



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Концептуальная модель управления геометрической точностью деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ

Роман Некрасов<sup>a</sup>, Юлия Темпель<sup>b,\*</sup>

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, 625000, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7594-6114>, [Nekrasovrj@tyuiu.ru](mailto:Nekrasovrj@tyuiu.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7392-0412>, [Tempeljulia@mail.ru](mailto:Tempeljulia@mail.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.08, 621.9.015

#### История статьи:

Поступила: 25 апреля 2019  
 Рецензирование: 21 мая 2019  
 Принята к печати: 15 июля 2019  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2019

#### Ключевые слова:

Машиностроение  
 Механическая обработка  
 Технологическая система  
 Станок с ЧПУ  
 Погрешность металлообработки  
 Качество деталей  
 Надежность  
 Геометрическая точность  
 Математическое моделирование  
 Конечно-элементное моделирование  
 Силы резания

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Комплексная автоматизация производственных процессов – главное достижение научно-технического прогресса. Создание и использование гибких производственных модулей и комплексов производства для материалобработки резанием приводит к приобретению и массовому использованию станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Одновременно с этим наблюдается тенденция устаревания станочного фонда предприятий и снижения первоначального качества данного оборудования, в связи с чем актуальной является задача обеспечения и повышения качества выпускаемых изделий с одновременным снижением их себестоимости. **Цель работы** – повышение результативности технологических процессов при токарной обработке на станках с числовым программным управлением за счет математического и конечно-элементного моделирования. В работе исследовано напряженно-деформированное состояние детали в программном продукте *SolidWorks Simulation* от воздействия сил резания, и на основе математического моделирования произведен учет деформационных отклонений, получена трансформируемая CAD-модель заготовки, а также по данной модели разработана управляющая программа для станка с ЧПУ. При выполнении работы использованы следующие **методы исследования**: методы вычислительной математики, математического моделирования, матричного анализа, статистической обработки результатов экспериментов. Экспериментальные исследования проводились с использованием CAD/CAM системы *SolidWorks Simulation*, токарного центра SMTCL CAK50135, координатно-измерительной машины. В статье представлен способ управления геометрической точностью деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, основанный на математическом и конечно-элементном моделировании. Контроль геометрии деталей производится по CAD-модели, которая характеризует эталонную деталь. **Результаты и обсуждения.** При обработке двух партий заготовок, первая из которых обрабатывалась по традиционному способу, вторая – по предлагаемому, и определении надежности технологической операции было замечено, что поле рассеивания действительных значений и среднее квадратическое отклонение уменьшились по предлагаемому способу, что говорит о подтверждении его результативности, так как существенно снизился процент вероятностного брака. Причем разработанная модель управления геометрической точностью деталей, основанная на математическом и конечно-элементном моделировании, способствует сокращению основного технологического времени обработки путем исключения дополнительных уточняющих проходов режущего инструмента.

**Для цитирования:** Некрасов Р.Ю., Темпель Ю.А. Концептуальная модель управления геометрической точностью деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 6–16. – DOI: .10.17212/1994-6309-2019-21.3-6-16.

## Введение

Применение в машиностроительном производстве станков с числовым программным управлением приобретает широкое распространение. Обеспечение высокого качества производственных процессов, в частности технологи-

ческих процессов и управляющих программ, с одновременным снижением затрат труда и времени на подготовительные работы и их реализацию – одна из главных задач и условий эффективной и рациональной эксплуатации станков с ЧПУ в промышленности.

К основным характеристикам и преимуществам программирования обработки деталей на станках с ЧПУ относятся: сокращение сроков подготовки производства, обеспечение сокращения материальных средств на проектирование и

#### \*Адрес для переписки

Темпель Юлия Александровна, ассистент  
 Тюменский индустриальный университет,  
 ул. Володарского, 38,  
 625000, г. Тюмень, Россия  
 Тел.: +7 (902) 813-51-17, e-mail: [Tempeljulia@mail.ru](mailto:Tempeljulia@mail.ru)

изготовление технологического оснащения, повышение производительности труда за счет сокращения вспомогательного и основного времени обработки на станке.

Однако несмотря на то, что оборудование, оснащенное системами с ЧПУ, обладает высокими техническими возможностями, точность обработки не всегда соответствует установленным требованиям. В связи с вышесказанным тема исследования, несомненно, является актуальной и имеет практическую значимость, как одно из приоритетных направлений деятельности машиностроительных предприятий.

Многие работы [1–17] исследователей и ученых в рассматриваемой области научного познания стремятся решить обусловленную проблему различными методологическими подходами, однако цель их исследований остается одинаковой – обеспечение высокого технического уровня качества изделий, а также снижение трудоемкости и длительности производственных процессов.

Вопросы оптимизации процесса резания, повышения точности обработки и качества выпускаемой продукции машиностроения рассматривали многие ученые, среди которых Ю.А. Розенберг, Т.Н. Лоладзе, А.Д. Макаров, Н.Н. Зорев, А.С. Верещака, Е.В. Артамонов, М.Х. Утешев, Ю.И. Некрасов, В.И. Жиганов, Л.К. Генералов, А.А. Маталин, В.Э. Пуш, Д.Н. Решетов, Р. Пигерт и многие другие.

Научная деятельность перечисленных авторов [1–5, 17–19] в основном связана с задачами повышения стойкости и работоспособности режущего инструмента, оптимизации режимов резания, оценки погрешностей и их коррекции в процессе материалообработки, увеличения жесткости технологической системы и балансировки, исследования влияния узлов станков на точность обработки и др.

