

## Влияние состава высокоструктурных шлифовальных кругов на стабильность их эксплуатационных свойств

### Influence of the composition of highly-structure grinding wheels on the stability of their performance properties

*Выполнены исследования по оптимизации состава и технологии изготовления шлифовальных кругов с повышенной структурой и пористостью. Установлено, что введение в качестве наполнителя алюмосиликатных микросфер в состав абразивной массы данного инструмента повышает его эксплуатационные показатели и их стабильность.*

*It is established that the introduction of aluminosilicate microspheres in the composition of the abrasive mass as the filler is an effective technique, which allows to increase the performance level and the stability of the tool with high structure and porosity.*

**Ключевые слова:** абразивный инструмент, пористость, структура, шлифование, шлифовальный круг.

**Keywords:** abrasive tools, high-structured, porosity, structure, grinding, grinding wheel.

В состав абразивного инструмента с нормальной структурой входят зерно и керамическая связка, которые и определяют его эксплуатационные свойства. От размеров и материала абразива, а также от состава и содержания в инструменте керамической связки зависят такие его эксплуатационные свойства, как твердость, разрывная прочность и неуравновешенность масс, их стабильность и в объеме каждого инструмента, и в изготовленной партии.

В настоящее время все большее применение находят инструменты с открытой и высокопористой структурой 12—22. Например, шлифовальные круги, которые используют при профильном глубинном шлифовании таких сложнофасонных деталей из труднообрабатываемых сплавов и сталей, как тяжело нагруженные высокоточные зубчатые колеса, детали горячего тракта газотурбинных двигателей и пр. [1—3]. Применение высокоструктурных шлифовальных кругов обеспечивает экономичную и высокопроизводительную обработку при автоматизированном многокоординатном профильном шлифовании на станках с ЧПУ, исключая возникновения дефектов шлифовального характера [4, 5].

Особенностью высокоструктурного инструмента является пониженное содержание абразива, которое в 3 раза меньше, чем у инструмента с нормальной

структурой. Чтобы компенсировать недостаток абразива при изготовлении высокоструктурного инструмента на керамических связках в его состав дополнительно вводят твердые выгорающие и невыгорающие наполнители, которые склеивают и увлажняют абразивную массу [1, 6, 7].

Шлифовальный круг повышенной производительности представляет собой сложную многокомпонентную абразивно-керамическую композицию из разнородных по физическим, химическим и морфологическим характеристикам. Так, например, их плотность может отличаться в 10 раз. Практика показывает, что новые компоненты состава могут оказывать значительное влияние на технологические и эксплуатационные свойства инструмента.

В экономичном варианте высокоструктурного шлифовального круга в качестве компенсаторов недостающего абразивного зерна используют наполнители в виде алюмосиликатных микросфер и частицы фруктовых косточек. Их введение в состав абразивной массы при специальном смешивании обеспечивает прочность сырца, необходимую для формования заготовок инструмента. В процессе обжига в течение 2—4 суток при температурах до 1250 °С твердые микросферы практически сохраняют свои свойства, а частицы фруктовых косточек выгорают,



создавая поровые пространства в объеме инструмента. Это изменяет эксплуатационные свойства абразивного инструмента, при этом, чем больше наполнителя, особенно алюмосиликатных микросфер, тем больше его влияние на свойства инструмента.

Практика изготовления высокоструктурного инструмента показывает значительное рассеяние значений показателей его свойств для сырья одного состава. Значения твердости могут колебаться не только при переменных технологических условиях обжига (температура, состав атмосферы печи и др.), но и при их постоянных значениях.

Рассмотрим характер влияния алюмосиликатных микросфер на формирование объемной структуры инструмента и его эксплуатационные свойства.

Алюмосиликатные микросферы представляют собой смесь разноразмерных микросфер (диаметром от 5 до 560 мкм). При этом их средний диаметр составляет 112 мкм, а закон распределения разных диаметров микросфер близок к нормальному. Химический состав микросфер близок к составу керамической связки, используемой в абразивном производстве:  $\text{SiO}_2$  — 58 %;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 26 %; добавки  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ . Температура плавления алюмосиликатных микросфер 1390 °С, что на 20 % выше температуры плавления наиболее распространенной связки К5.

