

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES DURING GEAR FINISHING ON THE QUALITY INDICATORS

Ю.Е. Махаринский*, Д.Г. Латушкин, Н.В. Путеев
Витебский государственный технологический университет

УДК 621.923
Y. Maharinsky*, D. Latushkin, N. Puteev
Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

ФИНИШНОЕ ШЛИФОВАНИЕ, ПАРАМЕТРЫ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, КАЧЕСТВО, ПРОГНОЗ, СТОЙКОСТЬ, ПРАВКА

Повышение показателей качества финишной обработки является актуальной задачей, так как повышает коэффициент полезного действия механизмов, снижает шум, вибрации, повышает долговечность механизмов, содержащих зубчатые колеса.

Целью исследования являлось получение методики прогнозирования связи стойкости шлифовальных кругов и показателей качества зубчатых колес от влияния параметров технологических процессов при финишной обработке.

Для достижения цели решались следующие задачи: определялось и изучалось влияние параметров технологического процесса при финишной обработке зубчатых колес на показатели качества; разрабатывались методики построения прогноза стойкости шлифовального круга между правками на основе полученных данных.

Параметрами технологического процесса для исследования определены шероховатость Ra , радиальное биение зубчатого венца, погрешность направления зубьев, отклонение профиля зуба от теоретического эвольвентного профиля.

По результатам обработки и статистического анализа результатов эксперимента получена математическая модель, описывающая изменение параметра шероховатости Ra в виде линейной функции отклика.

ABSTRACT

FINISH GRINDING, PARAMETERS, TECHNOLOGICAL PROCESS, QUALITY, FORECAST, RESISTANCE, CORRECTION OF GRINDING CIRCLE

Improving the quality of finishing is an actual task, because it improves the efficiency of mechanisms, reduces noise, vibration, increases the durability of gears containing gears.

The purpose of the study was to obtain a technique for predicting the relationship between the stability of grinding wheels and the quality of gears resulting from the influence of process parameters during finishing.

To achieve the goal, the following tasks were solved: determination and study of the influence of the parameters of the technological process at the finishing machining of gears on quality indicators; development of a methodology for predicting the stability of the grinding wheel between corrections based on the data obtained.

Parameters of the technological process for the study determined the roughness Ra , the radial runout of the sprocket, the error in the direction of the teeth, the deviation of the profile of the tooth from the theoretical involute profile.

Based on the results of processing and statistical analysis of the experimental results, a mathematical model is obtained that describes the variation of the roughness parameter Ra in the form of a linear response function.

The resulting ratio shows the relationship of the roughness Ra of the machined surface with parameters such as wheel speed, radial feed and vertical

* E-mail: maharinsky@vstu.by (Y. Maharinsky)

Полученное соотношение показывает взаимосвязь шероховатости Ra обработанной поверхности с такими параметрами, как скорость круга, радиальная подача и вертикальная подача. На параметр оптимизации перечисленные факторы влияют пропорционально, на что указывают линейные эффекты. При этом наибольшее влияние оказывает скорость круга и парное взаимодействие скорости круга и радиальной подачи. Наименьшее влияние оказывает вертикальная подача, и что особенно интересно, парное взаимодействие скорости круга и вертикальной подачи оказалось незначимым.

Полученные данные позволяют моделировать изменения основного параметра качества Ra поверхностей зубьев шестерен при финишном зубошлифовании методом непрерывного обкатного зубошлифовании.

По результатам проведенного эксперимента разработана методика прогнозирования связи стойкости шлифовальных кругов и показателей качества зубчатых колес от влияния компонентов технологических процессов при финишной обработке.

Операция зубошлифования является одним из методов финишной обработки цилиндрических зубчатых колес, обеспечивающим высокую степень точности эвольвентного профиля зубьев ГОСТ 1643–81. Обеспечение стабильности показателей качества финишной обработки является актуальной задачей, так как шлифовальный круг является инструментом с нестабильными свойствами, при его эксплуатации наблюдаются процессы затупления, засаливания, неравномерного износа, что приводит к ухудшению качества. Рабочие свойства шлифовальных кругов восстанавливаются правкой, но это приводит к дополнительным затратам времени и снижению производительности.

