

2. Pat. No.2457926 RF, IPC V23V 29/034. Cutter / Gusev V.G., Selivanov A.M., Shvagirev P.S.; applied 08.04.2011, published 10.08.2012. *Bull. No.22.*

3. Pat. 2615965 RF, IPC V21V 21/00. Combined Shake-Proof Tool / Gusev V.G., Selivanov A.M.; applied 19.10.2015, published 11.04.2017. *Bull. No.11.*

4. Gusev, V.G., Selivanov, A.M. Cutter for reparative processing openings with uneven allowance: *Proceedings of the Inter. Scientific Pract. Conf. "Modern Materials, Engi-*

neering and Technology"; - Kursk: SWSU, 2011. – pp. 99-101. ISBN 978-5-905556-05-0.

5. Gusev, V.G., Lazarev, A.V., Selivanov, A.M. Elastic displacement simulation of cutter plates at hole countersinking in COSMOS WORKS program // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology.* – 2012. – No.2-6 (292). – pp. 86-91.

Рецензент д.т.н. В.И. Денисенко

УДК 621.9.048.6+669.539.6:621.81.01
DOI: 10.30987/article_5b71326dab0078.99480322

А.А. Маликов, д.т.н.

А.В. Сидоркин, к.т.н.

С.Л. Рахметов, аспирант

(Тулский государственный университет, 300012 г. Тула, пр. Ленина, 92)

E-mail: andrej-malikov@yandex.ru

Определение механизма параметрической взаимосвязи диаметра шевера-прикатника с диаметром обрабатываемого им цилиндрического колеса с круговым зубом

Приводится описание алгоритма расчета и синтеза станочного зацепления шевера-прикатника с цилиндрическим колесом с круговыми зубьями (ЦККЗ) для определения рационального диаметра инструмента по отношению к диаметру обрабатываемого им колеса. Представлена математическая интерпретация условий, ограничивающих существование станочного зацепления инструмент-заготовка.

Ключевые слова: шевер-прикатник; круговые зубья; цилиндрические зубчатые колеса; диаметр вершин; радиус кривизны арки зуба; внеполюсное зацепление.

A.A. Malikov, D. Eng.,

A.V. Sidorkin, Can. Eng.,

S.L. Rakhmetov, Post graduate student

(Tula State University, 92, Lenin Avenue, Tula, 300012)

Definition of parametric correlation mechanism of shaver-roller diameter with diameter of cylindrical wheel with circular tooth worked by it

A description of the algorithm for computation and synthesis of a shaver-roller machine engagement with a cylindrical cog-wheel with circular teeth (CCCT) for the definition of a tool rational diameter with respect to the diameter of the wheel worked by it is shown.

A mathematical interpretation of conditions limiting the tool-blank machine engagement presence is presented.

Keywords: shaver-roller; circular teeth; cylindrical cog-wheels; top diameters; tooth arch curvature diameter; off-pole mesh.

Для передачи крутящего момента в зубчатых передачах, наравне с цилиндрическими прямозубыми колесами, могут быть успешно использованы цилиндрические колеса с кру-

говыми зубьями (ЦККЗ), которые, в свою очередь, за счет особенности конструкции зубьев, обладают большей плавностью хода, грузонесущей способностью, лучшими массогабарит-

ными характеристиками, меньшей шумностью [1].

Для чистовой обработки боковых поверхностей зубьев ЦККЗ, с целью повышения их точности и качества, целесообразно использовать шевера-прикатники, имеющие диаметры вершин $2r_{a0}$, которые следует рассчитывать и изготавливать для каждого колеса зубчатой пары, имеющих диаметры $2r_{a1}$ и $2r_{a2}$ (рис. 1). Минимальный радиус кривизны арки зуба r_{imin} определяется конструкцией инструмента, а для колеса задается как $r_{0emin} = r_{1imin}$ [2].