Анализ источников научной литературы и патентный поиск показали, что недостатками известных способов и устройств в области повышения качества и геометрической точности обработки деталей на станках с ЧПУ являются сложность их реализации и необходимость оснащения станков с ЧПУ адаптивной системой управления.

Цель работы – повышение результативности технологических процессов при токарной об-

работке на станках с числовым программным управлением за счет математического и конечно-элементного моделирования.

Задачи исследования: разработка математической модели формообразования поверхности детали; разработка способа управления геометрической точностью деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ.

## Методика исследований

В связи с представленными заключениями об имеющихся способах управления и обеспечения точности деталей при их обработке на станках с ЧПУ предлагается способ, который заключается в трансформации САД-модели детали непосредственно до металлообработки и разработки управляющей программы с учетом выявленных деформационных отклонений, возникающих от сил резания, посредством компьютерного и математического моделирования и метода конечных элементов.

Использование методологических основ планирования эмпирических исследований позволило минимизировать число необходимых измерительных операций в зависимости от заданной степени точности результатов измерений. Эксперимент включал в себя несколько этапов с учетом некоторых ограничений.

Объектом исследования является деталь – ступенчатый вал.

В результате эксперимента определяются:

- действительный размер обработанной поверхности детали;
- разброс значений случайной величины;
- основные математические характеристики оценки точности технологической операции: математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение.

Алгоритм проведения экспериментального исследования показан на рис. 1.

Алгоритм включает в себя блоки условий проверки достаточности данных, а также следующие пять блоков: 1 – ввод исходных данных; 2 – блок расчетов (в том числе 2.1 – выбор исследуемых факторов, влияющих на точность металлообработки, и определение схемы базирования и закрепления заготовки; 2.2 – расчет фактической скорости резания при точении цилиндрической поверхности; 2.3 – определе-



Рис. 1. Алгоритм проведения экспериментального исследования

Fig. 1. Algorithm for conducting experimental research

ние составляющих сил резания, возникающих в процессе точения); 3 – построение расчетной модели в CAD-системе (в том числе 3.1 – определение типов конечных элементов; 3.2 – определение свойств материала: модуля упругости, коэффициента Пуассона, плотности; 3.3 – определение геометрии расчетной модели); 4 – приложение нагрузок и получение решения; 5 – учет деформационных отклонений.

Исходные данные для расчета и проведения эксперимента представлены в таблице.

Блок расчетов на рис. 1 обозначен цифрой 2, включает в себя определение скорости резания. Скорость резания  $V$  при наружном продольном и поперечном точении и растачивании рассчитывают по эмпирической формуле (в соответствии со справочными данными) [24]

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v = \frac{350}{45^{0,2} \cdot 2,5^{0,15} \cdot 0,4^{0,45}} \cdot 0,69 = 135 \text{ м/мин.} \quad (1)$$

Для следующего этапа – конечно-элементного моделирования – определяем составляющие силы резания, которые возникают в процессе точения цилиндрической поверхности детали. При наружном продольном точении эти составляющие рассчитываются по следующей

формуле (в соответствии со справочными данными) [24]:

$$P_{z,x,y} = 10C_p t^x S^y V^n K_p = P_{z,y,x} = 10 \cdot 300 / 243 / 33 \cdot 9 \cdot 2,5^{1,0/0,9/1,0} \times \times 0,4^{0,75/0,6/0,5} \cdot 135^{-0,15/-0,3/-0,4} \times \times 1,44 / 1,83 / 1,83 = 2798 / 1392 / 1392 \text{ Н.} \quad (2)$$

Кроме того, для конечно-элементного анализа необходимо знать свойства материала исследуемого объекта. Качественная сталь марки Сталь 40Х (ГОСТ 4543–71) предназначена для производства деталей, от которых требуется повышенная прочность для долговечности и повышенного срока службы.

Химические и механические свойства стали марки 40Х – по ГОСТ 4543–71.

Для конечно-элементного моделирования воздействия составляющих силы резания на объект, который подлежит металлообработке, использовалась программа SolidWorks Simulation.

### Результаты и их обсуждение

При исследовании была произведена обработка двух партий деталей, состоящих из двадцати штук, на токарном центре SMTCL САК50135.

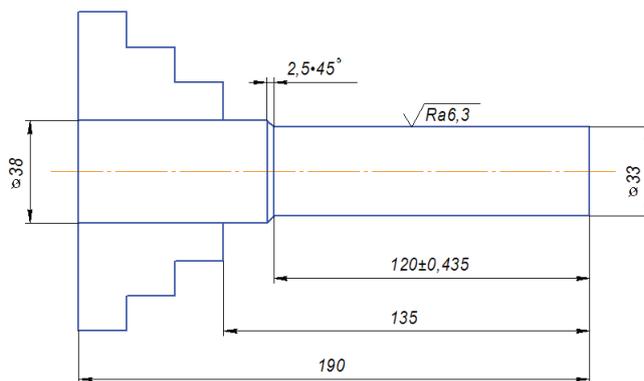
В процессе подготовки управляющей программы для станков с ЧПУ деталь рассматривается в системе станок–приспособление–инструмент–деталь. Заготовка устанавливается на станке с помощью приспособления, которое фиксирует положение будущей детали относительно начального положения рабочих органов станка, определяющих и положение режущего инструмента. Траектория режущего инструмента строится относительно контура детали, а затем преобразуется в движение соответствующих рабочих органов станка. Для этого используются системы координат детали и инструмента.