Целью исследования являлось определение стойкости шлифовального круга при финишной обработке эвольвентного профиля зубчатых колес при постоянных режимах резания в пределах периода работы между правками. Критерием потери работоспособности шлифовального круга является превышение показателей каче-

ства допустимых значений. *feed. On the optimization parameter, the listed factors influence proportionally, as indicated by linear effects. In this case, the greatest influence is exerted by the speed of the circle and the pair interaction of the speed of the circle and the radial feed. The least influence is exerted by the vertical feed, and what is especially interesting is that the pair interaction of the speed of the circle and the vertical feed was not significant.*

The obtained data allow modeling the changes in the basic quality parameter Ra of the surfaces of the gear teeth at the final gear grinding by the method of continuous grinding gear grinding.

Based on the results of the experiment, a technique has been developed for predicting the relationship between the stability of grinding wheels and the quality of gears from the influence of the components of technological processes during finishing.

ства допустимых значений.

Параметрами технологического процесса для исследования определены: радиальное биение зубчатого венца, шероховатость зубьев, погрешность направления зубьев, отклонение профиля зуба от теоретического эвольвентного профиля.

Обработка зубчатых колес проводилась на станке модели 5B833. Исследовались зубчатые колеса со следующими параметрами: модуль $m = 2,25$ мм, число зубьев $z = 21$, материал деталей – сталь 40X ГОСТ 4543-2016, степень точности 6-B, твердость зубьев 46-54 HRC.

В таблице 1 приведены значения допусков для данного зубчатого колеса согласно ГОСТ 1643–81 [1].

В эксперименте использовался один тип кругов и смазывающе-охлаждающей жидкости. Таким образом, эти параметры зафиксированы, и их влияние на точность деталей исключалось. В качестве переменных параметров выбраны следующие:

– скорость круга – V_K м/с;

Таблица 1 – Допуски зубчатого колеса

Нормы	Наименование допуска	Значение допуска, мкм
Кинематической точности	Допуск на радиальное биение зубчатого венца, F_{rr}	36
Плавности работы	Допуск на погрешность профиля, f_{fr}	11
Контакта зубьев	Допуск на направление зуба, F_{β}	11

- радиальная подача – $S_{рад}$ мм/ход;
- вертикальная подача, S_v мм/об. дет.

Шлифование зубчатых колес проводилось при следующих технологических параметрах: $S_{рад} = 0,02$ мм/ход; $S_{верт} = 0,5$ мм/об. дет.; $V_K = 31,5$ м/с. Применялся шлифовальный круг из белого электрокорунда 24А зернистостью 12–25 и твердостью СМ1.

Перед проведением эксперимента производилась правка шлифовального круга. Режимы правки назначены из источника [3]:

- продольная подача 0,2 м/мин;
- поперечная подача 0,02 мм/об. ход;
- число рабочих ходов – 4;
- число выхаживающих ходов – 4.

Для контроля точности зубчатых колес и передач стандартом предусмотрен ряд комплексов контроля, содержащих комплексные и поэлементные показатели для каждой из трех норм точности и вида сопряжения [4].

Радиальное биение зубчатого венца контролировалось с помощью биенемера модели Б–10М (рисунок 1), погрешность направления зубьев – на приборе ПБМ-500 (рисунок 2), отклонение профиля зуба от теоретического эвольвентного профиля – на эвольвентомере КЭУ-М (рисунок 3).

Биенимер (рисунок 1) состоит из основания 1, по направляющим которого перемещаются бабки 7 и 2. Измеряемое зубчатое колесо устанавливается на оправке в центрах 3 и 6. Один из центров неподвижный, второй упирается с помощью рукоятки 8 и возвращается в исходное положение с помощью пружины, которая находится внутри бабки. Измерительная бабка 14 располагается перпендикулярно оси центров. На измерительной бабке располагается каретка 13, несущая измерительный узел. Измерительный

узел обеспечивает возвратно-поступательное перемещение держателя 10, в котором рычагом 15 закрепляется измерительный наконечник 9. Для измерения перемещения используется индикатор типа 12.

Прибор ПБМ-500 состоит из основания 1. В неподвижной бабке 2 прибора располагается центр 4 (рисунок 2). Центр 8 находится в подвижной бабке 9. После отвода центр 4 рукояткой 3 на него устанавливается измеряемое зубчатое колесо на оправке. Задняя бабка 9 придвигается к неподвижной бабке до касания центра 8 с центровым отверстием оправки. Задняя бабка фиксируется рукояткой 10. В измерительную стойку 5 закрепляется индикаторная головка 7.