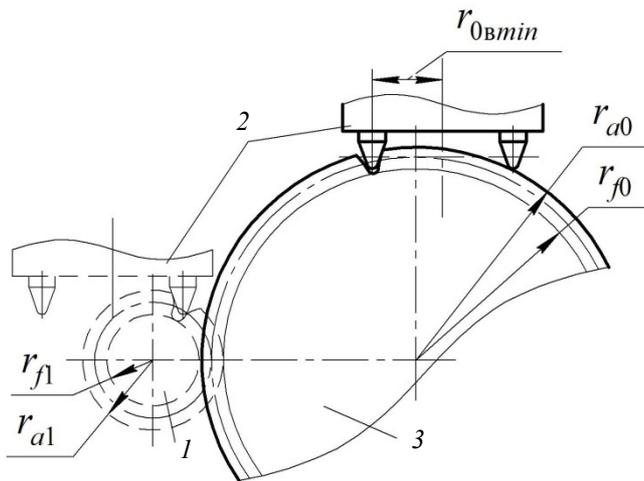


Рис. 1. Схема обработки выпуклой стороны зуба шевера-прикатника и заготовки ЦККЗ:

1 – заготовка; 2 – режцовая головка; 3 – шевер-прикатник

Ученые-технологи ТулГУ активно занимались изучением процессов формообразования венца комбинированного режуще-деформирующего инструмента с круговым зубом [3 – 6]. Однако вопросу определения диаметра инструмента $2r_{a0}$ и изучения его зависимости от диаметра обрабатываемого колеса $2r_{a1}$ достаточного внимания уделено не было. Также не были изучены аспекты, связанные с формированием рассматриваемого параметра для обеспечения условия внеполюсного зацепления. Эти вопросы являются весьма актуальными, т.к. задают область конструкторско-технологических ограничений, определяющих возможность эффективного изготовления шевера-прикатника в условиях инструментального производства [7].

Для определения диаметра $2r_{a0}$ шевера-прикатника предложена математическая модель, позволяющая рассчитать его ключевые параметры с учетом геометрических ограничений для каждого вида внеполюсного зацеп-

ления: заплоского и предплоского.

Для определения геометрических параметров шевера-прикатника внеполюсного зацепления разработан алгоритм, включающий в себя комплекс условий, при выполнении которых определяется возможность существования такого варианта шевера-прикатника, который обеспечивал бы оптимальную обработку зубчатого колеса с заданным набором геометрических параметров. На них влияют задаваемые пользователем параметры ЦККЗ, такие как: модуль m , числа зубьев z_1 и z_2 , коэффициенты смещения χ_1 и χ_2 обрабатываемого и сопрягаемого с ним колес соответственно.

Предплоское зацепление обеспечивается увеличением радиуса начальной окружности колеса r_{w1} за пределы радиуса вершин r_{a1} , заплоское – уменьшением за пределы радиуса впадин r_{f1} . Радиус r_{w1} является определяющим параметром вида зацепления. Именно по данной окружности происходит качение зубчатого колеса [8]. Для обеспечения заплоского зацепления необходимо соблюдение следующего условия:

$$r_{w1} \leq r_{f1} - 0,2. \quad (1)$$

А для предплоского:

$$r_{w1} \geq r_{a1} + 0,2, \quad (2)$$

где 0,2 мм – минимально допустимое смещение полюса зацепления от окружностей [9]. Однако на практике, как показали расчеты, обеспечение данных условий редко представляется возможным из-за технологических ограничений, которые будут описаны далее.

Для определения оптимального числа зубьев z_{0opt} шевера-прикатника вводится условие выбора их из ряда, задаваемого таким образом, чтобы обеспечивалось минимально возможное отклонение $\Delta_{r_{w1}}$ с учетом ограничений, обусловленных кинематическими параметрами станочного зацепления. В то же время, максимально возможное число зубьев z_{0max} , ограничивается возможностями технологического оборудования. Тогда оптимальное число зубьев z_{0opt} , с учетом рассмотренных ограничений, может выбираться в пределах 10 %-ного уменьшения от максимального рассчитанного числа зубьев z_{0max} , так как в указанном диапазоне прирост эффективности использования инструмента большего диаметра оказывается существенно меньше прироста затрат на его производство и эксплуатацию.