Связь систем координат детали ( $X_d Y_d Z_d$ ) и инструмента ( $X_n Y_n Z_n$ ) при токарной обработке представлена на рис. 2.

Для построения математической модели формообразования поверхности с помощью производящей кромки резца необходимо описать ее в системе координат ( $X_n Y_n Z_n$ ), которая связана

**Исходные данные для расчета**  
**Initial data for calculation**

Поправочные коэффициенты	$C_v$	$x$	$y$	$m$	$C_p$	$K_p$	$K_v$
	350	0,15	0,45	0,2	300/243/339	1,44/1,83/1,83	0,69
Справочные данные	$T$			$t$		$S$	
	45 мин			2,5 мм		0,4 мм/об	
Материал и вид детали	Вал из стали марки – Сталь 40Х (ГОСТ 4543-71). Диаметр детали, в миллиметрах, с качеством точности – 33h14, длина – 120 мм						
Вид обработки	Однократное черновое точение						
Материал и геометрия режущего инструмента	Проходной резец Т15К6 ГОСТ 18878–73 с размером державки 16×25 и следующими геометрическими элементами резца: главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$ ; передний угол $\gamma = 0^\circ$ ; угол наклона главного лезвия $\lambda = 0^\circ$						
Исследуемые факторы, влияющие на точность обработки	Силы резания						
Схема базирования и закрепления заготовки	Заготовка, закрепленная в токарном патроне без заднего центра, представлена на рисунке						



*Примечание:*  $C_v$  – значение коэффициента скорости резания при наружном продольном точении проходным резцом Т15К6 ГОСТ 18882–73 с размером державки 16×25;  $x$  – показатель степени глубины резания инструмента;  $y$  – показатель степени подачи инструмента;  $m$  – показатель степени периода стойкости инструмента;  $C_p$  – постоянное значение коэффициента силы резания при наружном продольном точении конструкционной стали проходным резцом из твердого сплава для соответствующей силы резания;  $K_p$  – поправочный коэффициент, который представляет собой произведение ряда коэффициентов ( $K_p = K_{mp} K_{\varphi p} K_{\gamma p} K_{\lambda p}$ ), учитывающих фактические условия резания. Численные значения этих коэффициентов приведены в справочнике технолога машиностроителя:  $K_{mp}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости ( $K_{mp} = 1,31$ );  $K_{\varphi p}$  – поправочный коэффициент, учитывающий величину главного угла в плане ( $K_{\varphi p} = 1$ );  $K_{\gamma p}$  – поправочный коэффициент, учитывающий величину главного переднего угла ( $K_{\gamma p} = 1,1/1,4/1,4$ );  $K_{\lambda p}$  – поправочный коэффициент, учитывающий величину угла наклона режущей кромки ( $K_{\lambda p} = 1$ );  $K_v$  – коэффициент, являющийся произведением коэффициентов, учитывающих влияние материала заготовки  $K_{mv}$ , состояния поверхности  $K_{nv}$ , материала инструмента  $K_{iv}$  [24].

с данным режущим инструментом. При этом можно воспользоваться матрицами перехода из одной системы координат в другую. Так как в процессе обработки детали возникают погрешности, то режущий инструмент устанавливаем

относительно детали с возможной погрешностью, в связи с этим в процессе формообразования поверхности детали ее реальный профиль будет отличаться от профиля режущего инструмента. При формообразовании поверхность

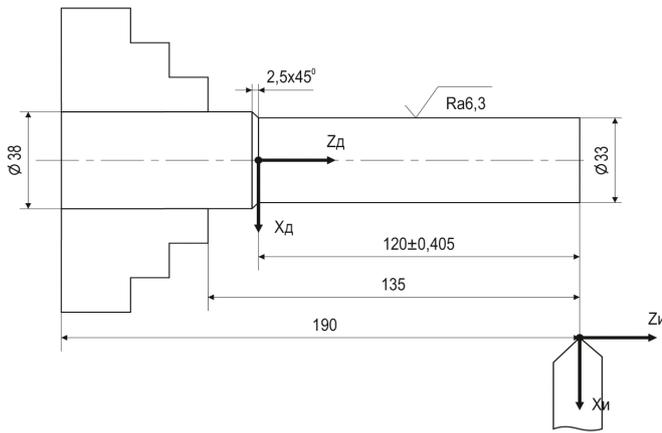


Рис. 2. Связь систем координат детали и инструмента при обработке

Fig. 2. The connection of the coordinate systems of the part and tool during machining

детали представляет собой след движения кромки режущего инструмента, поэтому для построения математической модели формообразования детали типа вал кромкой проходного резца в системе координат детали  $X_d Y_d Z_d$  используем преобразование систем координат. В процессе формообразования деталь совершает круговое движение относительно режущего инструмента, в связи с чем в качестве независимого параметра движения вращения при обработке вала выбираем угол поворота детали  $\xi$ .

