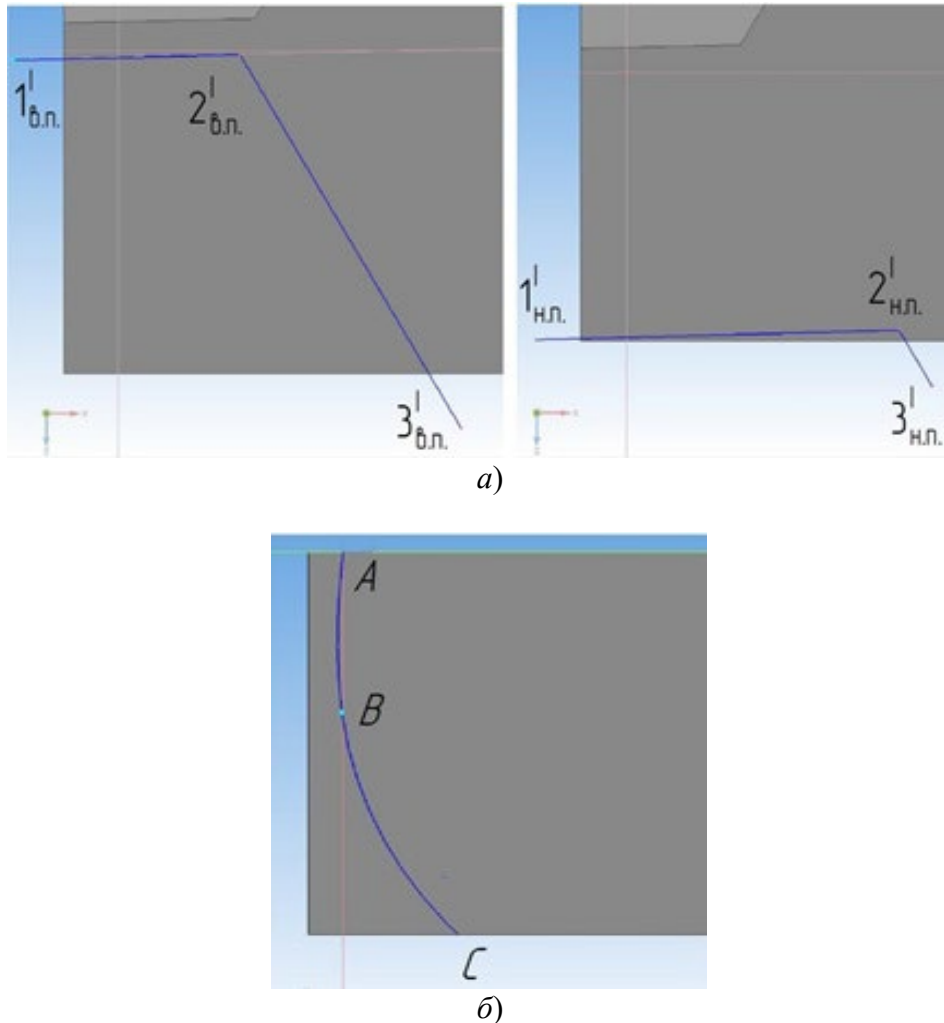


Рис. 3. Иллюстрация процедуры импортирования точек, определяющих положение правой передней поверхности инструмента и поверхности скоса (а), а также линии – задней поверхности (б), САПР «Компас-3D»

Особенности процедуры твердотельного моделирования инструмента

Дерево построения модели, приведенное на рис. 4, позволяет наглядно проследить процедуру построения твердотельной модели инструмента. Первоначально в заданной пространственной системе координат выполняется построение прямоугольника и выдавливание прямоугольного параллелепипеда,

образующего тело цельного резца и имеющего размеры $H_{рх}$, $B_{рх}$, $L_{р}$.

Контур, очерчивающий заднюю поверхность инструмента, приводится в виде эскиза, по которому в дальнейшем происходит его вырезание из объема тела резца.

Введение дополнительных плоскостей н.п. и в.п. позволяет разместить в них линии пересечения передних поверхностей и скосов инструмента. Линии приводятся в отдельных

эскизах для правой и левой сторон инструмента. Двугранные углы переменного профиля, образованные пересечением плоскостей, образующих передние поверхности и скосы резца получаются путем реализации процедур «вырезания элемента выдавливанием». Так как рассматриваемые поверхности – линейчатые, необходимым и достаточным условием для их построения в пространстве является задание их линий пересечения с двумя плоскостями – н.п. и в.п.