При проектировании шевера-прикатника, как и при проектировании зубчатых колес, необходимо обеспечивать следующие условия:

толщину зуба при вершине $S_{a0} \geq 0,25m$, коэффициент перекрытия в станочном зацеплении $\varepsilon \geq 1,2$ [9], а также достаточную рабочую высоту зуба инструмента для обработки всего активного участка профиля ЦККЗ. Кроме того, возникает ряд ограничений, таких как: при предплюсном зацеплении – подрезание головки зуба; при заплоском – подрезание ножки зуба обрабатываемого колеса. В процессе проектирования шевера-прикатника необходимо учитывать, что боковые поверхности его зубьев не должны иметь подобных недостатков.

В работе [10] определено, что число заходов инструмента не влияет на качество обработки и, тем самым, не определяет шероховатость обрабатываемых поверхностей. Числа зубьев шевера-прикатника и обрабатываемого им колеса не должны иметь общих множителей, что необходимо для обеспечения последовательного продольного смещения следов резцов от кромок, находящихся на зубьях инструмента на всем протяжении линии зуба заготовки, что, в свою очередь, способствует повышению точности и качества обработки. Кроме того, это позволяет уменьшить влияние погрешности шага зубьев инструмента на шаг зубьев колеса.

Для определения ряда чисел зубьев z_0 шевера-прикатника, не имеющих общих множителей с числом зубьев обрабатываемого им колеса, предусмотрена организация программного блока, который осуществляет определение всех чисел, входящих в ряд и подразумевает фильтрацию всех чисел зубьев, как для инструмента z_0 , так и для ЦККЗ z_1 за исключением простых чисел. Затем отбрасывает все варианты чисел зубьев z_0 инструмента, которые имеют хотя бы одно общее простое число с любым числом зубьев ЦККЗ z_1 . В итоге формируется ряд чисел зубьев z_0 инструмента, который возможно использовать при проектировании конструкции шевера-прикатника и обеспечить соблюдение условий, рассмотренных выше.

Важным параметром зубчатого колеса является угол профиля α_y , т.к. он гарантирует само существование эвольвентной поверхности и определяется по зависимости

$$\alpha_y = \arccos \frac{r_{b0}}{r_y},$$

где r_y – радиус концентрической окружности, расположенной между окружностью впадин с радиусом r_f и окружностью вершин с радиу-

сом r_a . Отсюда следует, что для существования угла зацепления, основная окружность r_b должна быть всегда меньше концентрических окружностей, т.е. меньше r_f . При этом условии существует эвольвентное зацепление и обеспечивается качение боковых поверхностей зубьев друг по другу на всем активном участке эвольвентного профиля [8].

При построении зависимости для определения угла зацепления α_{tw0} шевера-прикатника и обрабатываемого колеса используется инвалюта этого угла: $inv\alpha_{tw0} = tg\alpha_{tw0} - \alpha_{tw0}$, для определения которой требуется решение трансцендентного уравнения вида:

$$\alpha_{tw0} = tg\alpha_{tw0} - \frac{2 \cdot \chi_{\Sigma 0} \cdot tg\alpha}{\chi_0 + \chi_1} - inv\alpha_t, \quad (3)$$

где χ_0 – коэффициент смещения инструмента; $\chi_{\Sigma 0}$ – коэффициент суммарного смещения; α – угол профиля; α_t – угол профиля.

Алгоритм решения уравнения (3) построен с использованием математического метода Ньютона.

Коэффициент смещения инструмента определяется по зависимости [10]:

$$\chi_0 = \chi_{\Sigma 0} - \chi_1.$$

Коэффициент суммарного смещения [10]:

$$\chi_{\Sigma 0} = \frac{a_w - a}{m},$$

где a_w – межосевое расстояние; a – делительное межосевое расстояние.

Делительное межосевое расстояние определяется как [8]:

$$a = \frac{(z_0 + z_1) \cdot m \cdot \cos \beta_1}{2}.$$

Межосевое расстояние определяется по формуле [10]:

$$a_w = r_{w1} + r_{w0},$$

где r_{w0} – начальная окружность шевера-прикатника [8]:

$$r_{w0} = \frac{z_0 \cdot P_{w0}}{2 \cdot \pi},$$

где P_{w0} – шаг по начальной окружности инструмента [10]:

