

УДК 621.941

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ

Р. Г. Кудояров<sup>1</sup>, Р. Р. Башаров<sup>2</sup>, О. Д. Пыркова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>kats10@mail.ru, <sup>2</sup>3rash@mail.ru, <sup>3</sup>olechka90p@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 24 апреля 2014 г.

**Аннотация.** Приведены сведения о предложенном расчетно-экспериментальном методе определения технологической жесткости токарных станков с целью достижения высокой точности изготавливаемых деталей.

**Ключевые слова:** упругие деформации станочной системы; технологическая жесткость; ожидаемые отклонения детали.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества изготавливаемых деталей в машиностроительном производстве требует определения и учета технологической жесткости применяемого станочного оборудования. Под технологической жесткостью станочной системы понимается жесткость ее нагруженной части, оказывающей влияние на расположение инструмента относительно обрабатываемой детали и точность обработки. При эксплуатации станков с ЧПУ в условиях автоматизированного производства данный фактор является причиной отжима инструмента, что приводит к повышенным отклонениям размеров обработанной детали.

Актуальной задачей при проектировании является разработка методов анализа влияния отдельных факторов, определяющих технологическую жесткость станков с автоматическим управлением [2]. Известно, что отклонения геометрической точности станка непосредственно приводят к появлению отклонений обрабатываемой детали, а влияние нежесткости (податливости) подсистем станка осуществляется через силы, действующие в процессе обработки. Величина этих сил зависит от элементов режима резания, неточности заготовки и от других факторов [1, 3].

К известным методам определения жесткости станков относятся экспериментальный и расчетный.

Сущность экспериментального метода определения жесткости [4] заключается в том, что

узлы станка с помощью специальных приспособлений нагружают силой, воспроизводящей действие силы резания, при этом измеряют перемещение отдельных узлов станка. Эти перемещения измеряются в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности, так как они обуславливают погрешность обработки. При проведении экспериментальных исследований станка может проверяться влияние элементов режима резания на точность размеров обработанных деталей, что связано с большими затратами материальных средств и времени.

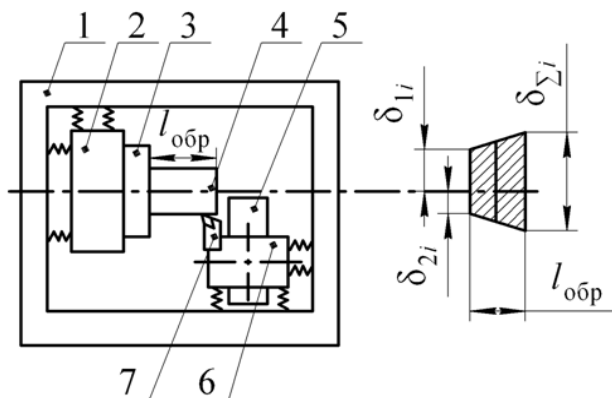
Расчетный метод предусматривает моделирование напряженно-деформированного состояния станочной системы и нахождение относительных смещений обрабатываемой детали и инструмента, что позволяет сделать выводы о влиянии нежесткости станка на точность относительного расположения исполнительных органов станка. При применении данного метода сложно учесть фактическое качество изготовления станка, что затрудняет уточнение характеристик упругих связей в модели станочной системы.

### 1. РАСЧЕТНО- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ СТАНКА

Учитывая особенности известных методов, можно сделать вывод о целесообразности разработки расчетно-экспериментального метода определения технологической жесткости станков. При осуществлении данного метода произ-

водится определение сил резания и установленные зависимости:

- составляющих силы резания по координатам  $X$  и  $Y$  в зависимости от элементов режима резания  $f(V, S, t)$ ;
- суммарной жесткости станочной системы и ее деформации с учетом действующей силы;
- деформации части системы нагружения станка, в наибольшей степени влияющей на точность детали, с учетом силы, определяющей ожидаемые отклонения обработанной поверхности детали.



**Рис. 1.** К анализу влияния подсистем нагружения токарного станка на точность обработки детали: 1 – станина (показано условно); 2 – шпиндельная бабка; 3 – шпиндель с патроном; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – поперечные салазки; 6 – резцедержатель; 7 – инструмент;  $\delta_{1i}$  – деформация подсистемы нагружения «деталь–станина»;  $\delta_{2i}$  – деформация подсистемы нагружения «инструмент–станина»

Также предусмотрены натурные испытания с обработкой детали на конкретном режиме и ее измерением. Это необходимо для определения сходимости полученных результатов, корректировки параметров жесткости и уточнения модели для определения влияния технологической жесткости токарного станка на точность обработки деталей.

