

УДК 621.923

DOI: 10.30987/article_5d10851f643d17.66485210

С.Г. Бишутин, А.А. Козленкова

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ СОПРЯЖЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И ТОРЦОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИХ ШЛИФОВАНИИ ОДНИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования шероховатости сопряженных поверхностей деталей машин при их одновременном шлифовании периферией и торцом круга. Сформулированы научно обоснованные рекомендации по техно-

логическому обеспечению совокупности параметров шероховатости поверхностей при рассмотренных схемах шлифования.

Ключевые слова: финишное шлифование, сопряженные поверхности, параметры шероховатости.

S.G. Bishutin, A.A. Kozlyonkova

PECULIARITIES IN ROUGHNESS FORMATION OF CONJUGATE CYLINDRICAL AND END SURFACES OF PARTS AT GRINDING WITH ONE TOOL

The paper reports the study of peculiarities in the roughness formation of conjugate cylindrical and end surfaces of machinery at their simultaneous grinding with the disk periphery and the end.

The analytical dependences for the computation of altitude and step parameters of surface roughness at simultaneous grinding with disk periphery and butt are obtained the authenticity of which is confirmed in the course of experimental investigations. It is defined that altitude and step roughness parameters of cylindrical surfaces and end surfaces conjugate with them after their simultaneous grinding may differ up to 2-3 times. Lesser roughness is formed on end surfaces which is explained by the large number of disk grain tips contacting with given surfaces of a blank. The roughness step parameters of ground sur-

faces are influenced considerably by a rounding radius of abrasive grain tips at that the average step of unevenness along a middle line S_m is three-four times greater than the average step S on tips.

It is shown that a considerable impact of abrasive tool characteristics and time of surface processing with a grinding disk upon parameters of roughness in conjugate surfaces of parts.

Recommendations scientifically substantiated are formulated on the technological support of surface roughness parameter aggregate at simultaneous grinding with the disk periphery and the end.

Key words: finish grinding, conjugate surfaces, roughness parameters.

Введение

Современный уровень развития машиностроения предопределяет необходимость разработки и реализации технологических процессов, в ходе которых обеспечивается требуемое качество деталей машин. Ряд деталей машин (валы, втулки, шестерни и др.) имеют сопряженные поверхности, качество которых формируется при финишном шлифовании и существенно влияет на их эксплуатационные показатели [1-3]. При последовательном шлифовании таких поверхностей разными абразивными инструментами обеспечение их качества, как правило, не вы-

зывает затруднений. Однако зачастую при шлифовании обрабатывается одновременно несколько поверхностей детали (например, торцовых и цилиндрических) одним инструментом. Технологи в настоящее время при проектировании таких технологических операций не в состоянии выбрать условия их реализации, которые бы обеспечили требуемые параметры шероховатости сразу всех обрабатываемых поверхностей. В связи с этим данные исследования являются актуальными.

Анализ формирования шероховатости сопряженных поверхностей при их одновременном шлифовании периферией и торцом круга

Шлифование - процесс массового скоростного микрорезания поверхностей

заготовок большим числом (от нескольких сотен тысяч до десятков миллионов в се-

кунду) небольших по размеру (как правило, от 0,5 до 0,06 мм) абразивных зерен, соединенных друг с другом с помощью связки. Процесс протекает на высоких скоростях: обычно скорость вращения шлифовального круга составляет 25...50 м/с, а в отдельных случаях - до 150 м/с [4;5].

Наиболее часто сопряженные торцовые и цилиндрические поверхности заготовок в серийном производстве обрабатывают периферией и торцом шлифовального круга (рис. 1, 2).

