

УДК 621.787.4: 51-74

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ ПРИ РОТАЦИОННОМ ОБКАТЫВАНИИ РОЛИКОМ С ВОГНУТОЙ ОБРАЗУЮЩЕЙ

Лаврентьев А.М.

*Камышинский технологический институт (филиал),*

*Волгоградский государственный технический университет, Камышин, e-mail: lamvstu@gmail.com*

В статье рассмотрены особенности обработки ротационным обкатыванием наружного диаметра длинных тонкостенных труб роликами с вогнутой образующей. Представлена расчетная схема обработки поверхностным пластическим деформированием роликом с вогнутой образующей. Выявлена взаимосвязь величины самоподачи обрабатываемого инструмента от угла установки деформирующего ролика относительно оси заготовки, определен закон изменения полуширины контакта между поверхностями ролика и длинномерной тонкостенной трубы. Приведены графики зависимостей, позволяющие определять угол установки деформирующих роликов относительно оси заготовки в зависимости от необходимой величины самоподачи. Также представлена схема для определения эквивалентной окружности и полудлины контакта, используя которые можно определить закон изменения полуширины контакта между поверхностями деформирующего ролика ротационного обкатываемого инструмента и наружного диаметра тонкостенной трубы.

**Ключевые слова:** обработка поверхностным пластическим деформированием, деформирующий ролик, угол самозатягивания, обработка тонкостенных труб

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE SURFACE AREA SETTINGS ROLLERS AND WORK PIECE WITH ROTARY SURFACE PLASTIC DEFORMATION ROLLER WITH STRAIGHT AND CONVEX IMAGES

Lavrentev A.M.

*The Kamyshin Technological Institute (branch) of the Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: lamvstu@gmail.com*

The article describes the features of rotary processing surface plastic deformation outer diameter thin-walled tubes of long rollers with a concave forming. It shows the calculated surface processing circuit plastic deformation of the roller with a concave forming. The correlation values of self-serve machining tool on the angle of installation of the deforming roller relative to the work piece axis, defined by the law of change the half-width of contact between the roller surfaces and long thin-walled tube. Is a plot of allowing the installation to determine the angle of the deforming rollers relative to the work piece axis, depending on the required value of self-serve. Also presents a scheme for determining the equivalent circle and half-length of contact that can be used to determine the law of variation of the halfwidth of the contact between the surfaces of the deforming roller driven around the rotary tool and the outer diameter thin-walled tubes.

**Keywords:** treatment of surface plastic deformation, deforming roller, self-serve, corner processing of thin-walled tubes

В настоящее время для изготовления значительной номенклатуры товаров широкого потребления используются детали в виде длинных тонкостенных труб диаметром 16...50 мм и толщинами стенок от 0,5 до 3 мм. Основными требованиями, предъявляемыми к таким трубам, являются низкая шероховатость (Ra 0,12 мкм... Ra 0,32 мкм), отклонения от круглости в пределах 0,1 мм при допуске на наружный диаметр трубы по 14 и более низким квалитетам точности.

Традиционные методы обработки длинных валов и тонкостенных труб сводятся к последовательному удалению припуска точением или наружным шлифованием с последующими отделочными методами для уменьшения высотных показателей шероховатости такими, как полирование,

суперфиниширование и т.п. При этом в качестве исходных заготовок используются трубы в состоянии поставки прокатного производства, имеющие большие отклонения по наружному диаметру и по допуску круглости в пределах  $\pm 3\%$  от наружного диаметра трубы. Недостатками этих методов обработки являются высокая трудоемкость, низкая производительность, наличие нескольких последовательных операций, и высокая технологическая себестоимость [4]. Устранение имеющихся недостатков может быть решено на основе применения метода ротационного обкатывания полноконтактными роликами [2]. Этот метод применительно к тонкостенным трубам практически не применялся и по этой причине не исследован [3].