Керамическая связка представляет собой мелкодисперсный конгломерат из частиц разного химического состава. При обжиге заготовки абразивного инструмента легкоплавкая связка переходит в жидкую фазу, которая, взаимодействуя с поверхностью зерен, частично растворяет их. Плавление связки начинается при температуре 650 °С и продолжается до температуры 1250 °С. Так как расплав обладает высокой адгезионной активностью к корунду ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), он соединяется с зернами и образует киркас. При охлаждении и кристаллизации связки формируется прочная связь зерен в виде мостиков из минерализованных затвердевших элементов. При обжиге инструмента в состав связки переходит до 8 % корунда, что дополнительно упрочняет мостики между зернами абразивного инструмента [8].

Расплав керамической связки обволакивает абразивные зерна и алюмосиликатные микросферы. Таким образом, наполнитель встраивается в структуру инструмента. Так как температура плавления алюмосиликата выше температуры обжига, микросферы остаются в твердом состоянии и выполняют функции абразивных зерен [9].

Высокая твердость инструмента с алюмосиликатными микросферами обусловлена аддитивным эффектом в результате наличия двух факторов: во-первых, упрочняется связка из-за изменения химического состава — увеличивается содержание ок-

сида алюминия; во-вторых, упрочняются мостики связи между абразивными зернами в результате встраивания в них алюмосиликатных микросфер, что увеличивает их толщину.

#### Теория управления составом шлифовального круга

На основании морфометрической модели зерен и их распределения в объеме абразивного инструмента [1] можно оценить влияние микросфер на свойства керамической связки статистическим анализом с использованием средних размерных параметров абразивных зерен, их количества в элементарном объеме инструмента, расстояния между ними и диаметра сферических полостей.

С увеличением структурных параметров абразивного материала — от структуры 6 до структуры 22, а следовательно, с уменьшением объемного содержания абразива с 50 до 18 %, в 1,4 раза уменьшается число зерен в единице объема и среднее расстояние между ними.

Уменьшение числа зерен, а следовательно, и суммарной площади их поверхности снижает устойчивость абразивного инструмента к объемной усадке при высокотемпературном обжиге [10]. Оптимальное содержание зерна в инструменте соответствует структуре 6, при которой практически отсутствует усадка инструмента. Следовательно, при изготовлении высокоструктурного инструмента содержание твердых компонентов должно быть не менее 50 % от его объема, чтобы минимизировать объемную деформацию. В качестве критерия оптимизации состава можно использовать площадь поверхности абразивных зерен. Поверхность абразивных зерен воспринимает давление, создаваемое при формовании инструмента и кристаллизации остывающей керамической связки при обжиге. Чем больше их площадь, тем меньше концентрация возникающих напряжений, и тем равномернее их распределение по объему инструмента. Площадь поверхности зерен определяет и прочность их сцепления со связкой.

Максимально возможная суммарная площадь поверхности абразивных зерен в объеме 1 мм<sup>3</sup> со средним размером  $A_z$  и объемным содержанием  $V_z$  определяется по формуле

$$S_f = 4,22V_z/A_z.$$

На рис. 1 приведены зависимости удельной площади  $S_f$  поверхности абразивных зерен из белого электрокорунда (25А) от номера структуры при зернистостях F40, 80 и 120 абразивного материала. При увеличении номера структуры с 6 до 22 значение  $S_f$  уменьшается в 2,8 раз. Это можно компенсировать добавлением алюмосиликатных микросфер, удельный объем которых рассчитывается по формуле