$$P_{w0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{w1}}{z_1}.$$

Представленные выше зависимости для

определения радиуса начальной окружности r_{w1} обрабатываемого колеса, носят скорее частный, чем общий характер, потому что существует ряд конструктивных ограничений (далее будут рассмотрены подробно для каждого зацепления в отдельности), препятствующих их выполнению. Их необходимо учитывать, чтобы рассчитать и изготовить шеввер-прикатник, отвечающий, в достаточной мере, эксплуатационным требованиям, таким как: обеспечение высокого качества обрабатываемых поверхностей на протяжении всего периода стойкости инструмента, высокая эффективность обработки, повышенная стойкость инструмента, а также уменьшение рисков его поломки. Поэтому приходится отступать от жестко заданных условий (1) и (2) для достижения поставленной задачи. А именно: при расчете запольного зацепления приходится увеличивать радиус начальной окружности r_{w1} обрабатываемого колеса, а при расчете предпольного – уменьшать. За счет чего полюс зацепления смещается ближе к делительной окружности r_0 шеввера-прикатника.

Известно, что в полюсе зацепления скорости скольжения профилей зубьев, сопряженных друг с другом, равны нулю и увеличиваются при отдалении от него [8]. Для более эффективного протекания процесса резания, в рамках комбинированной зубообработки шевверингованием-прикатыванием, целесообразно увеличивать скорость скольжения профилей зубьев инструмента и обрабатываемого им колеса. Тем самым происходит перераспределение долей резания и поверхностного пластического деформирования в рассматриваемом процессе в пользу первого. Уменьшение скорости скольжения приводит к повышению трения в паре инструмент – заготовка и преждевременному износу инструмента, что неблагоприятно сказывается на качестве обрабатываемых колес.

Рассмотрим особенности построения математической модели и алгоритма расчета станочного зацепления. Блок-схема алгоритма (рис. 2) расчета параметров зацепления содержит ряд условий, которые оказывают непосредственное влияние на расчет геометрических параметров шеввера-прикатника:

1) ввод исходных данных (осуществляется в блоке 2);

2) работа цикла расчета геометрических параметров множества вариантов шеввер-прикатников для ряда чисел зубьев, ограниченного с одной стороны значением z_{min} , определенным по зависимости [8]:

$$z_{min} = \frac{2}{\sin^2 \alpha_{w}}, \quad (4)$$

а с другой – z_{max} , определяемым технологическими возможностями оборудования на котором будет эксплуатироваться инструмент (для предпольного осуществляется в блоках 3, 4 и 19, для запольного – 3, 4, 22);

3) работа цикла проверки условия обеспечения толщины зуба на вершине инструмента:

$$S_{a0} \geq 0,25m$$

(для предпольного и запольного зацепления осуществляется в блоках 5 – 7) [8];

4) работа цикла проверки условия обеспечения коэффициента перекрытия в паре инструмент – заготовка $\varepsilon \geq 1,2$ (для предпольного и запольного зацепления осуществляется в блоках 8 – 10) [8];

5) работа цикла проверки условия обеспечения неподрезания головки зуба обрабатываемого колеса [10]:

$$\frac{r_{a0}}{r_{a1}} \leq \frac{z_0}{z_1}$$

(для предпольного осуществляется в блоках 12 – 14);

6) проверка условия существования внепольного зацепления:

$$(r_{a1} + 0,2 - r_{w1}) \leq \frac{r_{a1} - r_{f1}}{2}$$

(для предпольного осуществляется в блоке 15). Если условие не выполняется, то выводится сообщение о невозможности существования зацепления и осуществляется возврат к блоку 3;

7) проверка условия неподрезания ножки зуба:

$$\operatorname{tg}(\alpha_{w0}) - \frac{z_0}{z_1} (\operatorname{tg} \alpha_{a0} - \operatorname{tg} \alpha_w) \geq 0$$

(для предпольного осуществляется в блоке 17) [8]. Если условие не выполняется, то выводится сообщение о подрезании ножки зуба и осуществляется возврат к блоку 3;

8) работа цикла проверки условия обеспечения высоты активного профиля зуба инструмента, достаточной для обработки зубьев колеса по всей высоте боковой поверхности:

$$r_{a0} - r_{b0} \geq r_{a1} - r_{f1}$$

(для запольного осуществляется в блоках 12 – 14), где r_{b0} – радиус начальной окружности инструмента;