Ротационное обкатывание относится к методам обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. Одним из определяющих факторов, оказывающих влияние на процесс деформирования, является площадь контакта, так как при одном и том же усилии, но при разных площадях контакта удельное давление может значительно отличаться [1]. Поэтому усилие деформирования может назначаться исходя из давления, которое необходимо обеспечить, и площади контакта, определяемой через геометрические параметры ролика, детали и их взаимного положения. В этой области различными авторами получен ряд зависимостей, которые предназначены для контакта деформирующих элементов шаровой, торовой или конической формы. Например, в работе [5] приводятся методика и результаты определения геометрических параметров и площади контакта при ППД наружных цилиндрических поверхностей вращения роликами конической формы (1). Сфера применения этой методики ограничена.

$$F_k = \frac{2 \cdot z_m^2}{R_d + \sqrt{R_d^2 - z_m^2}} \times \left( \int_{A_1 - a_1}^{A_1} \frac{\sqrt{A_1^2 - l_k^2}}{a_1} dl_k + \int_{A_2 - a_2}^{A_2} \frac{\sqrt{A_2^2 - l^2}}{a_2} dl_k \right) \quad [5]. (1)$$

Для подтверждения эффективности метода ротационного обкатывания тонкостенной трубы разработана расчетная схема обработки, показанная на рис. 1.

Деформирующие ролики установлены по отношению к оси детали на угол самозатягивания  $\omega$ , соответствующий подаче. Зависимость угла самозатягивания и подачи можно определить по формуле

$$\omega = \arctg \left( \frac{s}{2 \cdot \pi \cdot r_d} \right), \quad (2)$$

где  $s$  – подача головки на оборот;  $r_d$  – наружный диаметр обрабатываемой тонкостенной трубы.

На рис. 2 показаны графики изменения величины угла установки деформирующих роликов от самоподачи.

Из представленных графиков видно, что с увеличением угла самозатягивания в пределах  $0 \dots 45^\circ$  подача изменяется в пределах вплоть до 100 мм/об. Такие величины подачи на токарных станках отсутствуют. Поэтому при обработке ротационным обкатыванием можно использовать самоподачу.

Рассмотрим обкатывание трубы вогнутым роликом, образующая которого представляет дугу окружности радиуса  $R_{op}$ .

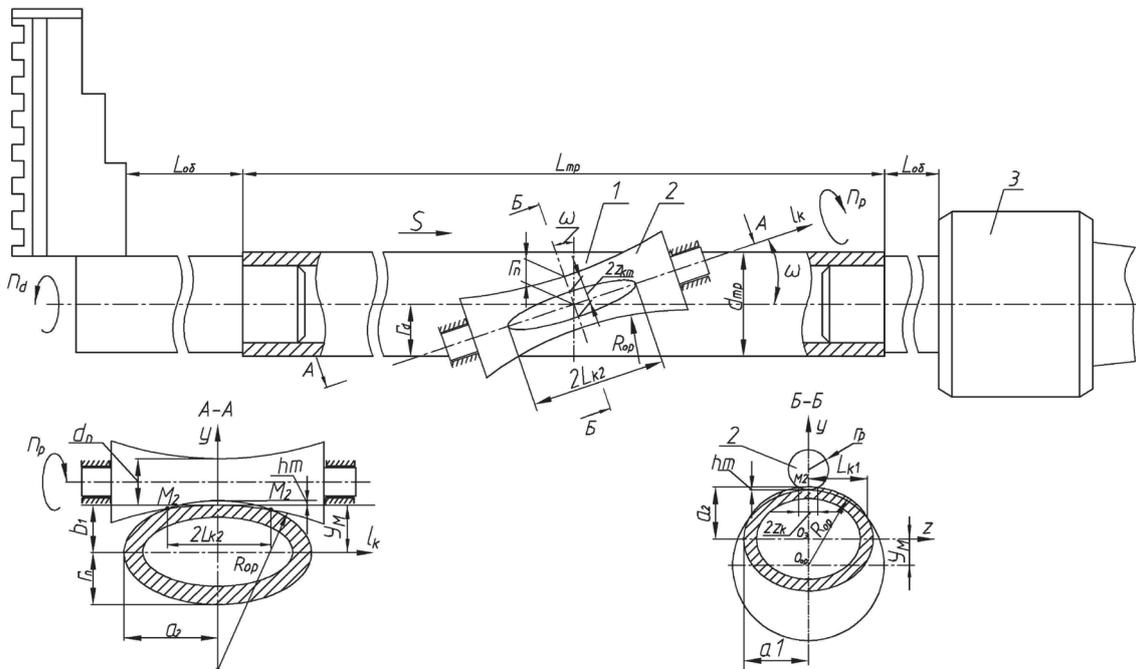


Рис. 1. Схема обработки тонкостенной трубы ротационным обкатыванием роликами с вогнутой образующей:  
 1 – обрабатываемая тонкостенная труба; 2 – деформирующий ролик; 3 – специальный задний центр; 4 – кулачок трехкулачкового патрона; 5 – вставка для центрирования трубы по оси совпадающей с осью вращения шпинделя станка и заднего центра