Профиль зуба измеряется на приборе, называемом эвольвентомером. На рисунке 3 показан универсальный эвольвентомер КЭУ-М, у которого теоретическая эвольвента воспроизводится эвольвентным кулаком и рычажной передачей.

Эвольвентомеры предназначены для сопоставления действительного профиля сечения зуба с теоретической эвольвентой заданной основной окружности. Относительное движение измерительного наконечника по эвольвенте осуществляется путем согласованного вращения колеса и поступательного перемещения измерительного устройства.

Схема контроля показана на рисунке 4. В универсальном рычажно-кулачковом эвольвентомере модели КЭУ-М обкат создается эвольвентным кулаком 1, толкателем 2 и рычагом 3, который приводит в движение измерительную каретку 6 с наконечником 5.

Настройка универсальных эвольвентомеров производится по блокам концевых мер длины 4 или по стеклянной линейной шкале и отсчетному микроскопу.

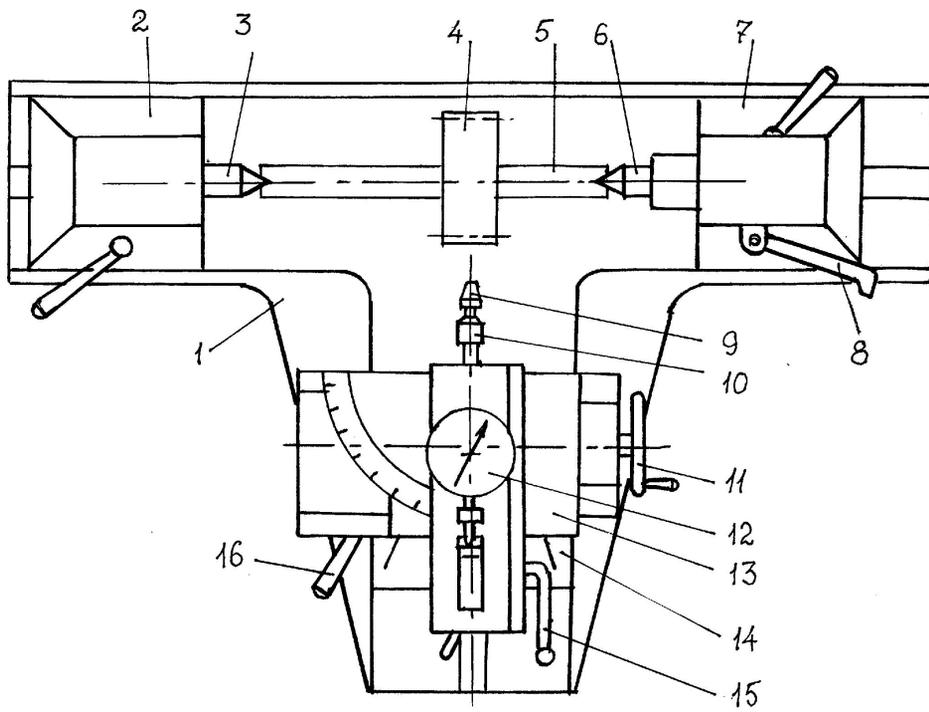


Рисунок 1 – Биенимер

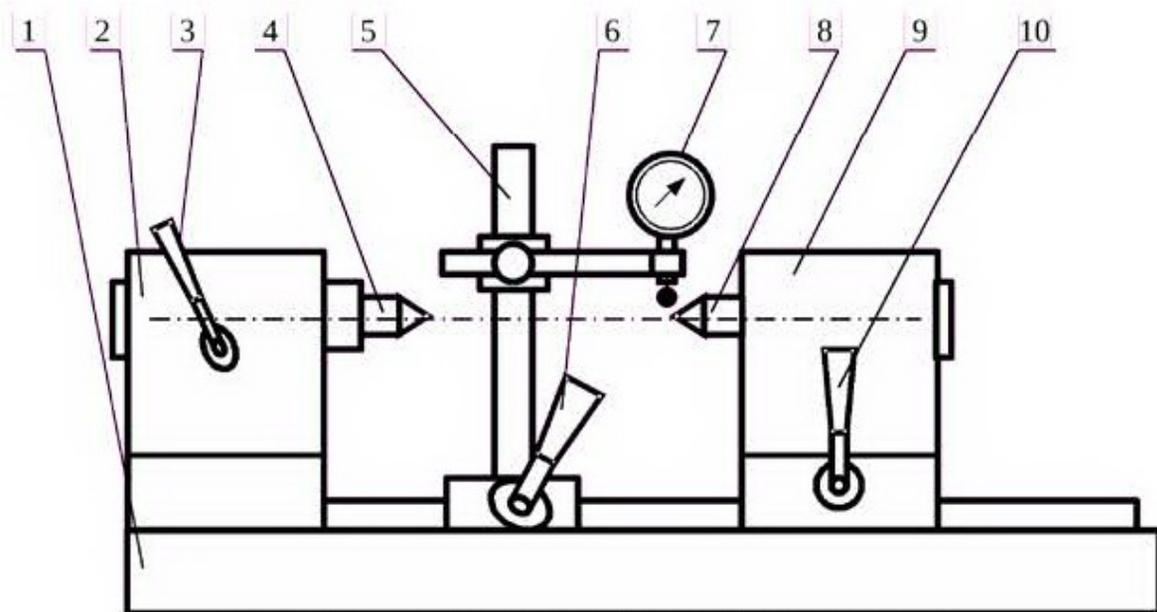