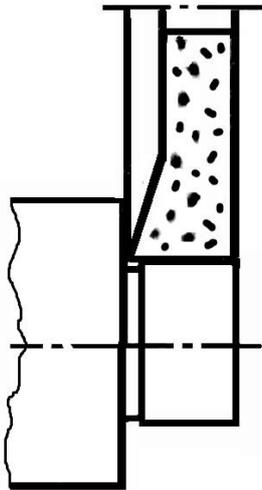


Рис. 1. Круглое наружное шлифование цилиндрической и торцовой поверхностей

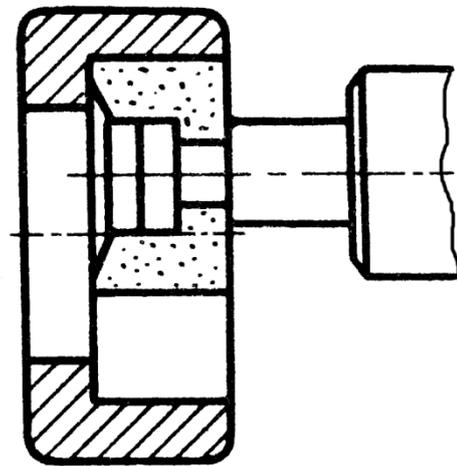


Рис. 2. Внутреннее шлифование цилиндрической и торцовой поверхностей

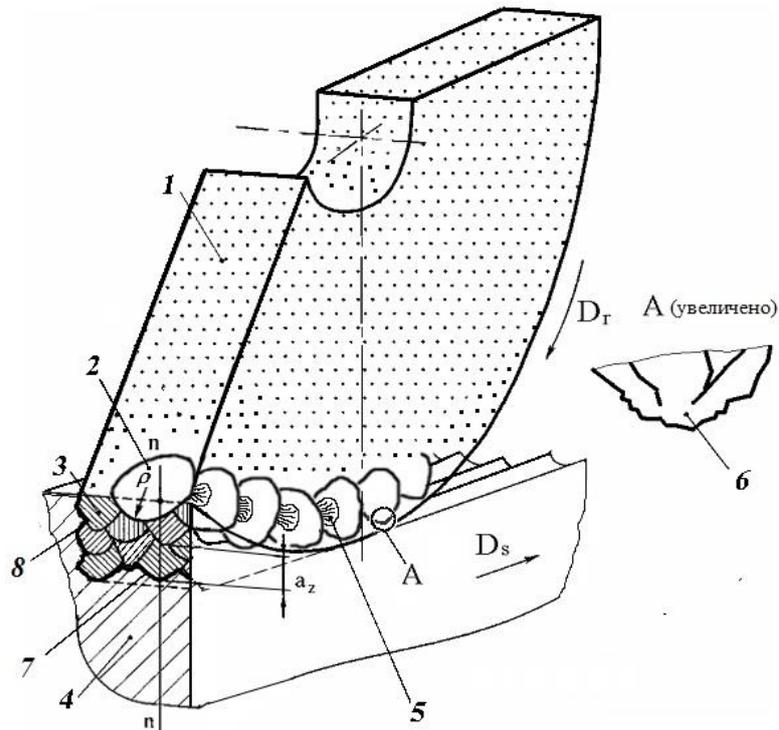


Рис. 3. Схема процесса круглого наружного шлифования:
 1 - шлифовальный круг; 2 - абразивное зерно; 3 - сечение среза вершины зерна; 4 - заготовка; 5 - связка; 6, 7, 8 - микронеровности шлифованных поверхностей

Формирование шероховатости сопряженных поверхностей при шлифовании имеет свои особенности. Рассмотрим этот процесс на примере круглого наружного шлифования (рис. 3). Заготовка 4 в процессе обработки перемещается в направлении D_s . Шлифовальный круг 1 вращается с наибольшей скоростью и обрабатывает цилиндрическую и торцовую поверхности заготовки. На его периферии и торцах располагаются абразивные зерна 2, которые движутся в направлении D_r и образуют срезы 3 на обрабатываемых поверхностях. Абразивные зерна соединены с помощью связки 5 и имеют режущие вершины 6 с радиусом скругления ρ .