При анализе технологической жесткости токарного станка (рис. 1, а) можно предположить, что на точность диаметрального размера большее влияние оказывает деформация (изгиб) детали, по сравнению с деформацией инструмента.

При этом суммарное отклонение детали и инструмента  $\delta_{\Sigma i} = \delta_{1i} + \delta_{2i}$ , где  $\delta_{1i} = \delta'_{1i} + \delta_{детi}$ ,  $\delta'_{1i}$  – деформация подсистемы нагружения «деталь – станина»,  $\delta_{детi}$  – деформация детали;  $\delta_{2i}$  – деформация подсистемы «инструмент–станина»;  $\delta_{2i} = \delta'_{2i} + \delta_{инi}$ ,  $\delta'_{2i}$  – деформация подсистемы

«державка–станина»,  $\delta_{инi}$  – деформация инструмента. Деформация детали и инструмента может оцениваться расчетным путем (например, с помощью метода конечных элементов) или на основании экспериментов. Наибольшее радиальное отклонение обрабатываемой поверхности от номинального положения, обусловленное податливостью станочной системы, соответствует  $\Delta = \delta_{\Sigma i}$ .

Для расчета отклонения  $\Delta$  при заданных условиях обработки необходим расчет радиальной силы  $P_y$  и определение, с помощью параметров жесткости общей системы и подсистем нагружения, соответствующих отклонений  $\delta'_{1i}$ ,  $\delta'_{2i}$ ,  $\delta_{дет}$ ,  $\delta_{инi}$ ,  $\delta_{1i}$ ,  $\delta_{2i}$ .

На схеме (рис. 1) показаны упругие связи шпиндельной головки и поперечных салазок со станиной, приведена схема относительного смещения обрабатываемой детали и инструмента по координате  $Y$ .

На рис. 2 приведена схема расчетно-экспериментального метода определения технологической жесткости токарного станка и ее влияния на точность изготавливаемой детали с учетом режимов резания.

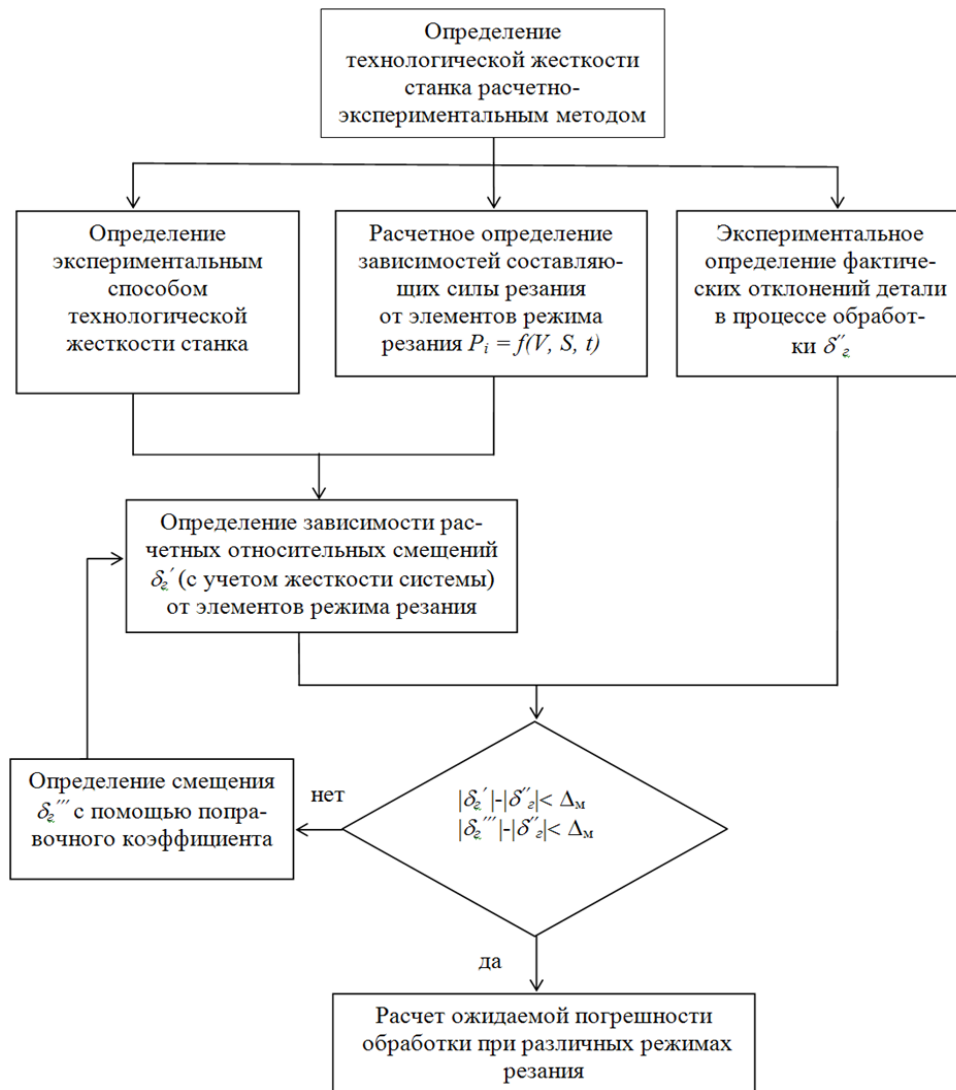
Экспериментальное определение жесткости проводилось для токарного станка мод. 16К20. Для определенных режимов резания с использованием ПО «Rezim» [5] был произведен расчет сил резания и расчет относительных смещений системы нагружения. Далее проводилась экспериментальная обработка детали с целью выявления фактических диаметральных отклонений  $\delta''_z$ .