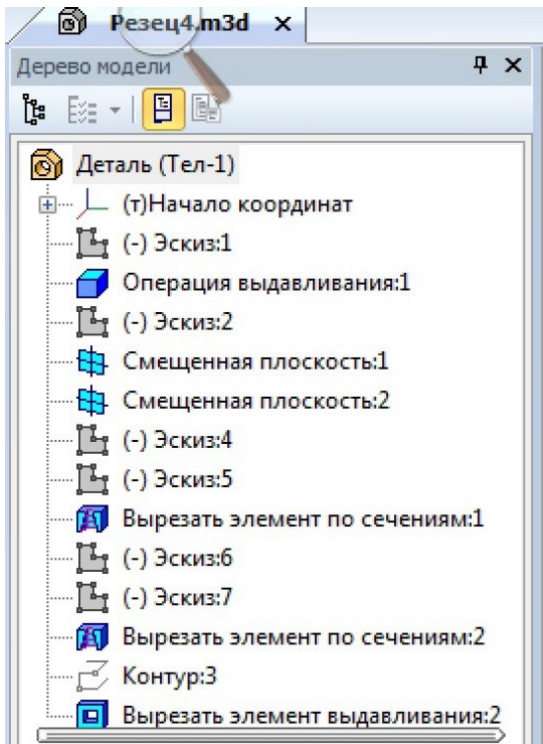


Рис. 4. Пример реализации дерева построения твердотельной модели инструмента в САПР «Компас-3D»

Результатом построения является твердотельная модель инструмента, приведенная на рис. 5. Ввиду того, что резец имеет небольшие габаритные размеры в поперечном сечении: для исследований, проводимых в лабораторных условиях достаточным можно считать габарит 12x12 мм [4, 6], его режущие элементы целесообразно получать методом электроэрозионной обработки на станке с ЧПУ, позволяющим добиться высокой точности геометрических параметров режущих элементов – ± 2 мкм и низкой их шероховатости $Ra = 0,32$ мкм [7, 8]. Перед электроэрозионной обработкой тело резца – прямоугольный параллелепипед, предварительно обрабатывается резанием, закаливается и шлифуется по базовым поверхностям.

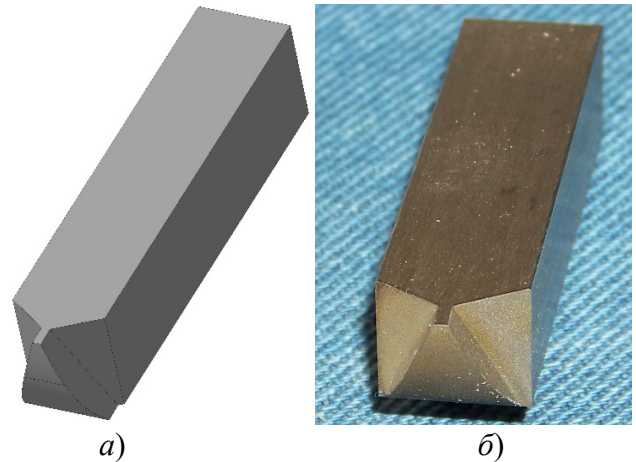


Рис. 5. Твердотельная модель (а) и фотография (б) полученного инструмента

Основные выводы и результаты

При необходимости по твердотельной модели может быть построен стандартный двумерный графический документ (рис. 6), позволяющий произвести технологическую подготовку процесса изготовления резца в условиях инструментального производства. Графический документ содержит необходимые виды, имеет в своем составе дополнительный элемент – увеличенный профиль эвольвентной задней поверхности инструмента. Также в документе представлена таблица координат опорных точек рабочего эвольвентного участка задней поверхности. Указанные координаты позволяют осуществить сплайновую интерполяцию, удобную для подготовки управляющей программы при профильной электроэрозионной обработке задней поверхности резца.

Стоит отметить, что электроэрозионная обработка на станке с ЧПУ является, в данном случае, предпочтительной, так как при ней действует универсальное высокоточное оборудование, которым оснащаются современные инструментальные производства. Использование оптикошлифовальных станков на данной операции существенно повышает требования к квалификации рабочего, увеличивает трудоемкость изготовления инструмента и снижает точность и качество обработки. Применение шлифовальных станков с ЧПУ также затруднительно ввиду их дороговизны и относительно малой распространённости и доступности в инструментальном производстве.