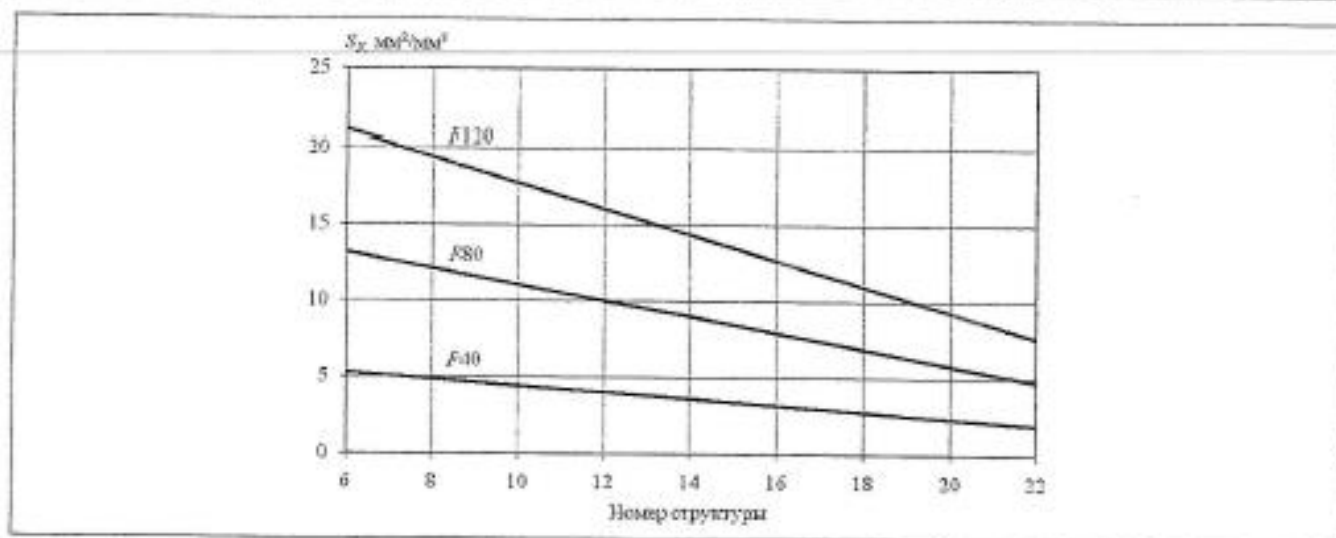


Рис. 1. Зависимости удельной площади  $S_F$  поверхности абразивных зерен из белого электрокорунда (25А) от номера  $N$  структуры при зернистостях  $F40$ ,  $80$  и  $120$  абразивного материала

$$V_m = 0,7 \frac{\bar{d}}{A_3} \Delta V_3, \quad (1)$$

$$Z = Z_V + Z_m = 0,667 \frac{V_3}{A_3^3} + 1,91 \frac{V_m}{d^3}. \quad (2)$$

где  $\bar{d}$  — средний размер микросфер;  $\Delta V_3$  — разница удельных объемов зерен в рассматриваемой структуре и структуре 6, при которой  $V_3 = 0,5$ .

Анализ результатов расчета по формуле (1), представленных на рис. 2, показал, что для сохранения постоянной величины  $S_F$  при увеличении номера структуры с 6 до 22 необходимо дополнительно в состав абразивной массы ввести микросферы: 6,3 % при зернистости  $F40$ ; 25,1 % при  $F120$ . При этом суммарное число зерен и микросфер в единице объема абразивной массы возрастает в соответствии с выражением

Тогда при зернистости  $F = 40$  показатель  $Z$  увеличивается с 5 (без микросфер) до 88, а при  $F120$  — с 335 (без микросфер) до 461, т. е. доля зерен в сбалансированной массе при  $F40$  составит 2,2 %, а при  $F120$  — 26 %.

Как уже отмечалось, введение в абразивную массу алумосиликатных микросфер повышает прочность мостиков связи между соседними абразивными зернами.

На рис. 3, а показана модель связи между двумя соседними абразивными зернами без алумосиликатных микросфер. Мостик из керамической связи между зернами можно рассматривать как ци-

