



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



## Расчетно-экспериментальная оценка технологических деформаций при «мягких» режимах токарной обработки тонкостенных деталей

Пётр Еремейкин<sup>1, a, \*</sup>, Аягма Жаргалова<sup>2, b</sup>, Сергей Гаврюшин<sup>1, 2, c</sup>

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, г. Москва, 101990, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, г. Москва, 105005, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6291-8309>, [eremeykin@gmail.com](mailto:eremeykin@gmail.com), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>, [azhargalova@bmstu.ru](mailto:azhargalova@bmstu.ru),

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6547-1351>, [gss@bmstu.ru](mailto:gss@bmstu.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.941.01

#### История статьи:

Поступила: 15 декабря 2017  
 Рецензирование: 17 января 2018  
 Принята к печати: 15 февраля 2018  
 Доступно онлайн: 15 марта 2018

#### Ключевые слова:

Назначение режимов резания  
 Токарная обработка  
 Технологические деформации  
 Тонкостенная деталь  
 Программная система  
 Эксперимент  
 Режимы резания

#### Благодарности:

Коллектив авторов выражает благодарность к.т.н. Семисалову Виталию Ивановичу и токарю Комарову Владимиру Яковлевичу за техническую помощь.

#### Финансирование:

Работа выполнена в рамках гранта «Автоматизация мониторинга технических систем и технологических процессов в рамках концепции цифрового производства» № 2.7918.2017/8.9.

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В авиационной, космической, энергомашиностроительной и других отраслях промышленности широко используются относительно податливые изделия в первую очередь в форме тонкостенных оболочек. Для подобных деталей актуальна задача минимизации характерных технологических деформаций, сопровождающих процесс обработки и связанных с искажением формы заготовки. С целью минимизации технологических деформаций и рисков используется специализированная дополнительная оснастка, что существенно повышает трудоёмкость изготовления изделий. В работе рассматривается альтернативный способ снижения технологических деформаций посредством использования «мягких» режимов обработки, подразумевающий выбор рациональных параметров резания и условий закрепления на основе результатов численного моделирования. Предложенный метод может быть востребован для этапа проектирования технологических процессов и отвечает современным тенденциям цифрового производства в рамках Национальной технологической инициативы. Для успешного внедрения предлагаемого подхода была разработана интегрированная система поддержки принятия решений о выборе режимов механической обработки тонкостенных деталей, которая позволяет технологам оперативно оценивать применимость выбранных режимов резания с учетом податливости заготовки. **Цель работы:** экспериментальная проверка работоспособности разработанной системы и метода «мягких» режимов обработки. **В работе рассматривается** случай черновой токарной обработки полой цилиндрической заготовки, закрепленной в трехкулачковом патроне. **Методы исследования:** эксперимент проведен на специально подготовленном стенде, в состав которого входят: токарный станок, трехкулачковый патрон, штатив и измерительная головка. Измерения отклонений проводятся в заранее определенных точках на поверхности заготовки с применением измерительной головки. **Результаты и обсуждение.** Результаты эксперимента представлены в графическом виде. На графиках отклонений показаны теоретические и экспериментальные кривые для различных сечений заготовки. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований с расчетными данными, полученными с помощью численного моделирования технологического процесса, позволяет сделать вывод о целесообразности использования «мягких» режимов при токарной обработке податливых деталей.

**Для цитирования:** Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Гаврюшин С.С. Расчетно-экспериментальная оценка технологических деформаций при «мягких» режимах токарной обработки тонкостенных деталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 22–32. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32.

#### \*Адрес для переписки

Еремейкин Пётр Александрович, аспирант  
 Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
 Малый Харитоньевский переулок, д. 4,  
 101990, г. Москва, Россия  
 Тел.: 8 (916) 662-57-38, e-mail: eremeykin@gmail.com

## Введение

С развитием авиационной и космической промышленности конструкционные требования к тонкостенным деталям становятся все более жесткими [1], а экономические ограничения,

продиктованные политикой импортозамещения и перехода к тенденциям цифрового производства в рамках Национальной технологической инициативы, существенно влияют на выбор применяемого метода обработки. Поэтому механообработка тонкостенных деталей – распространенный объект рассмотрения ряда современных научных и прикладных исследований. К работе по проектированию технологических процессов привлекаются специалисты, имеющие обширные знания в каждой из узких областей, связанных с формированием параметров объектов производства. Информация о свойствах, полученных при воздействии на них, содержится в численном виде во множестве таблиц и полученных на их обобщении формул, для использования которых необходимо обращаться к справочной литературе, что приводит к значительным затратам времени.