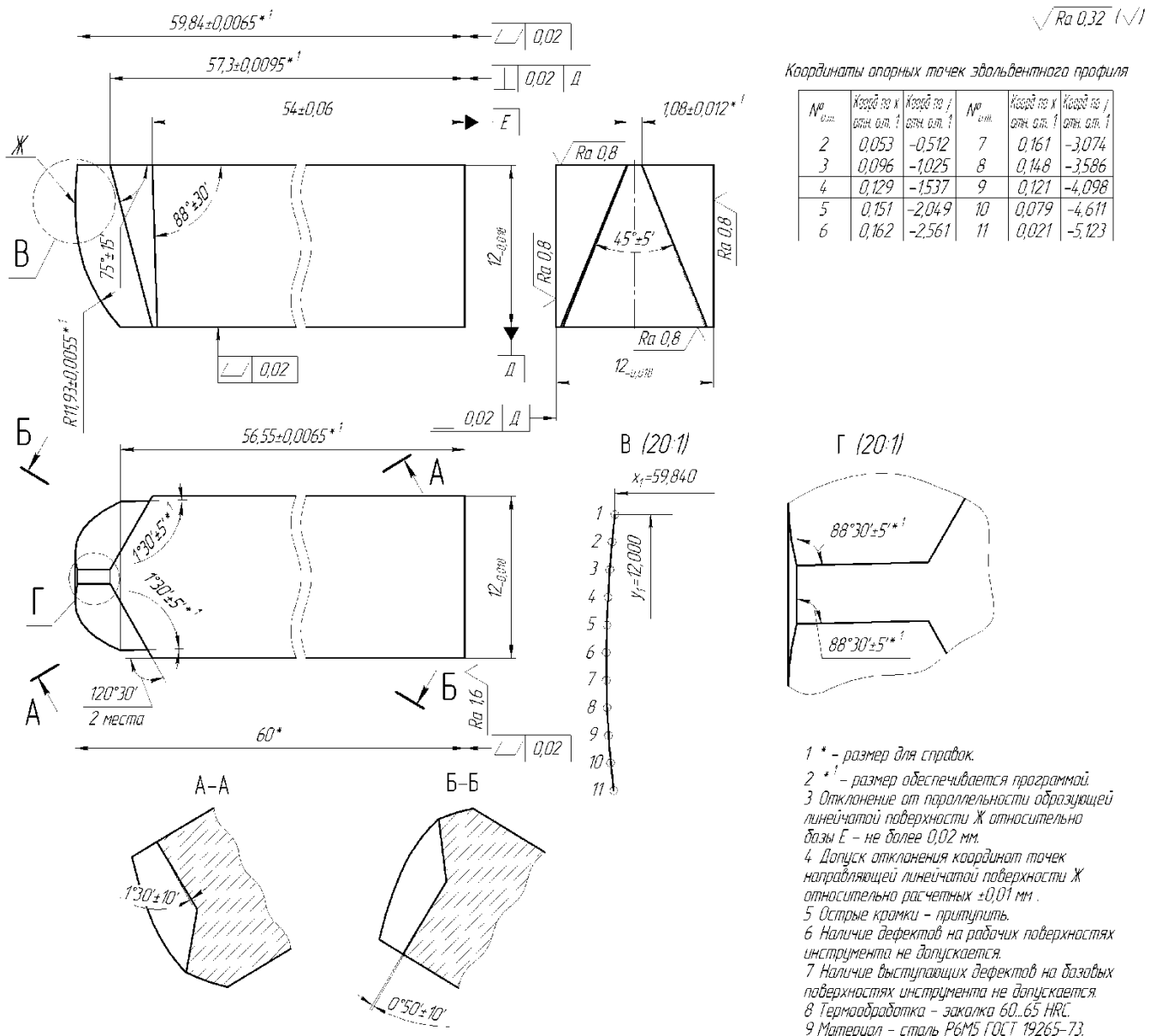


Рис. 6. Эскиз инструмента

Таким образом, в результате применения процедуры проектирования и рекомендаций по изготовлению, описанных в настоящей статье, получен специальный инструмент – резец (см. рис. 5), позволяющий произвести физическое моделирование процесса комбинированной чистовой зубообработки ЦЗК шевингованием-прикатыванием с высокой степенью подобия. При этом, форма и характер расположения зоны контактирования поверхностей обрабатываемой заготовки и инструмента не противоречат основным аспектам теории зубчатого зацепления, рассмотренным, в частности, в работах [9 – 12].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Борискин О.И., Валиков Е.Н., Белякова В.А. Комбинированная обработка зубьев цилиндрических зубчатых колес шевингованием – прикатыванием: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 123 с.
2. Валиков Е.Н., Белякова В.А. Режущо-деформирующая чистовая обработка боковых поверхностей зубьев зубчатых колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 216 с.
3. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С. Инновационные технологии обработки зубьев цилиндрических колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 335 с.
4. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ковалев Ю.В. Концептуальные основы физического моделирования процесса шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // СТИН. 2022. № 2. С. 2–7.