По результатам экспериментальных исследований проведена коррекция расчета. На рис. 3 показано сравнение результатов отклонений диаметрального размера детали  $\delta'''_z$ , полученных расчетно-экспериментальным способом, с фактическими отклонениями  $\delta''_z$ .

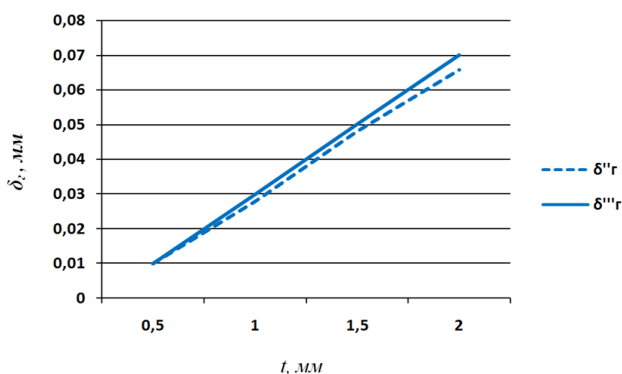
Относительная погрешность расчетно-экспериментального метода находилась в пределах 10 %, что свидетельствует о возможности его применения в целях прогнозирования точности изготавливаемых деталей.

## 2. АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТИ КОНСТРУКЦИИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА ТОКАРНОГО СТАНКА МОДЕЛИ 200НТ

Произведен анализ конструкции шпиндельного узла станка с ЧПУ модели 200НТ, предназначенного для токарной обработки деталей различной сложности.



**Рис. 2.** Блок-схема расчетно-экспериментального метода определения технологической жесткости станка и ее влияния на точность обработки детали,  $\Delta_m$  – допускаемая погрешность метода



**Рис. 3.** Зависимости отклонения точности детали (диаметрального размера) от глубины резания

Жесткость конструкции шпиндельного узла оценивалась с помощью программного продукта SolidWorks Simulation 2012. На общую жесткость конструкции влияет ряд факторов, к числу

которых относятся: жесткость подвижных стыков – подшипников и направляющих; жесткость неподвижных стыков – болтовых соединений; жесткость элементов конструкции.

Для расчета упругих перемещений шпиндельного узла под влиянием действующих нагрузок составлена расчетная схема (рис. 4).

Учитывались факторы: материал и массовые характеристики основных элементов конструкции; болтовые соединения несущих элементов конструкции; жесткость опор с подшипниками качения; силы, действующие в процессе обработки.

Подшипники в модели представлены в виде элементов (пружин) с соответствующей радиальной и осевой жесткостью.