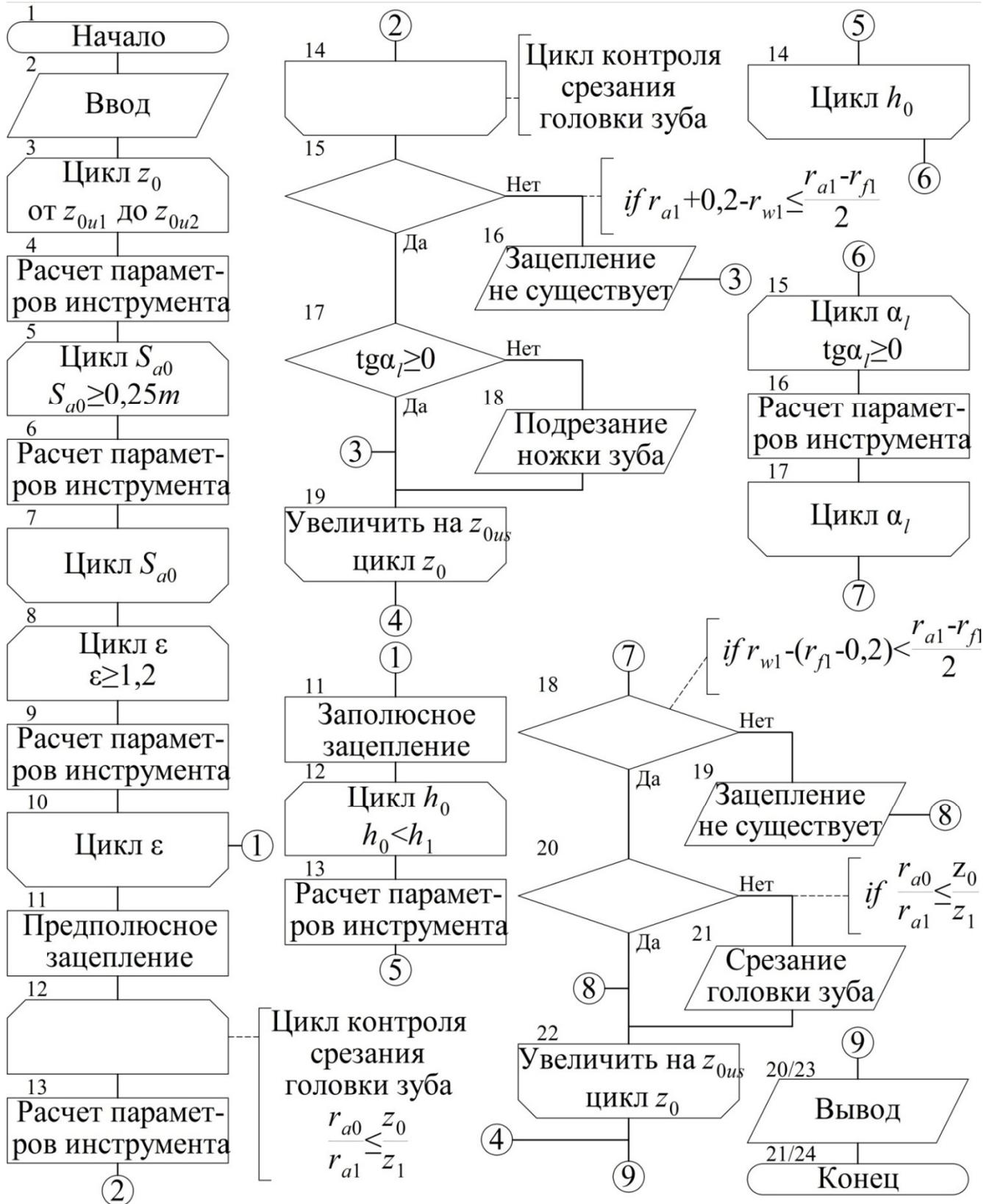


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы программы при расчете станочного зацепления

9) цикл определения условия обеспечения неподрезания ножки зуба обрабатываемого колеса:

$$\operatorname{tg}(\alpha_{w0}) - \frac{z_0}{z_1} (\operatorname{tg} \alpha_{a0} - \operatorname{tg} \alpha_w) \geq 0$$

(для заплоского осуществляется в блоках 15 – 17) [8];