Тогда математическая модель примет следующий вид:

$$X_i = \cos(\nu) \cos(\varphi) \times \\ \times (t_i \sin(\omega) + b_i) + \cos(\nu) \sin(\varphi) \times \\ \times (t_i \cos(\omega) - h_i) + \Delta x + L; \quad (3)$$

$$Y_i = (\sin(\nu) \cos(\varphi) (\cos(\xi) \sin(\lambda) - \sin(\xi) \cos(\lambda)) - \\ - \sin(\varphi) (\cos(\xi) \cos(\lambda) + \sin(\xi) \sin(\lambda))) \times \\ \times (t_i \sin(\omega) + b_i) + (\sin(\nu) \sin(\varphi) (\cos(\xi) \sin(\lambda) - \sin(\xi) \times \\ \times \cos(\lambda)) + \cos(\varphi) (\cos(\xi) \cos(\lambda) + \sin(\xi) \sin(\lambda))) \times \\ \times (t_i \cos(\omega) - h_i) - \Delta z \cdot \sin(\xi) + \\ + \Delta y \cos(\xi) - R \cos(\xi); \quad (4)$$

$$Z_i = (\cos(\varphi) \sin(\nu) (\sin(\xi) \sin(\lambda) + \cos(\xi) \cos(\lambda)) - \\ - \sin(\varphi) (\sin(\xi) \cos(\lambda) - \cos(\xi) \sin(\lambda))) \times \\ \times (t_i \sin(\omega) + b_i) + (\sin(\varphi) \sin(\nu) (\sin(\xi) \sin(\lambda) + \cos(\xi) \times$$

$$\times \cos(\lambda)) + \cos(\varphi) (\sin(\xi) \cos(\lambda) - \cos(\xi) \sin(\lambda))) \times \\ \times (t_i \cos(\omega) - h_i) + \Delta z \cos(\xi) + \\ + \Delta y \sin(\xi) - R \sin(\xi), \quad (5)$$

где  $t_i$  – независимый параметр текущей точки на линии  $i$ -го участка профиля режущего инструмента;  $\xi_i$  – независимый параметр движения вращения при обработке вала, в качестве которого выбран угол поворота детали;  $\omega$ ,  $h_i$ ,  $b_i$  – геометрические параметры резца;  $R$  – радиус формообразуемой детали;  $L$  – длина формообразуемой поверхности;  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\varphi$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  – угловые и линейные погрешности установки РИ относительно детали.

С целью определения конкретных значений пространственного отклонения реального профиля детали от номинального в процессе материалообработки под действием упругих деформаций, в дальнейшем с учетом симуляции действительной САД-модели вала проведено численное моделирование. Анализ литературных источников [20–23] показывает, что наиболее эффективным методом является метод конечных элементов.

Для подтверждения эффективности предлагаемого способа и проверки адекватности математической модели проведен эксперимент – обработка двух партий деталей.

Первая партия обрабатывалась без учета возникающих погрешностей, как показано на рис. 3, вторая партия деталей подлежала обработке по программе с измененной траекторией перемещения вершины резца на основе трансформированной САД-модели и разработанной концептуальной модели, как представлено на рис. 4.

Каждая деталь из партий измерялась в пяти сечениях на координатно-измерительной машине в 100 точках по окружности. Так как деталь имеет цилиндрическую форму, то измерения проводились в два этапа, т. е. измерялась первая половина диаметра (50 точек), затем вторая половина, итого общее круговое измерение каждого сечения осуществлялось в 100 точках (рис. 5).

Первое сечение, которое представлено на рис. 5, – это сечение, максимально приближенное к торцу детали, относительно которого начиналась обработка. Сечения были сделаны с