Рисунок 2 – Схема прибора ПБМ-500



Рисунок 3 – Универсальный эвольвентомер КЭУ-М

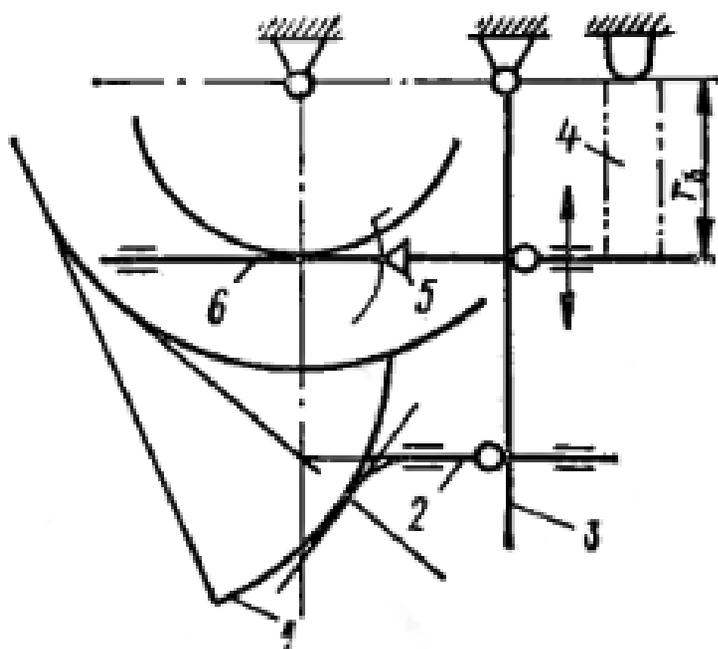


Рисунок 4 – Схема контроля эвольвентного профиля зубчатого колеса

После эксперимента были получены следующие значения исследуемых параметров зубчатых колес. Результаты приведены в таблицах 2 и 3.

Анализ результатов эксперимента показывает, что необходимость правки шлифовального круга возникает от потери его профиля из-за неравномерности износа.

Работоспособность шлифовальных кругов определяется рядом параметров. Основными параметрами являются расход абразивного материала, минутный съём металла, коэффициент шлифования, коэффициент режущей способности.

Коэффициент шлифования определяются по формуле

$$k = \frac{Q_M}{Q_A}, \quad (1)$$

где Q_M – объем снятого материала заготовки;

Q_A – объем абразива, израсходованного на снятие материала заготовки объемом Q_M .

Согласно ГОСТ Р 52781–2007 [5] коэффициент шлифования K при шлифовании закаленной стали 45 кругами 24AF46-F60 К-М 6 V должен быть не менее 3,8.