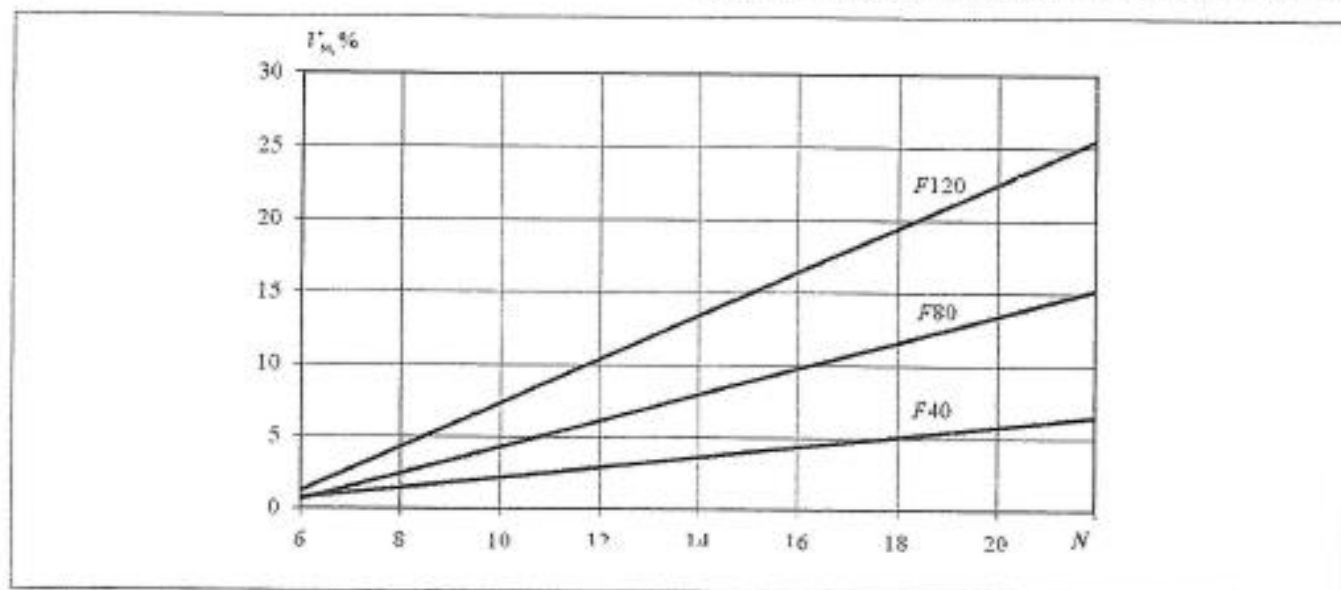


Рис. 2. Зависимости удельного объема алумосиликатных микросфер от номера  $N$  структуры абразивного материала при  $F40$ ,  $80$  и  $120$



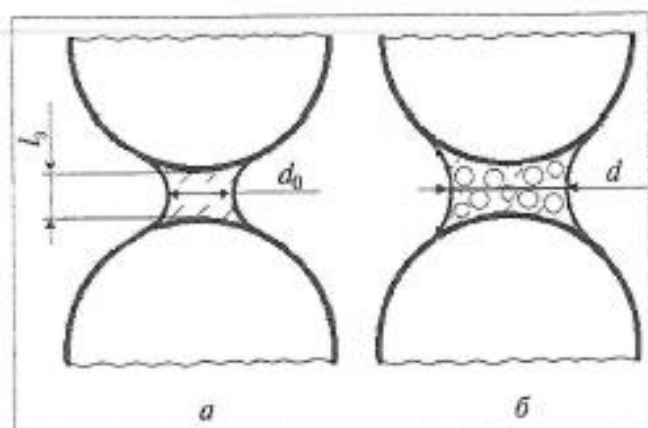


Рис. 3. Модели связок между соседними абразивными зёрнами без алумосиликатных микросфер (а) и с микросферами (б)

цилиндр диаметром  $d_m$ , высота которого равна длине мостика, т. е. среднему расстоянию между соседними зёрнами, определяемому по формуле

$$l_3 = l_p - A_3 = A_3 \left( \frac{1,145}{\sqrt[3]{V_3}} - 1 \right) \quad (3)$$

На рис. 4 приведены зависимости средней длины  $l_3$  мостиков из керамической связки от номера структуры абразивного материала, рассчитанные по формуле (3) для абразивов зернистостью F40, 80 и 120.

Абразивный инструмент априори рассматриваем как однородную абразивно-керамическую композицию, в которой соседние зёрна равноудалены друг от друга. В сечении (плоская модель) такое распределение зёрен можно представить как правильный шестиугольник, в центре и вершинах которого нахо-

дятся зёрна, т. е. каждое зёрно будет находиться на одинаковом расстоянии от соседних зёрен. Тогда для каждого абразивного зёрна возможны только две неповторяющиеся связи с соседними зёрнами.

Для объёмной модели неповторяющихся связей для каждого зёрна может быть не менее трех.

Таким образом, при известном расстоянии  $l_3$  между соседними зёрнами, общем их числе  $Z_V$  в единице объёма с тремя мостиками связи для каждого зёрна можно рассчитать диаметр мостика:

$$d_m = 0,65 \left( \frac{V_{св}}{Z_V l_3} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где  $V_{св}$  — объёмное содержание керамической связки в инструменте.