Рис. 4. Микронеровности торцовой поверхности после шлифования торцом круга

Наиболее выступающие из связки абразивные зерна образуют срезы толщиной a_z . Контуры этих срезов формируют профили шероховатости 7 и 8 на цилиндрической и торцовой поверхностях заготовки. Микронеровности шлифованных торцовых поверхностей будут иметь характерный рисунок из пересекающихся рисок-царапин от вершин абразивных зерен круга (рис. 4). На цилиндрических поверхностях будет наблюдаться совокупность параллельных друг другу рисок-царапин, длина которых в десятки-сотни раз больше их глубины и ширины (рис. 5).



Рис. 5. Микронеровности цилиндрической поверхности после шлифования периферией круга

Следует отметить, что и при шлифовании по любой другой схеме не будет принципиальных отличий в процессе формирования микронеровностей поверхности.

Результаты теоретических исследований процесса формирования шероховатости сопряженных поверхностей при их одновременном шлифовании

Параметры шероховатости поверхности при шлифовании зависят от числа, геометрической формы и распределения по высоте вершин зерен круга, контактирующих в ходе обработки с рассматриваемым участком поверхности заготовки [3; 6]. В связи с этим математическое моделирование параметров шероховатости шлифованной поверхности возможно на основе совместного решения двух зависимостей. Первая зависимость должна связывать число вершин зерен, формирующих микронеровности поверхности, с их геометрической формой, распределением по высоте микропрофиля и высотой шероховатости поверхности. Вторая за-

висимость должна отражать взаимосвязь числа вершин зерен, контактирующих в ходе обработки с заготовкой, с технологическими режимами шлифования и высотой шероховатости поверхности. Авторами были выявлены эти две зависимости и в результате их совместного решения получено следующее уравнение для параметра Rz шероховатости поверхности:

$$Rz = C \rho^k m^n t_\phi^f, \quad (1)$$

где C , k , n , f - расчетные коэффициенты, зависящие от положения рабочей поверхности шлифовального круга относительно обрабатываемой поверхности заготовки; ρ - среднее значение радиуса скругления вершин зерен рабочей поверхности абразивного инструмента (зависит от условий восстановления режущей способности абразивного инструмента, материала, зерни-

стости, износа вершин абразивных зерен); m - число вершин зерен рабочей поверхности шлифовального круга, проходящих за время обработки через рассматриваемый участок поверхности заготовки; t_{ϕ} - толщина слоя металла, удаляемого с заготовки на каждом рабочем ходе абразивного

инструмента. Данное уравнение является исходным для расчета параметров шероховатости поверхности при любых методах шлифования. Так, для круглого наружного, внутреннего и плоского шлифования периферией круга уравнение (1) запишется следующим образом:

$$Rz = \frac{150 \rho^{-0,25} t^{0,5}}{\left(k_B m \frac{V_K}{V_3} A^{0,5} q \left[0,62 \frac{N}{V} \right]^{-2} F_c H \right)^{0,5}} k_C, \quad (2)$$

где ρ - среднее значение радиуса скругления вершин абразивных зерен, мкм; t - глубина шлифования, мкм; k_C - коэффициент, учитывающий влияние смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) на параметр Rz (табл. 1); k_B - коэффициент, учитывающий влияние колебаний рабочей поверхности круга относительно обрабатываемой поверхности (в большинстве случаев $k_B=0,65...0,85$); m - коэффициент, учитывающий фактическое число зерен на рабочей поверхности круга (табл. 2); V_K/V_3 - отношение скорости вращения круга к скорости вращения заготовки; $A = D_K$ - для плоского шлифования периферией круга, $A=D_3 D_K / (D_3 \pm D_K)$ - для

круглого наружного (+) и внутреннего (-) шлифования периферией круга, мм; D_3 , D_K - диаметр соответственно заготовки и круга, мм; q - коэффициент, учитывающий микрорельеф вершин абразивных зерен (для зерен из электрокорунда $q=1,5...1,8$, для зерен из карбида кремния $q=2,0...2,3$); N - зернистость шлифовального круга (63, 50, 40, 32, 25, 20, 16); V - объемное содержание зерен в круге, %; $V=62-2C_T$; C_T - номер структуры круга (1,2,...,12); F_c - параметр, учитывающий разновысотность вершин зерен на рабочей поверхности круга; H - число контактов рассматриваемого участка поверхности заготовки с кругом.