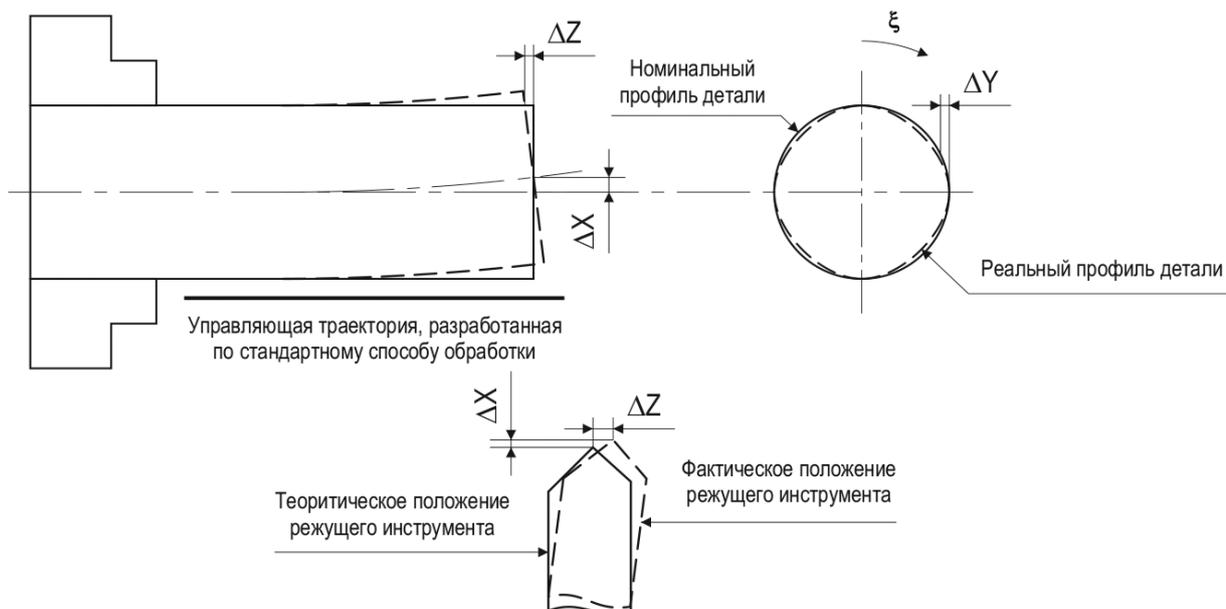


Рис. 3. Моделирование процесса резания по традиционному способу

Fig. 3. Simulation of the cutting process in the traditional way

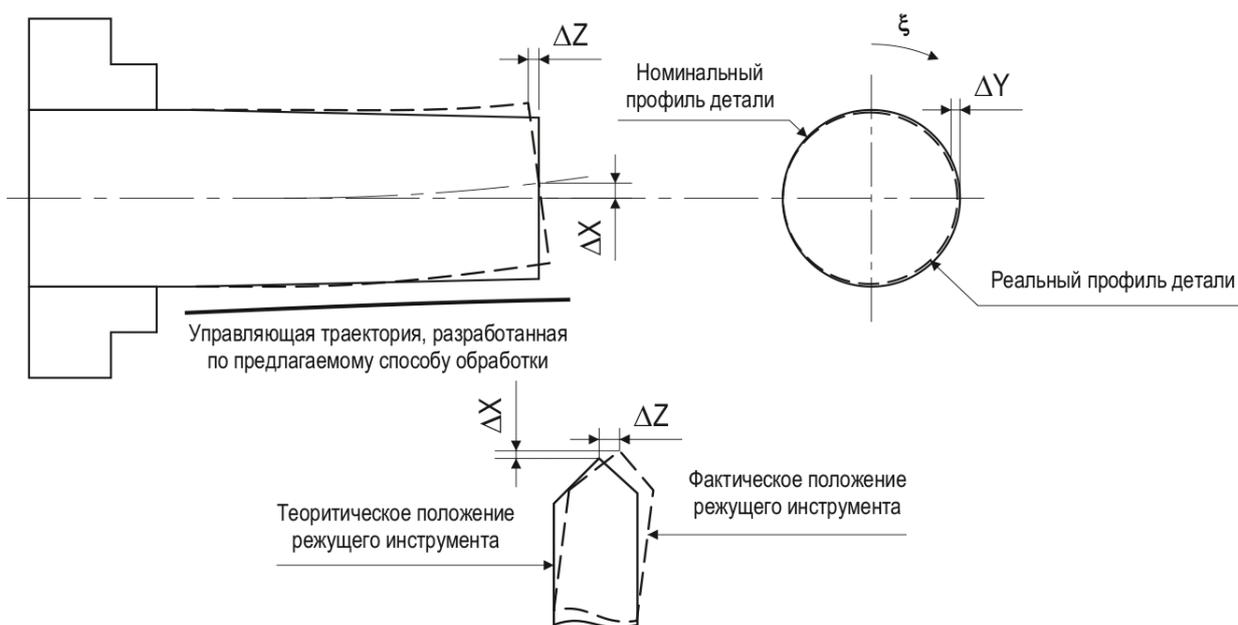


Рис. 4. Моделирование процесса резания по предлагаемому способу

Fig. 4. Simulation of the cutting process of the proposed method

интервалом 25 мм начиная от сечения, находящегося на расстоянии 5 мм от правого торца детали. Измерительные операции проводились относительно номинального диаметра.

Для статистической обработки полученных результатов эксперимента по параметрам качества изготавливаемой продукции в зависи-

мости от вида технической системы и целей оценки в данной работе используется опытно-статистический метод оценки надежности, так как он производится на основе статистической обработки выборки, а также позволяет оценивать надежность действующих технологических систем.

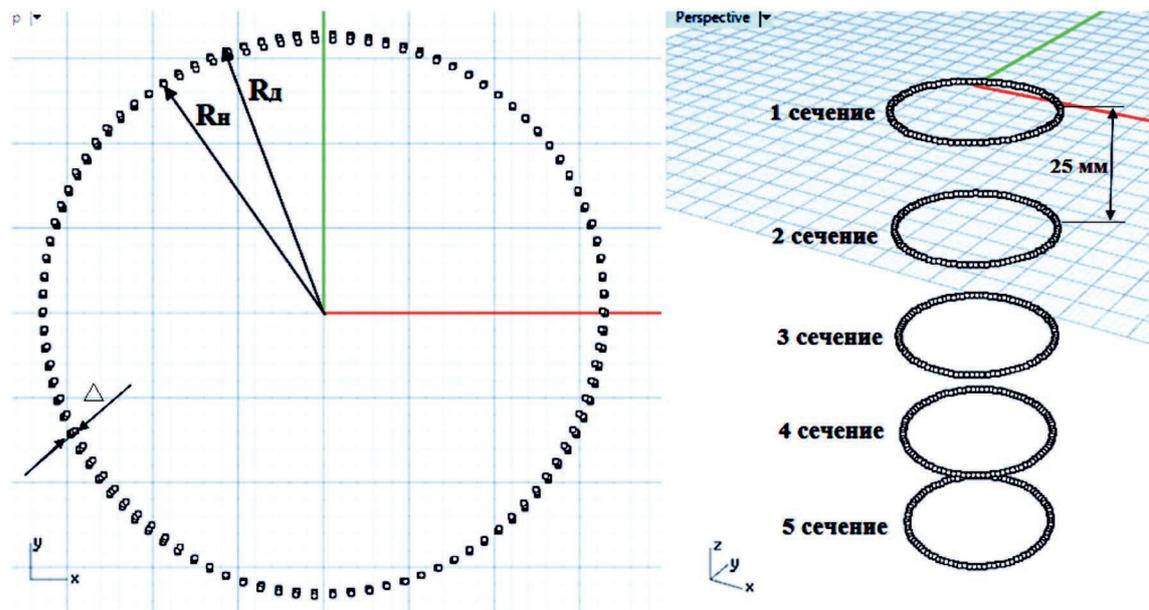


Рис. 5. Результаты измерений после обработки партии деталей с учетом изменения траектории управляющих органов станка по предложенному способу управления геометрической точностью обработки:

$R_n$  – номинальный радиус детали;  $R_d$  – действительный радиус детали;  $\Delta$  – величина отклонения действительного диаметра детали от номинального

Fig. 5. Measurement results after batch processing taking into account the change in the trajectory of the machine controls, Under the proposed method of controlling the geometric precision of processing:

$R_n$  is the nominal radius of the part;  $R_d$  – the actual radius of the part;  $\Delta$  – the deviation of the actual diameter of the part from the nominal

### Выводы

1. Разработана модель управления геометрической точностью деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ посредством математического и конечно-элементного моделирования

2. Предлагаемый способ позволяет сократить основное технологическое время обработки путем исключения дополнительных уточняющих проходов режущего инструмента, а также обеспечить управление качеством детали. Результаты экспериментальных исследований показывают снижение процента вероятностного брака, который при обработке первой партии составил всего 0,05 % (по предлагаемому способу), а при обработке второй партии (без изменения САД-модели заготовки перед непосредственной генерацией управляющей программы) – 12,5 %.

### Список литературы

1. Putilova U.S., Nekrasov Y.I., Lasukov A.A. Loading of the manufacturing systems elements in

the process of unsteady mode cutting and the models of their arrangement deviations // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 192–195. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.192.

2. Improving dimensional accuracy of turning on CNC equipment / R.Y. Nekrasov, I.V. Solovyov, A.I. Starikov, O.V. Bekareva // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 95–100. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.95.

3. Numerical studies to determine spatial deviations of a workpiece that occur when machining on CNC machines / R.Y. Nekrasov, I.V. Solovyov, A.I. Starikov, Y.A. Tempel, O.A. Tempel // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01072. – DOI: 10.1051/mateconf/201712901072.

4. Artamonov E.V., Chernyshov M.O., Pomigalova T.E. Improving the performance of modular drills with interchangeable cutting heads // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, iss. 7. – P. 626–627. – DOI: 10.3103/S1068798X17070048.

5. Mechanics of chip formation in cutting / E.V. Artamonov, D.V. Vasil'ev, V.V. Kireev, M.Kh. Uteshev // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, iss. 7. – P. 450–454. – DOI: 10.3103/S1068798X17050069.



6. Kudryashov E.A., Smirnov I.M. Tool guarantee of intermittent cutting processes // *Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 17, N 6. – P. 887–892.

7. Kudryashov E.A., Pavlov E.V., Smirnov I.M. Justification of damping cutter design for making parts for high-pressure drilling unit cylinders // *Journal of Mining Science*. – 2017. – Vol. 53, iss. 3. – P. 484–488. – DOI: 10.1134/S1062739117032403.

8. Kovalev I.A., Nikishechkin P.A., Grigoriev A.S. Approach to programmable controller building by its main modules synthesizing based on requirements specification for industrial automation // *Proceedings International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – St. Petersburg, 2017. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076121.

9. Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems / G.M. Martinov, N.V. Kozak, R.A. Nezhmetdinov, A.I. Obukhov, L.I. Martinova // *Automation and Remote Control*. – 2017. – Vol. 78, iss. 3. – P. 525–536. – DOI: 10.1134/S0005117917030122.

10. Approach to the diagnosis and configuration of servo drives in heterogeneous machine control systems / G.M. Martinov, S.V. Sokolov, L.I. Martinova, A.S. Grigoryev, P.A. Nikishechkin // *Advances in swarm intelligence. ICSI 2017* / ed. by Y. Tan, H. Takagi, Y. Shi, B. Niu. – Cham: Springer, 2017. – P. 586–594. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 10386). – DOI: 10.1007/978-3-319-61833-3\_62.

11. Error compensation of complex three-dimensional surfaces machined on computer-numeric-control grinding machine tools / M. Raoufinia, Y.V. Petrakov, A. Ataei, R. Parand, K. Abou-El-Hossein // *Journal of Applied Sciences*. – 2009. – Vol. 9, iss. 7. – P. 1356–1361. – DOI: 10.3923/jas.2009.1356.1361.

12. Petrakov Y., Danylchenko M., Petryshyn A. Programming spindle speed variation in turning // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 2, N 1 (86). – P. 4–9. – DOI: 10.15587/1729-4061.2017.95204.

13. Lasukov A.A., Mokhovikov A.A. Influence of modified layer of tool on stress – Strain state of cutting wedge // *Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012 [6357720]*. – Tomsk, 2012. – DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357720.

14. Лысенко А.Ф., Изюмов А.И., Гончаров О.В. К оценке погрешности обработки деталей при ин-

теллектуальном управлении станком // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2014. – Т. 14, № 3 (78). – С. 96–102. – DOI: 10.12737/5712.

15. Структура и принципы работы интеллектуальной системы управления обработкой на станках с ЧПУ / Р.Ю. Некрасов, А.И. Стариков, И.В. Соловьев, О.В. Бекарева // *Технология и материалы*. – 2015. – № 4. – С. 41–48.