Тогда с учетом выражений (3) и (4) получим

$$d_m = 0,8 A_3 \sqrt{\frac{V_{св}}{V_3}} \left( \frac{\sqrt[3]{V_3}}{1,145 - \sqrt[3]{V_3}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Формула (5) показывает, что диаметр  $d_m$  зависит от показателей  $A_3$ ,  $V_3$  и  $V_{св}$ .

На примере абразивного инструмента с зернистостью F40 оценим адекватность расчетов по представленным моделям. При увеличении структуры инструмента с 6 до 22 расчетное  $Z_V$  уменьшится в 2,7 раза, а следовательно, увеличится среднее расстояние между зёрнами — для инструмента с  $F = 40$  оно увеличится в 2,3 раза. При постоянном объёмном содержании керамической связки  $V_{св} = 0,1$  при переходе к структуре 22 диаметр  $d_m$  увеличится с 0,215 до 0,233 мм, т. е. примерно на 9 %.

Абразивный каркас в инструменте со структурой 6 вместе со связкой занимает 60 % объёма, а при

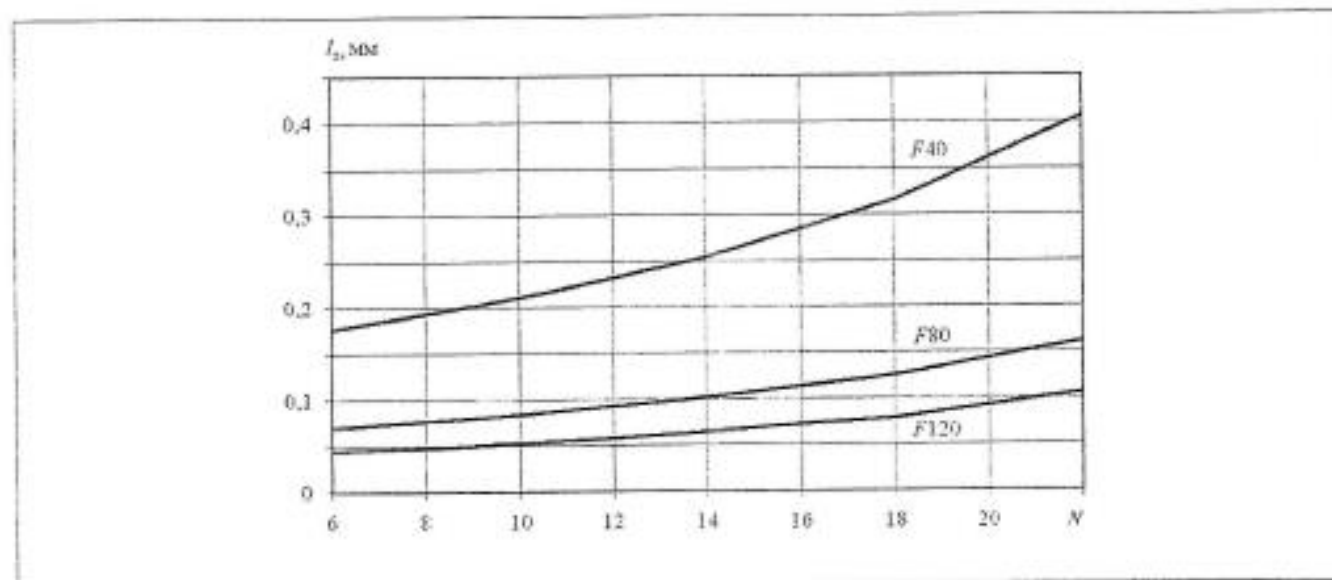


Рис. 4. Расчетные зависимости средней длины  $l_3$  мостиков из керамической связки от номера  $N$  структуры абразивного материала для абразивов зернистостью F40, 80 и 120

структуре 22–28 %. Следовательно, снижается запас прочности абразивного материала. В данном случае повышение структуры абразивного инструмента до 22 приведет к снижению твердости с J–K до G–H, поэтому необходимо увеличить объемное содержание связки на 4...6 %. Этого же можно достичь внедрением в состав абразивной массы алюмосиликатных микросфер в таком же количестве.

В соответствии с формулой (5) дополнительное введение в состав массы керамической связки или микросфер (рис. 3, б) увеличит  $V_{св}$  и диаметр  $d_m$  мостика до 26,5 %.