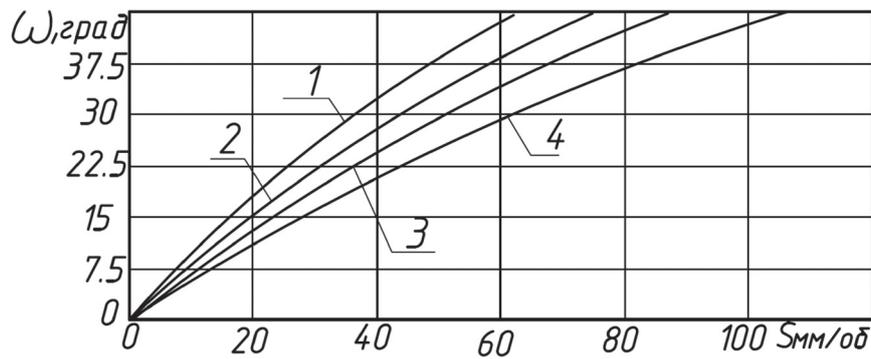


Рис. 2. Зависимости изменения угла самозатягивания от подачи при разных значениях радиусов обрабатываемой трубы:  
 1 –  $r_d = 10$  мм; 2 –  $r_d = 12$  мм; 3 –  $r_d = 14$  мм; 4 –  $r_d = 17$  мм

Деформирующие ролики в среднем сечении при обработке внедрены в обрабатываемую поверхность трубы на глубину  $h_m$ , в результате чего происходит упругопластическая деформация поверхности трубы. В остальных сечениях ролика по его длине глубина внедрения в поверхность детали уменьшается и становится равной нулю в сечении ролика соответствующего началу и концу контакта.

Установим основные закономерности формирования контактной зоны между поверхностями ролика и детали. С точки зрения технологичности изготовления образующая рабочей поверхности обжимающего ролика должна быть дугой окружности с радиусом  $R_{op}$ .

В этом случае изменение радиуса деформирующего ролика с вогнутой образующей по длине контакта можно вычислить из выражения

$$r_p = r_n + R_{op} - \sqrt{R_{op}^2 - l_k^2}, \quad (3)$$

где  $r_n$  – начальный радиус ролика в средней части контакта (начальный радиус);  $R_{op}$  – радиус образующей ролика;  $l_k$  – текущая координата длины контакта.

Произведем сечение деформирующего ролика и детали двумя плоскостями перпендикулярными оси ролика (рис. 1).

При установке обжимающего ролика на угол самозатягивания  $\omega$  в сечении на поверхности трубы как плоскостью Б-Б, так и плоскостью А-А (рис. 1) образуется эллипс. Малая полуось  $b_1$  в сечении плоскостью Б-Б равна

$$b_1 = r_d \quad (4)$$

большая полуось эллипса  $a_1$  в этом же сечении равна

$$a_1 = \frac{r_d}{\cos \omega}, \quad (5)$$

где  $r_d$  – радиус обрабатываемой трубы;  $\omega$  – угол самозатягивания;  $h_m$  – максимальная глубина внедрения ролика в поверхность трубы.

Аналогично малая и большая полуоси эллипса образуемого в сечении А-А будут равны

$$b_2 = r_d; \quad (6)$$

$$a_2 = \frac{r_d}{\sin \omega}. \quad (7)$$

Как видно из представленных на рис. 3 графиков в сечении А-А большая полуось эллипса быстро уменьшается в зависимости от подачи, а в сечении Б-Б, наоборот, увеличивается.

Определим длину, ширину контакта и закон изменения полуширины контакта по его длине. Очевидно, что форма контакта между деформирующим роликом и трубой тоже будет представлять собой эллипс, а ее размеры будут зависеть от полуосей эллипсов, образуемых в сечениях Б-Б и А-А.