Дистанционная нагрузка прикладывалась к посадочным поверхностям патрона, патрон рассматривался как удаленная масса.

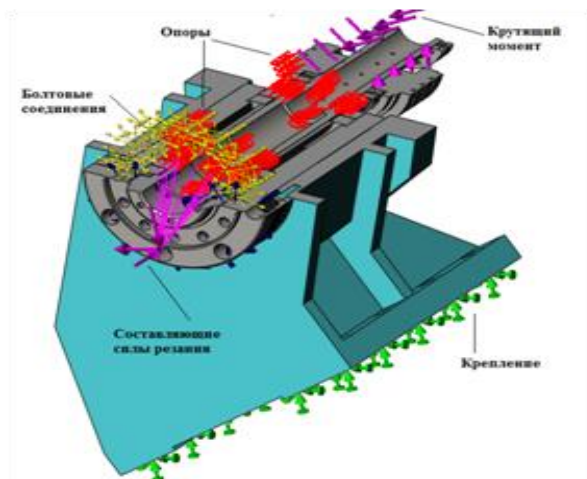


Рис. 4. Расчетная схема шпиндельного узла станка мод. 200НТ

Анализ показал, что под действием изгибающего момента и силы резания наибольшие упругие перемещения шпинделя возникают в месте расположения шкива и на переднем конце (рис. 5).

Основным фактором, влияющим на отклонение расчетной точки (вершины инструмента), в данном случае является низкая жесткость передней опоры, обусловленная применяемой схемой шпиндельных опор и ограниченным натягом подшипников передней опоры.

Для оценки влияния отдельных факторов на общую податливость конструкции были состав-

лены расчетные модели, учитывающие влияние податливости: подвижных сопряжений – подшипниковых опор; неподвижных стыков – болтовых соединений; других элементов конструкции (размеров пролета и передней консоли шпинделя).

Результаты исследований в среде Solid Works Simulation 2012 показали, что типовая конструкция шпиндельного узла характеризуется достаточной прочностью, но не обеспечивает необходимую жесткость. Требуемая точность обработки обеспечивается при сравнительно небольших силах резания, что накладывает ограничение на использование производительных режимов резания.

Предложен вариант конструкции шпиндельного узла, предусматривающий: установку в передней опоре шпинделя 4 (взамен 3) радиально-упорных шарикоподшипников NSK 7016С [6], имеющих лучшие показатели жесткости (радиальная жесткость пары –  $4,06 \cdot 10^8$  Н/м; осевая –  $2,24 \cdot 10^8$  Н/м.); разгрузку шпинделя от действия изгибающего момента; корректировку основных размеров шпинделя – увеличение длины пролета на 9 % и уменьшение длины передней консоли на 10 %.

Расчет данной конструкции шпиндельного узла применительно к станку мод. 200НТ (рис. 6, 7) выполнен также в среде SolidWorks Simulation 2012.