#### Заключение

Добавление алюмосиликатных микросфер существенно повышает устойчивость абразивных масс с крупным зерном к объемной деформации при обжиге, сохраняя работоспособность инструмента. При этом в обжигаемой массе возрастает число центров кристаллизации, обеспечивая однородность и стабильность эксплуатационных свойств инструмента, что обусловлено упрочнением керамической связки в результате перехода в ее расплав оксида алюминия с поверхности микросфер и увеличения диаметра мостиков между зёрнами.

Управлять эксплуатационными свойствами инструмента с повышенной структурой и пористостью можно путем изменения содержания алюмосиликатных микросфер.

Данное исследование позволило оптимизировать составы и технологию изготовления шлифовальных кругов с повышенной структурой и пористостью, изготавливаемых на ООО «ВОЛГАШЛИФ ПЛЮС». Выпускаемые этой фирмой высокоструктурные шлифовальные круги для профильного шлифования зубчатых колес, хвостовиков турбинных лопаток, блоков сопловых лопаток и других сложнофасонных деталей по эксплуатационным характеристикам превосходят другие аналогичные изделия

отечественного производства и не уступают лучшим зарубежным аналогам, в частности, шлифовальным кругам фирмы TYROLIT (Австрия).

#### Библиографический список

1. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. — М.: Машиностроение, 2007. — 688 с.
2. Высокоструктурные шлифовальные круги и их эффективное применение / В.К. Старков, С.А. Рябцев, С.В. Костров и др.; под ред. В.К. Старкова. — М.: МГТУ «СТАНКИН», 2013. — 213 с.
3. Старков В.К., Рябцев С.А., Горин Н.А. Повышение эффективности процессов глубинного шлифования; под ред. В.К. Старкова. — М.: МГТУ «СТАНКИН», 2012. — 118 с.
4. Технология автоматизированной комплексной обработки лопаток турбин методами высокопроизводительного шлифования, многоцелевые шлифовальные станки и высокоструктурный абразивный инструмент для ее реализации / В.А. Полетаев, В.К. Старков, В.Н. Крылов и др.; под ред. В.А. Полетаева, В.К. Старкова. — М.: Машиностроение, 2013. — 122 с.
5. Рябцев С.А., Цветков Е.В. Глубинное шлифование криволинейных поверхностей деталей высокопористыми кругами из кубического нитрида бора // Технология машиностроения. 2014. № 9. С. 11–15.
6. Старков В.К. Высокопористый абразивный инструмент нового поколения // Вестник машиностроения. 2002. № 4. С. 56–62.
7. Рябцев С.А. Технологические принципы изготовления высокоструктурного абразивного инструмента // Научные технологии в машиностроении. 2012. № 12. С. 26–31.
8. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глазовский и др.; под общ. ред. Ю.М. Ковальчука. — М.: Машиностроение, 1984. — 288 с.
9. Сиполяев В.А., Григорьев С.Н. Надежность и диагностика технологических систем. — М.: ИЦ МГТУ «Станкин», Янус-К. 2003.
10. Гурич В.Д., Григорьев С.М., Алешин С.В., Семенов В.А. Исследование силовых параметров при фрезеровании концевыми фрезами для диагностирования их состояния // Вестник машиностроения. 2005. № 9. С. 19–22.

*Старков Виктор Константинович* — д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник научно-исследовательского центра «Новые технологии и инструменты» МГТУ «СТАНКИН».

Тел.: 8(499) 973-39-81. E-mail: v.starkov@stankin.ru

*Рябцев Сергей Александрович* — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Новые технологии и инструменты» МГТУ «СТАНКИН».

Тел.: 8(499) 973-39-81. E-mail: ryabzev@yandex.ru

*Starkov Victor Konstantinovich* — D. Sc. in Engineering, Professor, chief researcher of scientific-research center «New technologies and tools» of MSTU «STANKIN».

Tel.: +7(499) 973-39-81. E-mail: v.starkov@stankin.ru

*Ryabzev Sergey Aleksandrovich* — D. Sc. in Engineering, leading researcher of the research centre «New technologies and tools» of MSTU «STANKIN».

Tel.: +7(499) 973-39-81. E-mail: ryabzev@yandex.ru