Таблица 1

Значения коэффициента k_C

| Материал заготовки | Синтетические СОТС | Эмульсии |
|--|--------------------|-------------|
| Среднеуглеродистые незакаленные стали | 1,0...1,05 | 0,93...0,96 |
| Среднеуглеродистые закаленные стали | 0,9...0,92 | 0,9...0,95 |
| Цементуемые и азотируемые стали | 1,0...1,05 | 1,10...1,15 |
| Инструментальные высокоуглеродистые закаленные стали | 0,9...0,95 | 1,0...1,05 |
| Высоколегированные и быстрорежущие стали | 0,7...0,75 | 0,75...0,8 |

Примечание. При обработке без охлаждения $k_C = 1,0...1,1$.

Таблица 2

Значения коэффициента m

| Твердость круга по ГОСТ 19202-80 (в ред. 1991 г.)* | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| M1...M3 | | | | SM1...C1 | | | | C2...CT2 | | | |
| Зернистость круга по ГОСТ 3647-80 (в ред. 1995 г.)** | | | | | | | | | | | |
| 63 | 50,40 | 32,25 | 20,16 | 63 | 50,40 | 32,25 | 20,16 | 63 | 50,40 | 32,25 | 20,16 |
| 0,76 | 0,72 | 0,70 | 0,67 | 0,82 | 0,78 | 0,73 | 0,70 | 0,85 | 0,82 | 0,80 | 0,76 |

* «Инструмент абразивный. Измерение твердости методом вдавливания шарика».

** «Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля».

Параметр F_c можно определить по формулам

$$F_c = \begin{cases} (A^* + BC/[0,008N]) \frac{t}{E}, & 0 \leq t \leq E; \\ (A^* + BC/[0,008N]) \left(1 + 0,2 \frac{t-E}{E}\right), & t \geq E. \end{cases}$$

Значения A^* , B , C приведены в табл. 3, значения E - в табл. 4.

Таблица 3

Значения A^* , B и C для шлифовальных кругов
из электрокорунда и карбида кремния

| Параметр | Твердость круга по ГОСТ 19202-80 (в ред. 1991 г.) | | | | | | | | | | |
|----------|--|-------|-------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| | M1...M3 | | | CM1...C1 | | | | C2...CT2 | | | |
| | Зернистость круга по ГОСТ 3647-80 (в ред. 1995 г.) | | | | | | | | | | |
| | 50,40 | 32,25 | 20,16 | 63 | 50,40 | 32,25 | 20,16 | 63 | 50,40 | 32,25 | 20,16 |
| A^* | 0,055 | 0,06 | 0,07 | 0,085 | 0,095 | 0,11 | 0,12 | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,13 |
| C | 0,025 | 0,04 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,045 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,045 |
| B | 1,0 | 1,0 | 0,97 | 0,95 | 0,91 | 0,89 | 0,86 | 0,91 | 0,87 | 0,85 | 0,82 |

Таблица 4

Значения E , мкм

| Условия правки шлифовального круга | | |
|---|--|-----------------------------|
| Правка однокристалльным алмазным карандашом | Правка многокристалльным алмазным карандашом или шлифовальным кругом | Правка шарошкой или роликом |
| 10...15 | 20...30 | 35...50 |

Для шлифования торцовых поверхностей уравнение (1) приобретает вид

$$Rz = \frac{65 \rho^{-0,33} t^{0,67}}{\left(m \frac{V_K}{V_3} A^{0,5} (y + l_\delta)^{0,5} q \left[0,62 \frac{N}{V} \right]^{-2} F_c H k_s \right)^{0,67}} k_c, \quad (3)$$

где y - координата рассматриваемой точки торцовой поверхности; l_δ - базовая длина для оценки шероховатости поверхности; k_c - коэффициент, учитывающий площадь рабочей торцовой поверхности шлифовального круга.