16. Щуров И.А., Болдырев И.С. Моделирование процесса резания заготовок из композитных материалов с применением метода конечных элементов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. – 2012. – № 12. – С. 143–149.

17. Кузнецов А.С., Дроздов А.А. Технологическое обеспечение точности при обработке на станках с ЧПУ // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2. – С. 165–170.

18. Никишечкин П.А., Григорьев А.С. Практические аспекты разработки модуля диагностики и контроля режущего инструмента в системе ЧПУ // *Вестник МГТУ СТАНКИН*. – 2013. – № 4 (27). – С. 65–70.

19. Иващенко А.П. Методы и средства контроля состояния режущего инструмента // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2015. – № 12-3. – С. 393–396.

20. Неизвестных А.Г., Крылов Е.Г. Анализ точности обработки деталей на станках с ЧПУ // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2008. – № 9 (47). – С. 89–91.

21. Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Ферзалиев И.А. Применение метода конечных элементов при расчете трехслойных балок // *Наука в цифрах*. – 2016. – № 1. – С. 14–16. – DOI: 10.21661/r-114933.

22. Шаламов В.Г. Математическое моделирование при резании металлов. – Челябинск: Изд-во ЮжУрГУ, 2007. – 100 с.

23. Иванов В.И. Технологическое обеспечение точности и математическое моделирование процессов механообработки в машиностроении. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2001. – 194 с.

24. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – 418 с. – ISBN 5-217-03085-2.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



## Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Conceptual Model for Controlling the Geometric Precision of Parts Processed on CNC Machines

Roman Nekrasov<sup>a</sup>, Julia Tempel<sup>b, \*</sup>

Tyumen Industrial University, 38 Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7594-6114>, [Nekrasovrj@tyuiu.ru](mailto:Nekrasovrj@tyuiu.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7392-0412>, [Tempeljulia@mail.ru](mailto:Tempeljulia@mail.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 25 April 2019

Revised: 25 May 2019

Accepted: 15 July 2019

Available online: 15 September 2019

##### Keywords:

Engineering

Machining

Technological system

CNC machine

Metalworking accuracy

Quality of parts

Reliability

Geometric accuracy

Mathematical simulation

Finite element modeling

Cutting force

#### ABSTRACT

**Introduction.** Integrated automation of production processes is the main achievement of scientific and technological progress. The creation and use of flexible production modules and production complexes for material processing by cutting leads to the acquisition and mass use of numerical control machines (CNC). Also at the same time, there is a trend of obsolescence of the machine stock of enterprises and a decrease in the initial quality of this equipment, therefore, the actual task is to ensure and improve the quality of the products produced while simultaneously reducing their cost. The aim of the work is to increase the effectiveness of technological processes in turning machining on machines with numerical program control due to mathematical and finite element modeling. In this work, the stress-deformed state of a part in the software product SolidWorks Simulation from the effects of cutting forces and on the basis of mathematical modeling were carried out taking into account the strain deviations, a transformable CAD model of the workpiece was obtained and a control program for this machine was developed for this model. When performing the work, the following research **methods** were used: methods of computational mathematics, mathematical modeling, matrix analysis, statistical processing of experimental results. Experimental studies were carried out using CAD / CAM system SolidWorks Simulation, turning center SMTCL CAK50135, coordinate measuring machine. The article presents a method of controlling the geometric accuracy of parts machined on CNC machines based on mathematical and finite element modeling. The control of the geometry of the parts is made according to the CAD model that characterizes the reference part. **Results and Discussion.** When processing two batches of blanks, the first of which was processed according to the traditional method, the second according to the offer, and determining the reliability of the technological operation, it was noted that the dispersion field of real values and the standard deviation decreased according to the proposed method, which confirms its effectiveness, since the percentage of probabilistic marriage is significantly reduced. Moreover, the developed model of geometric accuracy control of details, based on mathematical and finite element modeling, also contributes to the reduction of the main technological processing time by eliminating additional refining passes of the cutting tool.

**For citation:** Nekrasov R.Y., Tempel Ju.A. Conceptual model for controlling the geometric precision of parts processed on CNC machines. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 6–16. DOI: .10.17212/1994-6309-2019-21.3-6-16. (In Russian).

#### References

1. Putilova U.S., Nekrasov Y.I., Lasukov A.A. Loading of the manufacturing systems elements in the process of unsteady mode cutting and the models of their arrangement deviations. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 192–195. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.682.192.
2. Nekrasov R.Y., Solovyov I.V., Starikov A.I., Bekareva O.V. Improving dimensional accuracy of turning on CNC equipment. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 95–100. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.95.