При шлифовании зубчатых колес отдельные участки профиля абразивного инструмента работают с разными нагрузками, то есть снимают различные объемы металла. Следовательно, можно предположить неравномерность износа шлифовального круга и появление погрешности обработки в виде отклонения от заданного профиля.

Для оценки и прогнозирования точности зубошлифования следует ввести понятие приведенного коэффициента шлифования

$$k_{пр} = \frac{Q_M}{Q_{Ai}}, \quad (2)$$

Таблица 2 – Результаты измерений отклонения направления зуба и радиального биения

Обработанные шестерни	Отклонение направления зубьев,	Отклонение радиального биения
	мм	зубчатого венца, мм
1	0,008	0,025
2	0,007	0,025
3	0,009	0,025
4	0,008	0,025
5	0,01	0,025
6	0,011	0,025
7	0,01	0,025

Таблица 3 – Результаты измерений отклонения профиля зуба от теоретического эвольвентного профиля

Обработанные шестерни	Отклонение профиля зуба от теоретического эвольвентного профиля, мм									
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	Левая поверхность зуба					Правая поверхность зуба				
1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
4	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
6	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
7	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018

где Q_{MI} – объем снятого материала заготовки на отдельном участке профиля межзубной впадины; Q_{AI} – объем абразива, израсходованного на снятие материала заготовки объемом Q_{MI} (рисунок 5).

Неравномерность припуска при зубошлифовании вызвано следующими причинами:

- кинематикой процесса зубошлифования как при методе копирования, так и при методе обкатки;
- погрешностью установки заготовок;
- короблением заготовок после термической обработки;
- погрешностью предварительной обработки заготовок зубчатых колес (радиальное биение зубчатого венца, погрешность шага, погрешность направления зуба).

При проведении исследований [6] получена эмпирическая математическая модель, описывающая зависимость изменения параметра шеро-

ховатости Ra от режимов шлифования

$$Ra = 0,3635 + 0,1065 V_k + 0,0485 S_{pa\delta} + 0,0255 V_k S_{pa\delta} + 0,057375 S_{pa\delta} S_v. \quad (3)$$

Математическая модель показывает взаимосвязь шероховатости обработанной поверхности с такими параметрами, как скорость круга, радиальная подача и вертикальная подача. На шероховатость эвольвентного профиля перечисленные факторы влияют пропорционально, на что указывают линейные эффекты. При этом наибольшее влияние оказывает скорость круга и парное взаимодействие скорости круга и радиальной подачи. Наименьшее влияние оказывает вертикальная подача, и что особенно интересно, парное взаимодействие скорости круга и вертикальной подачи оказалось незначимым.