Для упрощения решения задачи заменим дугу эллипса дугой эквивалентной окружности с радиусом  $R_{op}$ . Этот эквивалентный радиус будет также представлять радиус образующей выпуклого деформирующего ролика. Расчетная схема для определения радиуса эквивалентной окружности и длины контакта между деформирующим роликом и поверхностью трубы представлена на рис. 4.

Предположим, что длина и ширина контакта между роликом и обрабатываемой

трубой будут пропорциональны длинам больших полуосей с коэффициентом меньшим единицы.

Для определения полудлины контакта между роликом и трубой в каждом из сечений можно записать следующее выражение

$$L_{k_1}(s, r_d) = k \cdot a_1(s, r_d); \quad (8)$$

$$L_{k_2}(s, r_d) = k \cdot a_2(s, r_d), \quad (9)$$

где  $k$  – упомянутый выше коэффициент пропорциональности, меньший единицы;  $a_1$  – малая полуось эллипса, образуемая в сечении Б-Б,  $a_2$  – большая полуось эллипса, образуемая в сечении А-А.

Эти значения полуосей контактов являются одновременно координатами  $y_1$  и  $y_2$  точек  $M_1$  и  $M_2$  пересечения эллипсов,

образуемых в сечениях тонкостенной трубы с эквивалентной окружностью.

Уравнения эллипсов в сечениях трубы плоскостями Б-Б и А-А можно записать в следующем виде:

$$\frac{x^2}{b_1^2} + \frac{y^2}{a_1^2} = 1; \quad \frac{x^2}{b_2^2} + \frac{y^2}{a_2^2} = 1. \quad (10)$$

Из этих уравнений находим значение координат  $x_1$  и  $x_2$  точек  $M_1$  и  $M_2$  пересечения эллипсов в сечениях Б-Б и А-А с эквивалентными окружностями:

$$x_1(s, r_d) = b_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{L_{k_1}(s, r_d)}{a_1(s, r_d)}\right)^2}; \quad (11)$$

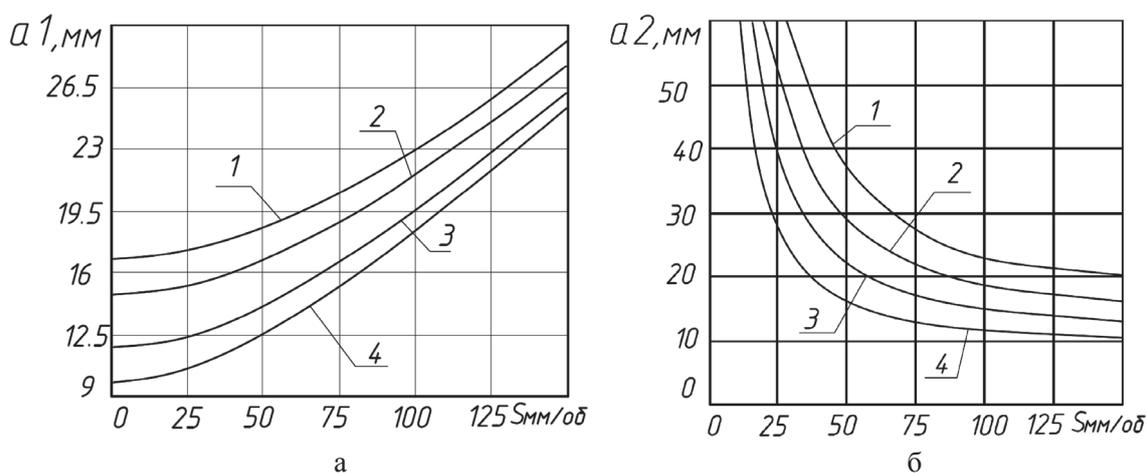


Рис. 3. Изменение больших полуосей эллипсов, образуемых в сечениях ролика и детали плоскостями Б-Б (а) и А-А (б) в зависимости от подачи при разных диаметрах тонкостенной трубы: 1 –  $r_d = 10$  мм; 2 –  $r_d = 12$  мм; 3 –  $r_d = 14$  мм; 4 –  $r_d = 17$  мм