На основе анализа распределения по высоте профиля неровностей его впадин, образованных вершинами зерен, и кинематики перемещений инструмента относительно заготовки были получены соотношения между параметрами шероховатости по-

верхности, которые, например, для шлифования периферией круга имеют вид

$$\left. \begin{aligned} Ra &= 0,15 Rz \\ S &= 3,5 \cdot 10^{-3} (\rho Ra)^{0,5} \\ Sm &= 1 \cdot 10^{-2} (\rho Ra)^{0,5} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где Rz , Ra , S , Sm - параметры шероховатости поверхности, предусмотренные ГОСТ 2789-73.

Экспериментальная проверка результатов теоретических исследований

На первом этапе экспериментальных исследований образцы из стали 45 (HRC 42...45) были подвергнуты абразивному шлифованию электрокорундовым кругом

прямого профиля 1-300x40x127 24A40C16K5. Образцы устанавливались в центрах круглошлифовального станка. Скорость вращения круга и заготовки бы-

ли соответственно равны 29 и 25 м/мин. Образцы охлаждались свободным поливом эмульсией. Глубина шлифования составляла 6...10 мкм. Перед каждым экспериментом круг подвергался алмазной правке. С образцов предварительно сошлифовывались слои материала для устранения влияния технологической наследственности и стабилизации термического и силового воздействий в ходе экспериментов. Далее одновременно шлифовались наружные цилиндрические и торцовые поверхности при разном време-

ни выхаживания абразивным инструментом.

Затем с помощью профилографа-профилометра мод. БВ 7669М определялись высотные и шаговые параметры шероховатости обработанных поверхностей образцов. Полученные экспериментальные значения параметров шероховатости сравнивались с расчетными величинами, которые были определены по формулам (2)-(4). Полученные результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры шероховатости шлифованных сопряженных поверхностей

| Вид шлифованной поверхности | Время выхаживания поверхности шлифовальным кругом, мин | | | | | |
|-----------------------------|--|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | 0 | | 1 | | 2 | |
| | Ra, мкм | Sm, мкм | Ra, мкм | Sm, мкм | Ra, мкм | Sm, мкм |
| Наружная цилиндрическая | <u>0,61±0,03</u> | <u>47,6±2,8</u> | <u>0,46±0,04</u> | <u>40,5±3,1</u> | <u>0,35±0,03</u> | <u>35,6±3,0</u> |
| | 0,63 | 49,0 | 0,60 | 35,5 | 0,36 | 30,0 |
| Торцовая | <u>0,30±0,02</u> | <u>23,5±2,2</u> | <u>0,24±0,01</u> | <u>20,0±2,5</u> | <u>0,17±0,04</u> | <u>18,5±2,7</u> |
| | 0,34 | 27,5 | 0,23 | 25,0 | 0,19 | 22,5 |

Примечания: 1. В числителе приведены экспериментальные параметры качества и их доверительные интервалы, в знаменателе – расчетные значения. 2. Показаны 95 %-е доверительные интервалы параметров качества поверхности.

Как видим, время выхаживания поверхности шлифовальным кругом существенно влияет на значения параметров шероховатости сопряженных поверхностей деталей. При этом соотношения между высотными и шаговыми параметрами шероховатости сопряженных шлифован-

ных поверхностей были следующими: $Rz/Ra=6,5...8$; $Sm/S=3...4$.

Расхождения теоретических значений параметров Ra и Sm , определенных по формулам (2)-(4), с результатами экспериментов находятся в пределах от 5 до 30 %, что можно, на наш взгляд, считать приемлемым.

Основные выводы и рекомендации

На основании проведенных исследований можно утверждать следующее:

1. Высотные и шаговые параметры шероховатости цилиндрических и сопряженных с ними торцовых поверхностей после их одновременного шлифования могут отличаться до 2-3 раз. Меньшая шероховатость формируется на торцовых поверхностях, что объясняется большим числом вершин зерен круга, контактирующих с данными поверхностями заготовки.