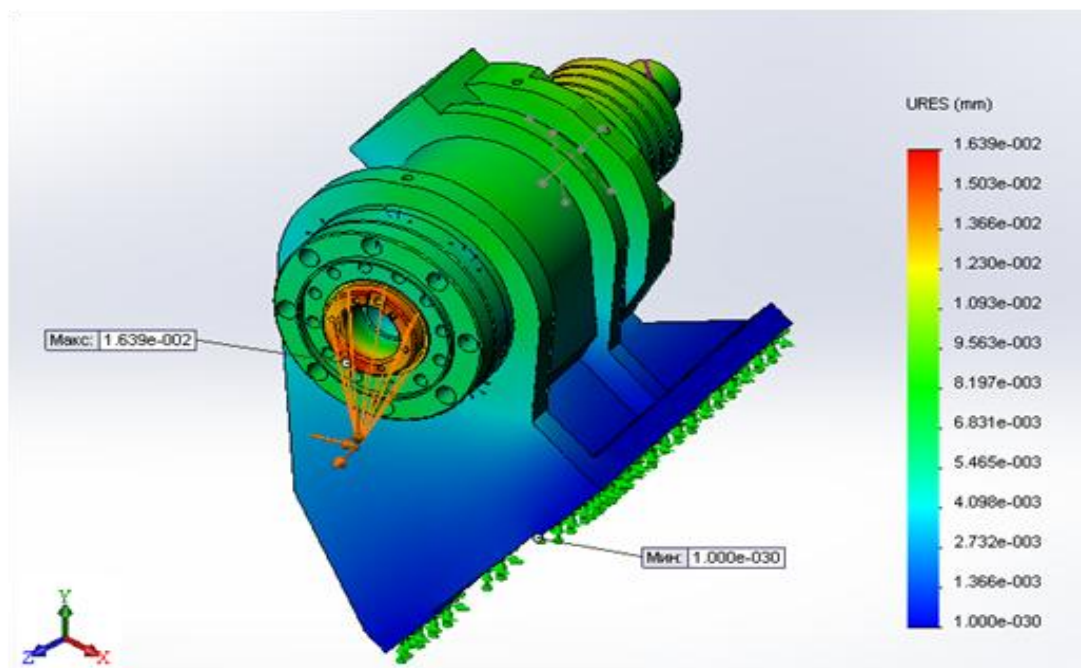


Рис. 5. Упругие перемещения шпиндельного узла станка мод. 200НТ

Указанные выше изменения конструкции позволили улучшить баланс влияния отдельных факторов на упругие перемещения всей конструкции (рис. 8) и, в частности, – переднего конца шпиндельного узла (отклонение расчетной точки под влиянием действующих нагрузок).

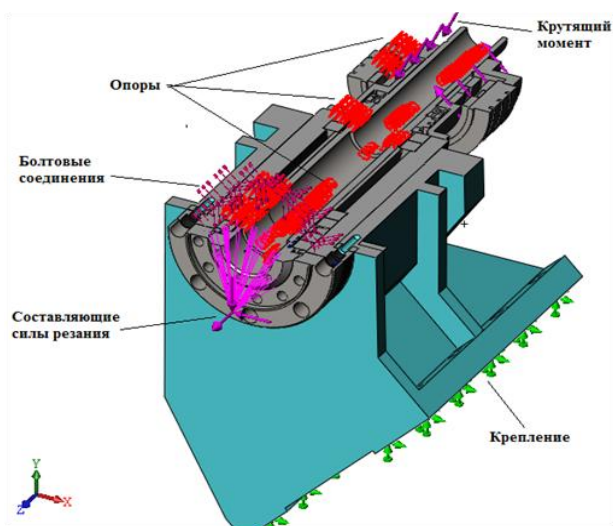


Рис. 6. Расчетная схема предложенной конструкции шпиндельного узла

Жесткость усовершенствованной конструкции шпиндельного узла на 38,3 % выше, чем у типовой модели.

### ВЫВОДЫ

1. Установлена целесообразность использования разработанного расчетно-экспериментального метода расчета технологической жесткости станка для определения ожидаемой точности изготавливаемых деталей при различных условиях обработки.

2. На основании анализа эпюр упругих перемещений шпиндельного узла базовой конструкции определен баланс, характеризующий влияние сопряжений, геометрических размеров, а также схемы шпиндельных опор, размеров пролета и передней консоли шпинделя.

3. Предложен вариант усовершенствованной конструкции шпиндельного узла, отличающийся от типового варианта разгрузкой шпинделя от изгибающего момента, изменением схемы шпиндельных опор и его основных размеров и характеризующийся повышением технологической жесткости на 38,3 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башаров Р. Р., Кудояров Р. Г. Исследование процесса фрезерования концевой фрезой при высоких частотах вращения шпинделя станка // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. № 4 (49). С. 71–77. [ R. R. Basharov, R. G. Kudoyarov, "Research of end milling operation at the high speed rotation of machine-tool spindle," *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 4 (49), pp. 71-77, 2012. ]
2. Бушуев В. В., Сабиров Ф. С. Направления развития мирового станкостроения // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 1 (9). С. 24–30. [ V. V. Bushuev, F. S. Sabirov, "The direction of the global machine tool industry," *Vestnik MGTU 'STANKIN'*, no. 1 (9), pp. 24-30, 2010. ]
3. Идрисова Ю. В., Кудояров Р. Г., Фецак С. И. Метод оперативной диагностики технического состояния приводов металлообрабатывающих станков // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 4 (49). С. 113–119. [ Yu. V. Idrisova, R. G. Kudoyarov, S. I. Fetsak, "Method for on-line diagnostics of the technical condition of drives in metalworking machine-tools," *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 4 (49), pp. 113-119, 2012. ]
4. **Металлорежущие** станки: учебник в 2 т. / Под ред. В. В. Бушуева. М.: Машиностроение. 2011. 1192 с. [ V. V. Bushuev (Ed.), *Metal cutting machines*. Moscow: Mashinostroenie, 2011. ]
5. **Прикладная** программа «REZIM» МГТУ «СТАНКИН». [ *An application 'REZIM' made in 'STANKIN'*. ]
6. **NSK** super precision bearings. General catalogue No. E1254d. 2008. P. 12–14.