10) проверка условия существования вне-полюсного зацепления в паре инструмент – заготовка:

$$r_{w1} - (r_{f1} - 0,2) < \frac{r_{a1} - r_{f1}}{2}$$

(для заплоского осуществляется в блоке 18). Если условие не выполняется, то выводится сообщение о невозможности существования зацепления и осуществляется возврат к блоку 3;

11) проверка условия неподрезания головки зуба обрабатываемого колеса [10]:

$$\frac{r_{a0}}{r_{a1}} \leq \frac{z_0}{z_1}$$

(для заплоского осуществляется в блоке 20). Если условие не выполняется, то выводится сообщение о срезании головки зуба и осуществляется возврат к блоку 3;

12) вывод данных, выполняется после определения всех геометрических параметров шевера-прикатника для каждого варианта числа зубьев z_0 для предплоского осуществляется в блоке 20, для заплоского – 23).

Стоит отметить, что условия, изложенные в п. 3 – 11), уменьшают радиус начальной окружности r_{w1} . Результаты выполнения или невыполнения условий, указанных в п. 6 и 7 можно лишь констатировать. По аналогии с расчетом предыдущего вида зацепления здесь возможно обеспечить условия, описанные в п. 3, 4, 8, 9, можно обеспечить за счет увеличения радиуса начальной окружности r_{w1} . Результаты выполнения или невыполнения условий, изложенных в п. 10 и 11, можно лишь констатировать, т.к. при увеличении радиуса начальной окружности r_{w1} отрицательный эффект лишь усугубляется, а уменьшение r_{w1} невозможно.

Таким образом, сформирована математическая модель и алгоритм расчета, позволяющие определить оптимальный диаметр $2r_{a0}$ шевера-прикатника, которые позволят разработать программный код и создать компьютерное приложение, дающее возможность автоматизировать процесс расчета комплекса всех необходимых параметров инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Виноградов, А.Н., Давыдов, А.П., Липатов, С.И., Марголит, Р.Б., Панков, И.Г., Паршин, А.Н. Инновационная технология высокопроизводительного изготовления цилиндрических колес с арочными зубьями // Научно-технический журнал «МГОУ-XXI-НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ». – 2010. – №5. – С. 25-30.

2. Рахметов, С.Л. О двух типах задач, связанных с проектированием шеверов-прикатников для обработки цилиндрических колес с круговым зубом // Молодежь и наука: шаг к успеху: сб. науч. статей 2-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых (22-23 марта 2018 г.), в 3-х т. Т. 3. Юго-Зап. гос. ун-т, Курск. – 2018. – С. 286-291.

3. Ямников, А.С., Маликов, А.А., Валиков, Е.Н., Сидоркин, А.В. Ресурсосберегающие технологии изготовления цилиндрических зубчатых колес // Технология машиностроения. – 2008. – №7. – С. 7-10.

4. Маликов, А.А., Сидоркин, А.В., Ямников, А.С. Технология обработки круговых зубьев шеверов-прикатников на станках с ЧПУ // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – №6(06). – С. 15-20.

5. Маликов, А.А., Сидоркин, А.В., Ямников, А.С. Комплексная технология изготовления шевера-прикатника для обработки цилиндрических колес с круговыми зубьями // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №2. – С. 53-59.

6. Сидоркин, А.В., Салимов, Д.М. Методика расчета координат опорных точек при сложном пространственном движении предварительного формообразования круговых зубьев шеверов-прикатников на обрабатываемых центрах // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – №2(32). – С. 24-29.

7. Маликов, А.А., Сидоркин, А.В., Рахметов, С.Л. К вопросу о технологических ограничениях, обусловленных конструкцией инструмента, используемого в процессе шевингования-прикатывания цилиндрических колес с круговыми зубьями // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. Вып. 1. – С. 165-171.

8. Гинзбург, Е.Г., Голованов, Н.Ф., Фирун, Н.Б., Халебский, Н.Т. Зубчатые передачи: справочник. – Л.: Машиностроение. 1980. – 416 с.

9. Сухоруков, Ю.Н., Евстигнеев, Р.И. Инструменты для обработки зубчатых колес методом свободного обката. – К.: Техника, 1983. – 120 с.