#### \* Corresponding author

Tempel Julia A., Assistant

Tyumen industrial University

38 Volodarskogo

625000, Tyumen, Russian Federation

Tel.: +7 (902) 813-51-17, e-mail: [Tempeljulia@mail.ru](mailto:Tempeljulia@mail.ru)



3. Nekrasov R.Y., Solovyov I.V., Starikov A.I., Tempel Y.A., Tempel O.A. Numerical studies to determine spatial deviations of a workpiece that occur when machining on CNC machines. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01072. DOI: 10.1051/mateconf/201712901072.
4. Artamonov E.V., Chernyshov M.O., Pomigalova T.E. Improving the performance of modular drills with interchangeable cutting heads. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, iss. 7, pp. 626–627. DOI: 10.3103/S1068798X17070048.
5. Artamonov E.V., Vasil'ev D.V., Kireev V.V., Uteshev M.Kh. Mechanics of chip formation in cutting. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, iss. 7, pp. 450–454. DOI: 10.3103/S1068798X17050069.
6. Kudryashov E.A., Smirnov I.M. Tool guarantee of intermittent cutting processes. *Manufacturing Technology*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 887–892.
7. Kudryashov E.A., Pavlov E.V., Smirnov I.M. Justification of damping cutter design for making parts for high-pressure drilling unit cylinders. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, iss. 3, pp. 484–488. DOI: 10.1134/S1062739117032403.
8. Kovalev I.A., Nikishechkin P.A., Grigoriev A.S. Approach to programmable controller building by its main modules synthesizing based on requirements specification for industrial automation. *Proceedings International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, St. Petersburg, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076121.
9. Martinov G.M., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A., Obukhov A.I., Martinova L.I. Method of decomposition and synthesis of the custom CNC systems. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 78, iss. 3, pp. 525–536. DOI: 10.1134/S0005117917030122.
10. Martinov G.M., Sokolov S.V., Martinova L.I., Grigoryev A.S., Nikishechkin P.A. Approach to the diagnosis and configuration of servo drives in heterogeneous machine control systems. *Advances in Swarm Intelligence. ICSI 2017. Lecture Notes in Computer Science*. Ed. by Y. Tan, H. Takagi, Y. Shi, B. Niu. Cham, Springer, 2017, vol. 10386, pp. 586–594. DOI: 10.1007/978-3-319-61833-3\_62.
11. Raoufinia M., Petrakov Y.V., Ataei A., Parand R., Abou-El-Hossein K. Error compensation of complex three-dimensional surfaces machined on computer-numeric-control grinding machine tools. *Journal of Applied Sciences*, 2009, vol. 9, iss. 7, pp. 1356–1361. DOI: 10.3923/jas.2009.1356.1361.
12. Petrakov Y., Danylchenko M., Petryshyn A. Programming spindle speed variation in turning. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 2, no. 1 (86), pp. 4–9. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.95204.
13. Lasukov A.A., Mokhovikov A.A. Influence of modified layer of tool on stress – Strain state of cutting wedge. *Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012 [6357720]*, Tomsk, 2012. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357720.
14. Lysenko A.F., Izyumov A.I., Goncharov O.V. K otsenke pogreshnosti obrabotki detalei pri intellektual'nom upravlenii stankom [On estimated accuracy of part cutting under machine intelligent control]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2014, vol. 14, no. 3 (78), pp. 96–102. DOI: 10.12737/5712.
15. Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Soloviev I.V., Bekareva O.V. Struktura i printsipy raboty intellektual'noi sistemy upravleniya obrabotkoi na stankakh s ChPU [Structure and working principles of intelligent systems a process control on CNC machines]. *Tekhnologiya i materialy = Technologies and Materials*, 2015, no. 4, pp. 41–48.
16. Shchurov I.A., Boldyrev I.S. Modelirovanie protsessa rezaniya zagotovok iz kompozitnykh materialov s primeneniem metoda konechnykh elementov [Finite element method calculation of free orthogonal cutting of composite materials]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the SUSU. Series "Mechanical engineering industry"*, 2012, no. 12, pp. 143–149.
17. Kuznetsov A.S., Drozdov A.A. Tekhnologicheskoe obespechenie tochnosti pri obrabotke na stankakh s ChPU [Technological support accuracymachining on CNC machines]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2015, no. 2, pp. 165–170.
18. Nikishechkin P.A., Grigor'ev A.S. Prakticheskie aspekty razrabotki modulya diagnostiki i kontrolya rezhushchego instrumenta v sisteme ChPU [Practical aspects of the developmentof the module diagnosis and monitoring of cutting tools in the CNC]. *Vestnik MGTU "STANKIN" = Vestnik of MSTU "Stankin"*, 2013, no. 4 (27), pp. 65–70.
19. Ivashchenko A.P. Metody i sredstva kontrolya sostoyaniya rezhushchego instrumenta [Methods and resources control the wear cutting tools]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International journal of applied and fundamental research*, 2015, no. 12-3, pp. 393–396.

20. Neizvestnykh A.G., Krylov E.G. Analiz tochnosti obrabotki detalei na stankakh s ChPU [Analysis of the accuracy of machining parts on CNC machines]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia Volgograd State Technical University*, 2008, no. 9 (47), pp. 89–91.

21. Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Ferzaliyev I.A. Primenenie metoda konechnykh elementov pri raschete trekhsloinykh balok [Application of last elements during calculating the three-layer beams]. *Nauka v tsifrakh = Science in Numbers*, 2016, no. 1, pp. 14–16. DOI: 10.21661/r-114933.

22. Shalamov V.G. *Matematicheskoe modelirovanie pri rezanii metallov* [Mathematical modeling in metal cutting: a training manual]. Chelyabinsk, YuzhUrGU Publ., 2007. 100 p.

23. Ivanov V.I. *Tekhnologicheskoe obespechenie tochnosti i matematicheskoe modelirovanie protsessov mekhanoobrabotki v mashinostroenii* [Technological support for accuracy and mathematical modeling of machining processes in mechanical engineering]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2001. 194 p.

24. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya*. V 2 t. T. 2 [Reference book of the technologist. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 418 p. ISBN 5-217-03085-2.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).