2. Микронеровности шлифованных торцовых поверхностей имеют характер-

ный рисунок из пересекающихся ризок-царапин от вершин абразивных зерен круга, что характерно для кинематики перемещений инструмента относительно заготовки при рассмотренных схемах шлифования. Микронеровности цилиндрических поверхностей после шлифования периферией круга представляют собой совокупность параллельных друг другу ризок-царапин, длина которых в десятки-сотни раз больше их глубины и ширины.

3. На шаговые параметры шероховатости шлифованных поверхностей суще-

ственное влияние оказывает радиус скругления вершин абразивных зерен, причем средний шаг неровностей по средней линии S_m в 3-4 раза больше среднего шага S неровностей по вершинам.

4. В наибольшей степени на параметры шероховатости сопряженных поверхностей оказывают влияние зернистость инструмента, объемное содержание зерен в круге, скорость шлифования и время выхаживания поверхности. Незначительное влияние оказывают глубина шлифования и скорость вращения заготовки.

5. Для технологического обеспечения требуемой совокупности параметров ше-

роховатости сопряженных цилиндрических и торцовых поверхностей целесообразно на торцовой рабочей поверхности круга формировать впадины, снижающие число режущих зерен, или править эту поверхность на грубых режимах.

Проведенные исследования дают возможность осуществить целенаправленный выбор условий и технологических режимов совмещенного шлифования, которые позволят обеспечить требуемые параметры шероховатости сопряженных цилиндрических и торцовых поверхностей деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Суслов, А.Г. Автоматизация расчета нормальной контактной жесткости стыков плоских поверхностей шлифованных деталей / А.Г. Суслов [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – №2. – С. 135-139.
3. Бишутин, С.Г. Качество и износостойкость шлифованных поверхностей деталей автомобилей / С.Г. Бишутин. – Брянск: Десяточка, 2011. – 100 с.

1. Suslov, A.G. *Parts Surface Engineering* / A.G. Suslov [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008, 2008. – pp. 320.
2. Suslov, A.G. Calculation automation of standard contact stiffness of flat surface joints of parts ground / A.G. Suslov [et al.] // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2006. – No.2. – pp. 135-139.
3. Bishutin, S.G. *Quality and Wear-resistance of Ground Surfaces in Motor Car Parts* / S.G. Bishutin. – Bryansk: Desyatochka, 2011. – pp. 100.

4. Киселев, Е.С. Теплофизический анализ концентрированных операций шлифования / Е.С. Киселев, В.Н. Кольваногов. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 139с.
5. Кремень, З.И. Технология шлифования в машиностроении / З.И. Кремень, В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин. – СПб.: Политехника, 2007. – 424с.
6. Суслов, А.Г. Математическая модель шероховатости шлифованной поверхности / А.Г. Суслов, С.Г. Бишутин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2004. – №8. – С. 17-20.

4. Kiselyov, E.S. *Thermophysical Analysis of Grinding Concentrated Operations* / E.S. Kiselyov, V.N. Kolvanogov. – Uliyanovsk: UISTU, 2002. – pp. 139.
5. Kremen, Z.I. *Grinding Technology in Mechanical Engineering* / Z.I. Kremen, V.G. Yuriev, A.F. Baboshkin. – SPb.: Polytechnic, 2007. – pp. 424.
6. Suslov, A.G. Simulator of ground surface roughness / A.G. Suslov, S.G. Bishutin // *Reference Book. Engineering Journal with Appendix*. – 2004. – No.8. – pp. 17-20.

Статья поступила в редакцию 8.05.19
Рецензент: д.т.н., профессор Тихоокеанского государственного университета
Вайнер Л.Г.

Статья принята к публикации 27. 05. 19.

Сведения об авторах:

Бишутин Сергей Геннадьевич, д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, e-mail: nad-bisch@yandex.ru.

Bishutin Sergey Gennadievich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Motor Transport", Bryansk State Technical University, e-mail: nad-bisch@yandex.ru.

Козленкова Алла Александровна, аспирант Брянского государственного технического университета, e-mail: alya.nice3010@gmail.com.

KozlyonkovaAllaAlexandrovna, Post graduate student, Bryansk State Technical University, e-mail: alya.nice3010@gmail.com.