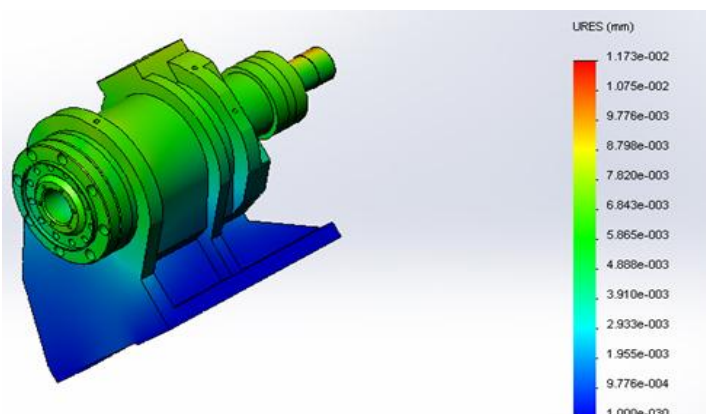


Рис. 7. Эпюра упругих перемещений усовершенствованной конструкции шпиндельного узла

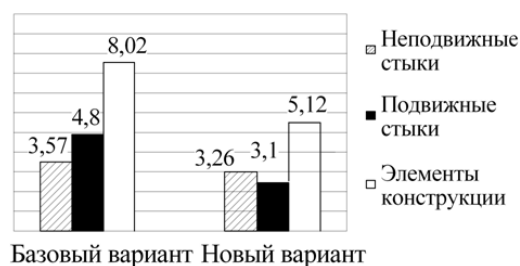


Рис. 8. Баланс упругих перемещений шпиндельного узла (типовой и предложенный варианты конструкции)



**ОБ АВТОРАХ**

**КУДОЯРОВ Ринат Габдулхакович**, проф. каф. мехатронных станочных систем. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1963). Д-р техн. наук по технол. и оборуд. мех. и физ.-техн. обработки (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. разработки мехатронных станочных систем.

**БАШАРОВ Рашит Рамилович**, ст. преп. каф. мехатронных станочных систем. Дипл. инж. по мехатронике (УГАТУ, 2008). Канд. техн. наук по технол. и оборуд. мех. и физ.-техн. обработки (Оренб. гос. ун-т, 2012). Иссл. в обл. динамики металлообрабатывающих станков.

**ПЫРКОВА** Ольга Дмитриевна, м-нт каф. мехатронных станочных систем. Дипл. инж. по мехатронике (УГАТУ, 2013).

**METADATA**

**Title:** Methods and process improvement rigidity of turning machines.

**Authors:** R. G. Kudoyarov<sup>1</sup>, R. R. Basharov<sup>2</sup>, O. D. Pirkovava<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:**

<sup>1</sup>kats10@mail.ru, <sup>2</sup>3rash@mail.ru, <sup>3</sup>olechka90p@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 87-92, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Provides information about the proposed settlement and experimental methods for determining the technological rigidity turning machines to achieve high precision manufactured parts.

**Key words:** elastic deformation of machine systems; machining rigidity; expected deviation details.

**About authors:**

**KUDOYAROV, Rinat Gabdulhakovich**, Prof., Dept. of Mechatronic Machine Systems. Dipl. Engineer (UAI, 1963), Dr. of Tech. Sci. (USATU, 2003).

**BASHAROV, Rashit Ramilovich**, Senior Teacher of Mechatronic Machine Systems. Dipl. Engineer (USATU, 2008), Ph.D. of Tech. Sci. (Orenburg SU, 2012).

**PIRKOVA, Olga Dmitrievna**, undergraduate of Mechatronic Machine Systems. Dipl. Engineer (USATU, 2013).