5. **Гордон В.О., Семенцов-Огиевский М.А.** Курс начертательной геометрии: Учеб. пособие для вузов / под ред. В.О. Гордона и Ю.Б. Иванова. – 24-е изд., стер. М.: Высшая шк., 1998. 272 с.

6. **Металлорежущие инструменты:** учебник для вузов по специальности «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты» / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.

7. **Alam M.N., Siddiquee A.N., Khan Z.A.** A comprehensive review on wire EDM performance evaluation // Journal of process mechanical engineering. 2022. V. 236 (4). P. 1724–1746.

8. **Joshi A.** Wire cut EDM process limitations for tool and die steel // International journal of technical research and application. 2014. №2. P. 65–68.

9. **Litvin F.L., Chen N.X., Hsiao C.L., Handschuh R.F.** Generation of Helical gears with new surfaces topology by application of CNC machines // Gear technology. 1994. January/February. P. 30–33.

10. **Litvin F.L., De Donno M., Lian Q., Lagutin S.A.** Alternative Approach for Determination of Singularities and Envelopes to a Family of Parametric Surfaces // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 1998. No 167. P. 153–165.

11. **Litvin F.L., Fuentes A.** Gear geometry and Applied theory. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, 2004, 800 pp.

12. **Radzevich S.P.** Gear Cutting Tools: Science and Engineering, 2nd Edition, Boca Raton, Florida, 2017, 564 pp.

REFERENCES

1. Boriskin O.I., Valikov E.N., Belyakova V.A. Combined technique for shaving-rolling cylindrical cog-wheel teeth: monograph. Tula: Izdatelstvo TulGU, 2007, 123 p. (in Russian).

2. Valikov E.N., Belyakova V.A. Cog-wheel side surface cutting-deforming finishing: monograph. Tula: Izdatelstvo TulSU, 2011. 216 p. (in Russian).

3. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Yamnikov A.S. Innovative technologies of processing of teeth of cylindrical wheels: monograph. Tula: IzdatelstvoTulSU, 2011, 335 p.

4. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Kovalev Yu.V. Conceptual foundations of physical modeling for shaving-rolling cylindrical gears // STIN, 2022, no. 2, pp. 2–7.

5. Gordon V.O., Sementsov-Ogievsky M.A. Course of descriptive geometry: Textbook for universities / edited by V.O. Gordon and Yu.B. Ivanov. – 24-th ed., ster. Moscow: Higher School, 1998, 272 p.

6. Metal-cutting tools: textbook for higher education institutions on specialties «Technology of Mechanical Engineering», «Metal-cutting machines and tools» / G.N. Sakharov, O.B. Arbuzov, Yu.L. Borovoy, et. al. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 328 p. (in Russian).

7. Alam M.N., Siddiquee A.N., Khan Z.A. A comprehensive review on wire EDM performance evaluation // Journal of process mechanical engineering. 2022. V. 236 (4). P. 1724–1746.

8. Joshi A. Wire cut EDM process limitations for tool and die steel // International journal of technical research and application. 2014. №2. P. 65–68.

9. Litvin F.L., Chen N.X., Hsiao C.L., Handschuh R.F. Generation of Helical gears with new surfaces topology by application of CNC machines // Gear technology. 1994. January/February. P. 30–33.

10. Litvin F.L., De Donno M., Lian Q., Lagutin S.A. Alternative Approach for Determination of Singularities and Envelopes to a Family of Parametric Surfaces // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 1998. No 167. P. 153–165.

11. Litvin F.L., Fuentes A. Gear geometry and Applied theory. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, 2004, 800 pp.

12. Radzevich S.P. Gear Cutting Tools: Science and Engineering, 2nd Edition, Boca Raton, Florida, 2017, 564 pp.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.12.2022; одобрена после рецензирования 20.03.2023; принята к публикации 29.03.2023

The article was submitted 29.12.2022; approved after reviewing 20.03.2023; assepted for publication 29.03.2023