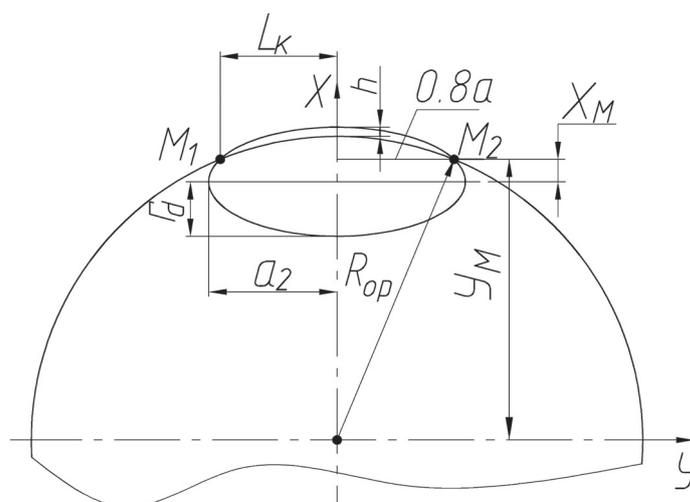


Рис. 4. Расчетная схема для определения радиуса эквивалентной окружности и полудлины контакта  $L_k$  в сечениях ролика и трубы плоскостями А-А и Б-Б

$$x_2(s, r_d) = b_2 \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{L_{k_2}(s, r_d)}{a_2(s, r_d)} \right)^2}. \quad (12)$$

Из анализа расчетной схемы на рис. 4 находим значения ординат точек  $M_1$  и  $M_2$  пересечения эллипса с эквивалентной окружностью

$$y_{M_1} = R_{op1} - (r_d - x_1 - h_m); \quad (13)$$

$$y_{M_2} = R_{op2} - (r_d - x_2 - h_m). \quad (14)$$

Из уравнений (13)–(14) находим радиусы эквивалентных окружностей

$$R_{op1} = \frac{(r_d - x_1 - h_m)^2 + L_{k_1}^2}{2 \cdot (r_d - x_1 - h_m)}; \quad (15)$$

$$R_{op2} = \frac{(r_d - x_2 - h_m)^2 + L_{k_2}^2}{2 \cdot (r_d - x_2 - h_m)}. \quad (16)$$

При пересечении двух окружностей, одна из которых внедрена в другую на величину  $h_m$ , полуширина контакта в среднем сечении ролика может быть вычислена по формуле

$$z_m = \sqrt{R_{op}^2 - \left[ \frac{(R_{op} + r_n) \cdot (R_{op} - h_m)}{R_{op} + r_n - h_m} \right]}. \quad (17)$$

Тогда уравнение эллипса, определяющего контактную зону между роликом и обрабатываемой поверхностью, можно записать в виде

$$\frac{z_k^2}{z_m^2} + \frac{l_k^2}{L_{k_1}^2} = 1, \quad (18)$$

откуда получаем уравнение эллипса, определяющего закон изменения полуширины контакта между поверхностями ролика и трубы в виде

$$z_k = z_m \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{l_k}{L_{k_1}} \right)^2}. \quad (19)$$

Для определения площади контакта, используя уравнение (19), можно написать следующую формулу:

$$S_k = z_m \int_0^{L_k} \sqrt{1 - \left( \frac{l_k}{L_{k_1}} \right)^2} dl_k. \quad (20)$$

Полученные зависимости позволяют определять требуемый угол самозатягивания и длину контакта при пересечении деформирующего ролика с поверхностью