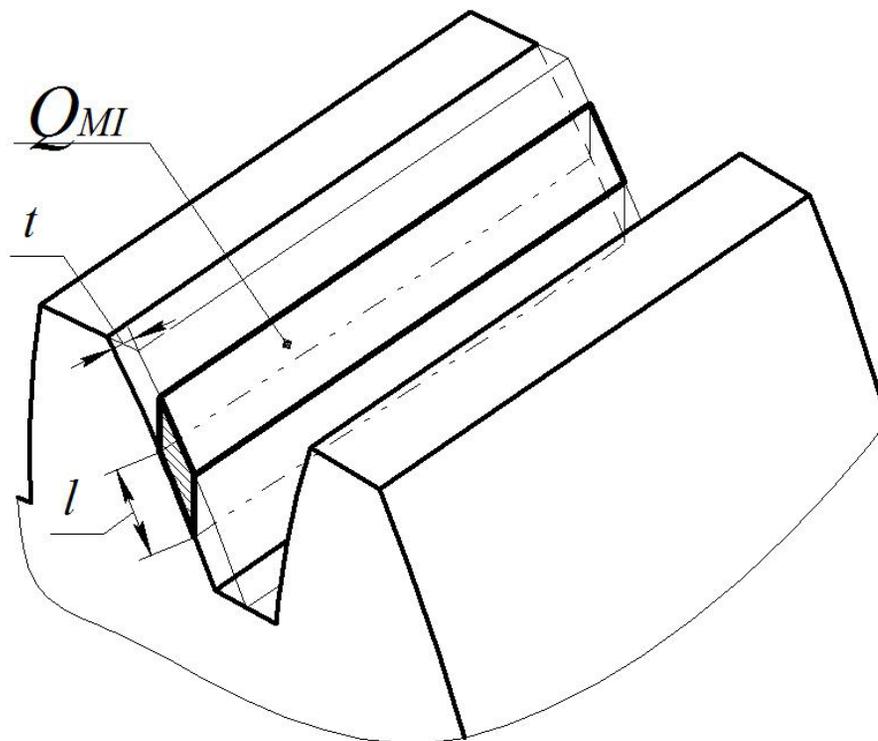


Рисунок 5 – Схема для определения приведенного коэффициента шлифования (l – длина участка профиля межзубной впадины, t – припуск на шлифование, Q_{MI} – объем снятого материала заготовки на отдельном участке профиля межзубной впадины)

Полученные данные позволяют моделировать изменения основного параметра качества **Ra** поверхностей зубьев шестерен при финишном зубошлифовании методом непрерывного обкатного зубошлифования.

При использовании математической модели и дополнительных расчетных данных [7] можно более эффективно управлять операцией шлифования зубчатых колес при помощи систем ЧПУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 1643-81. *Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски*, Введ. 01.07.1981, Москва, Издательство стандартов, 1981, 42 с.
2. Махаринский, Е. И. (2009), *Основы теории проектирования технических систем*, Витебск, 354 с.
3. Муцянюк, В. И. (1987), *Основы выбора шлифовальных кругов и подготовка их к эксплуатации*, Ленинград, 134 с.
4. Калашников, С. Н. (1990), *Производство зубчатых колес*, Москва, 464 с.
5. ГОСТ Р 52781–2007. *Круги шлифовальные и заточные. Технические условия*, Введ. 29.10.2007, Москва, Издательство стандартов, 2007, 32 с.
6. Попок, Н. Н., Латушкин, Д. Г., Махаринский, Ю. Е., Пугеев, Н. В. (2017), Моделирование влияния технологических факторов на точность зубчатых колес при зубошлифовании, *Вестник Учреждения образования «Полоцкий государственный университет». Серия В. Промышленность. Прикладные науки*, 2017, С. 31–35.
7. Попок, Н. Н., Махаринский, Ю. Е., Латушкин, Д. Г. (2016), Определение параметров граничного алгоритма управления рабочим циклом плоского врезного шлифования, *Вестник Витебского государственного технологического*

REFERENCES

1. Standart 1643-81. *Main standards of interchangeability. Cylindrical tooth gears. Admissions*, Introduced 01.07.1981, Moscow, Publishing standarts, 1981, 42 p.
2. Maharinsky, E. I. (2009), *Osnovy teorii proektirovanija tehniceskikh sistem* [Bases of the theory of design of technical systems], Vitebsk, 354 p.
3. Muqianko, V. I. (1987), *Osnovy vybora shlifoval'nyh krugov i podgotovka ih k jekspluatacii* [Bases of the choice of grinding wheels and preparation them to operation], Leningrad, 134 p.
4. Kalashnikov, S. N. (1990), *Proizvodstvo zubchatyh koles* [Production of gear-wheel], Moscow, 464 p.
5. Standart P 52781-2007. *Grinding and tool-grinding wheels. Specifications*, Introduced 29.10.2007, Moscow, Publishing standarts, 2007, 32 p.
6. Popok, N. N., Latushkin, D. G., Maharinsky, Y. E., Puteev, N. V. (2017), Modeling of the influence of technological factors on the precision of gears in the tooth regrinding [Modelirovanie vlijanija tehnologicheskikh faktorov na tochnost' zubchatyh koles pri zuboshlifovanii], *Vestnik Uchrezhdenija obrazovanija "Polockij gosudarstvennyj universitet". Serija V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki – Vestnik of the educational establishment "Polotsk state*

университета, № 30, 2016, С. 49–53.

university". Series V. Industry. Applied science, 2017, pp. 31–35.

7. Popok, N. N., Maharinsky, Y. E., Latushkin, D. G. (2016), Determination of parameters boundary control algorithm duty cycle flat plunge grinding [Определение параметров граничного алгоритма управления рабочим циклом плоского врезного шлифования], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technology University*, № 30, 2016, pp. 49–53.

Статья поступила в редакцию 05. 03. 2018 г.