10. Валиков, Е.Н., Белякова, В.А. Режущее-деформирующая чистовая обработка боковых поверхностей зубьев зубчатых колес: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 216 с.

REFERENCES

1. Vinogradov, A.N., Davydov, A.P., Lipatov, S.I., Margolits, R.B., Pankov, I.G., Parshin, A.N. Innovation technology high-productive manufacturing cylindrical cog-wheels with arch teeth // *Scientific Technical Journal "MSOU-XXI-NEW TECHNOLOGIES"*. – 2010. – No.5. – pp. 25-30.

2. Rachmetov, S.L. On two types of problems connected with design of shaver-rollers for machining cylindrical cog-wheels with circular teeth // *Youth and Science: Step to Success: Proceedings of the 2-d All-Russian Scientific Conf. of Promising Developments of Young Scientists* (March 22-23,

2018) in 3 Vol., South-Western State University, Kursk. – 2018. – pp. 286-291.

3. Yamnikov, A.S., Malikov, A.A., Valikov, E.N., Sidorkin, A.V. Resource-saving technologies in manufacturing cylindrical cog-wheels // *Engineering Techniques*. – 2008. – No.7. – pp. 7-10.

4. Malikov, A.A., Sidorkin, A.V., Yamnikov, A.S. Technology of circular teeth machining of shaver-rollers on NC machines // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – No.6 (06). – pp. 15-20.

5. Malikov, A.A., Sidorkin, A.V., Yamnikov, A.S. Complex technology of manufacturing shaver-roller for machining cylindrical cog-wheels with circular teeth // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2012. – No.2. – pp. 53-59.

6. Sidorkin, A.V., Salimov, D.M. Procedure for reference point coordinates computation at complex spatial motion of preliminary shaping of shaver-roller circular teeth in

processing centers // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No.2 (32). – pp. 24-29.

7. Malikov, A.A., Sidorkin, A.V., Rakhmetov, S.L. To the problem of technological limitations conditioned by tool design used in shaving-rolling cylindrical cog-wheels with circular teeth // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences*. – 2018. Issue 1. – pp. 165-171.

8. Ginzburg, E.G., Golovanov, N.F., Firun, N.B., Khablinsky, N.T. *Gearings: reference book*. – L.: Mechanical Engineering. 1980. – pp. 416.

9. Sukhorukov, Yu.N., Evstigneev, R.I. Tools for cog-wheels machining by free over-rolling. – N.: *Engineering*, 1983. – pp. 120.

10. Valikov, E.N., Belyakova, V.A. *Gog-Wheel Cheek Cutting-Deforming Finishing: monograph*. – Tula: Publishing House of TulaSU, 2011. – pp. 216.

Рецензент д.т.н. В.Д. Артамонов

УДК 658.561.2

DOI: 10.30987/article_5b71326dee2365.57167258

В.П. Вороненко, д.т.н., М.И. Седых, к.т.н., А.Д. Шашин, аспирант
(ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, 3а)
E-mail: andsmart@mail.ru

Научное совершенствование технологической подготовки многономенклатурного производства

Сокращение времени технологической подготовки производства в многономенклатурном производстве представляется возможным за счет разработки метода, который учитывает текущую информацию производственного участка.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства; планирование; директивный технологический процесс; текущее состояние; производственный участок.

V.P. Voronenko, D. Eng., M.I. Sedykh, Can. Eng., A.D. Shashin, Post graduate student
(FSBEI HE MSTU "STANKIN", 3a, Vadkovsky Side Street, Moscow, Russia, 127055)

Technological preparation science intensive improvement in multiproduct production

Time decrease in technological pre-production in multiproduct production is possible at the expense of the development of a method which takes into account current information of a production section.

Keywords: technological pre-production; planning; directive engineering procedure; current state; production section.

Сокращение производственных потерь времени [3] наряду с сокращением штучно-калькуляционного времени является одним из главных факторов непрерывного выпуска изделий в условиях многономенклатурного производства. Рассматривая многономенклатурное производство, необходимо помнить о та-

кой особенности, как отработка конструктивных элементов опытного образца и его технологии изготовления перед непосредственным запуском в серию.

Любые неудовлетворительные статические/динамические испытания влекут за собой конструктивные изменения в деталях. В таком