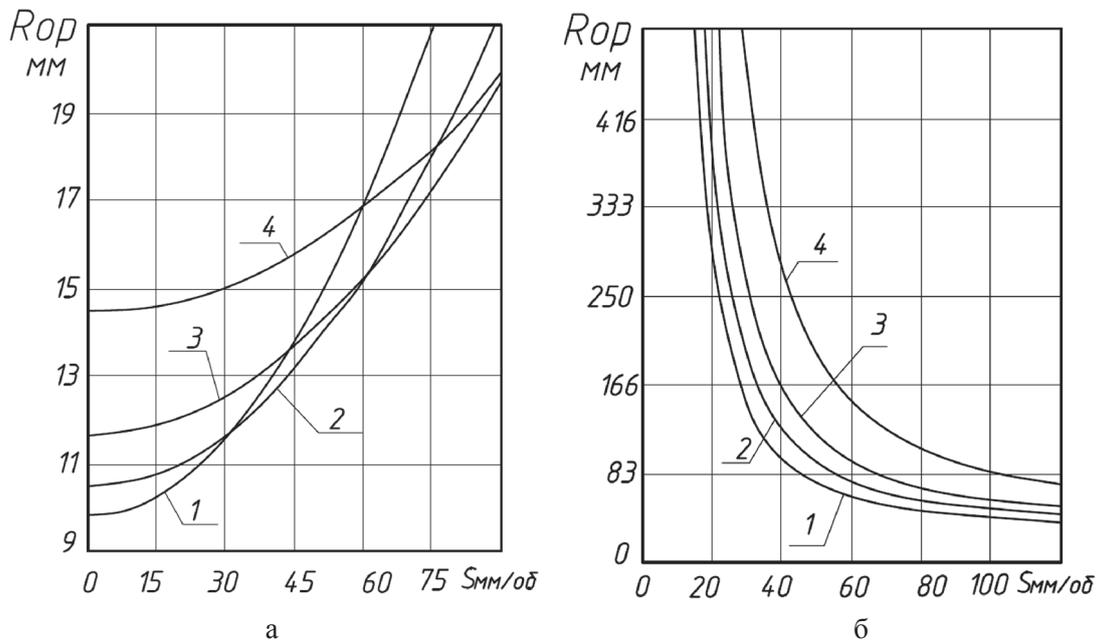


Рис. 5. Изменение радиусов эквивалентных окружностей, образуемых в сечениях ролика и детали плоскостями Б-Б (а) и А-А (б), в зависимости от подачи при разных диаметрах тонкостенной трубы:  
1 -  $r_d = 10$  мм; 2 -  $r_d = 12$  мм; 3 -  $r_d = 14$  мм; 4 -  $r_d = 17$  мм

обрабатываемой заготовки, что в свою очередь позволяет достигать полного перекрытия винтовых следов от деформирующих роликов.

Также результаты позволяют определить площадь контакта и рассчитать величину силы деформирования, необходимую для обработки поверхностным пластическим деформированием и одновременно не приводящую к возникновению остаточной деформации стенки тонкостенной трубы, через распределенные контактные напряжения.

#### Список литературы

1. Исследование взаимосвязи усилия с деформацией образцов при внедрении конического ролика в цилиндрические детали / Н.И. Никифоров // Известия ВолгГТУ Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». – 2006. – № 4(19). – С. 41–44.
2. Коновалов Е.Г., Чистосердов П.С. Чистовая и упрочняющая ротационная обработка поверхностей. – Минск: Высшая школа, 1968. – 364 с. с ил.

3. Коновалов Е.Г., Чистосердов П.С., Фломенбит А.И. Ротационная обработка поверхностей с автоматической подачей. – Минск: Высшая школа, 1976. – С. 192.

4. Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов / ответ. ред. И.П. Захаренко – Киев: Научная мысль, 1982. – 189 с.

5. Никифоров Н.И. Определение площади контакта при ППД коническими роликами // Современные проблемы науки и образования. – 2010. – № 4. – С. 121–126.

#### References

1. Issledovanie vzaimosvjazi usilija s deformatsiej obrazcov pri vnedrenii konicheskogo roljka v cilindricheskie detali / N.I. Nikiforov // Izvestija VolgGTU Serija «Progres-sivnye tehnologii v mashinostroenii». 2006. no. 4(19). pp. 41–44.
2. Konovalov E.G., Chistoserdov P.S. Chistovaja i uprochnjajushhaja rotacionnaja obrabotka po-verhnostej. Minsk: Vyshejschaja shkola, 1968. 364 p. s ill.
3. Konovalov E.G., Chistoserdov P.S., Flomenblit A.I. Rotacionnaja obrabotka poverhno-stej s avtomaticheskoi podachej. Minsk: Vyshejschaja shkola, 1976. pp. 192.
4. Mishnaevskij L.L. Iznos shlifovalnyh krugov / otvet. red. I.P. Zaharenko Kiev: Nau-kova dumka, 1982. 189 p.
5. Opredelenie ploshhadi kontakta pri PPD konicheskimi roljkami / N.I. Nikiforov // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2010. no. 4. pp. 121–126.