Механическая обработка тонкостенных деталей всегда представляет особые трудности для технологов: для обработки тонкостенных деталей неприменимы традиционные, хорошо освоенные методы закрепления детали, а также режимы резания, полученные с помощью типовых расчетов [2]. Деформации, вызываемые силами резания и закрепления, существенно влияют на результирующую точность размеров и могут стать решающим фактором, вследствие которого деталь будет признана браком.

Как показывает обзор литературы [3, 4, 5], для обработки тонкостенных деталей технологи применяют несколько производственных приемов, позволяющих снизить влияние упругих деформаций. Например, к таким приемам относят заполнение заготовки плавким технологическим материалом, закрепление в сырых кулачках или разжимной оправке. Указанные методы связаны с ростом затрат на изготовление детали, так как для их применения требуется дополнительная оснастка. Особенно ярко это проявляется для единичного и мелкосерийного производства.

Современные исследования в области обработки тонкостенных деталей часто затрагивают анализ технологических деформаций с помощью CAE (Computer-aided engineering) продуктов [6–10]. Например, в статье [6] продемонстрирована возможность применения системы *Abaqus* для анализа деформаций и сил, возникающих при фрезеровании тонкостенной заготовки. Применимость метода конечных элементов (МКЭ) [11,

12] для анализа технологических деформаций также подтверждена хорошим соответствием теоретического и экспериментального результата, статья [13]. Исследователи заинтересованы в поиске нового метода производства нежестких деталей: авторы статьи [14] рассматривают применимость аддитивных технологий для изготовления такого рода деталей. Тем не менее ввиду новизны и относительно слабого развития аддитивных технологий этот метод не способен обеспечить удовлетворительной шероховатости и изотропной структуры без дополнительной механической обработки даже при применении термообработки. В работе [15] затрагиваются вопросы влияния различных стратегий обработки и способов закрепления на качество обработанной детали.

В настоящее время предложен метод «мягких» режимов резания [16], на котором будет сосредоточено основное внимание настоящей статьи. В основе метода лежит рациональный выбор режимов обработки, для которого используются результаты численного моделирования деформаций, возникающих при обработке. С таким подходом предлагается отказаться от применения дополнительной оснастки, что положительно скажется на стоимости детали. Как было показано в статье [17], для успешного внедрения метода «мягких» режимов обработки требуется программная система, разработка которой описана в работе [18].

Предложенный авторами статьи [16] подход предполагается использовать для определения режимов обработки полых тонкостенных цилиндрических заготовок. В дальнейшем планируется данную методику применить для обработки вафельных конструкций.

Цель исследования состоит в экспериментальной проверке работоспособности разработанной системы и метода «мягких» режимов обработки. При этом решаются задачи определения методики проведения экспериментов, установления способа измерения деформаций, разработки устройства экспериментальной установки и интерпретации результатов.

## Методика исследований

Метод расчета «мягких» режимов обработки реализован в интегрированной системе поддержки принятия решений выбора [19], которая

позволяет управлять цифровым макетом изделия: 3D-моделирование деталей, виртуального моделирования и инженерного анализа. На сегодняшний день цифровое интеллектуальное проектирование – это инструменты, которые должны помогать создавать конкурентоспособные изделия во всех отраслях машиностроения.

Для моделирования в нашей системе требуется задать следующие параметры процесса: размеры заготовки, ее материал, силу зажатия кулачков и их геометрические характеристики, а также силу резания. Эти параметры следует контролировать во время проведения испытаний, для того чтобы максимально приблизить условия эксперимента к условиям моделируемого процесса. Графический интерфейс пользователя программы представлен на рис. 1, на котором обозначены следующие окна: 1 – окно ввода исходных данных для модуля расчета режимов резания; 2 – окно результатов модуля расчета режимов резания; 3 – окно редактора параметров; 4 – окно текстового вывода; 5 – окно гра-

фического модуля. Подробнее с функционалом и устройством программы можно ознакомиться в работах [17, 18].

Для проведения эксперимента была выбрана наиболее простая форма тонкостенной заготовки типа тело вращения – полый цилиндр. Размеры заготовки показаны на рис. 2. Материал заготовки – сталь 30ХГС.

Для анализа результатов работы программы и экспериментально полученных данных требуется измерять отклонения формы заготовки, поэтому были определены контрольные точки на поверхности заготовки, положение которых также показано на рис. 2. Точки измерения отстоят друг от друга в направлении оси заготовки на 7 мм и распределены равномерно по окружности с шагом 30° (как показано на рис. 2). Кулачок захватывает деталь на 15 мм. Усилие зажима в трехкулачковом патроне рассчитывается исходя из условия неподвижности заготовки после составления уравнений равновесия. Контроль усилия зажима осуществляется при помощи динамометрического ключа.

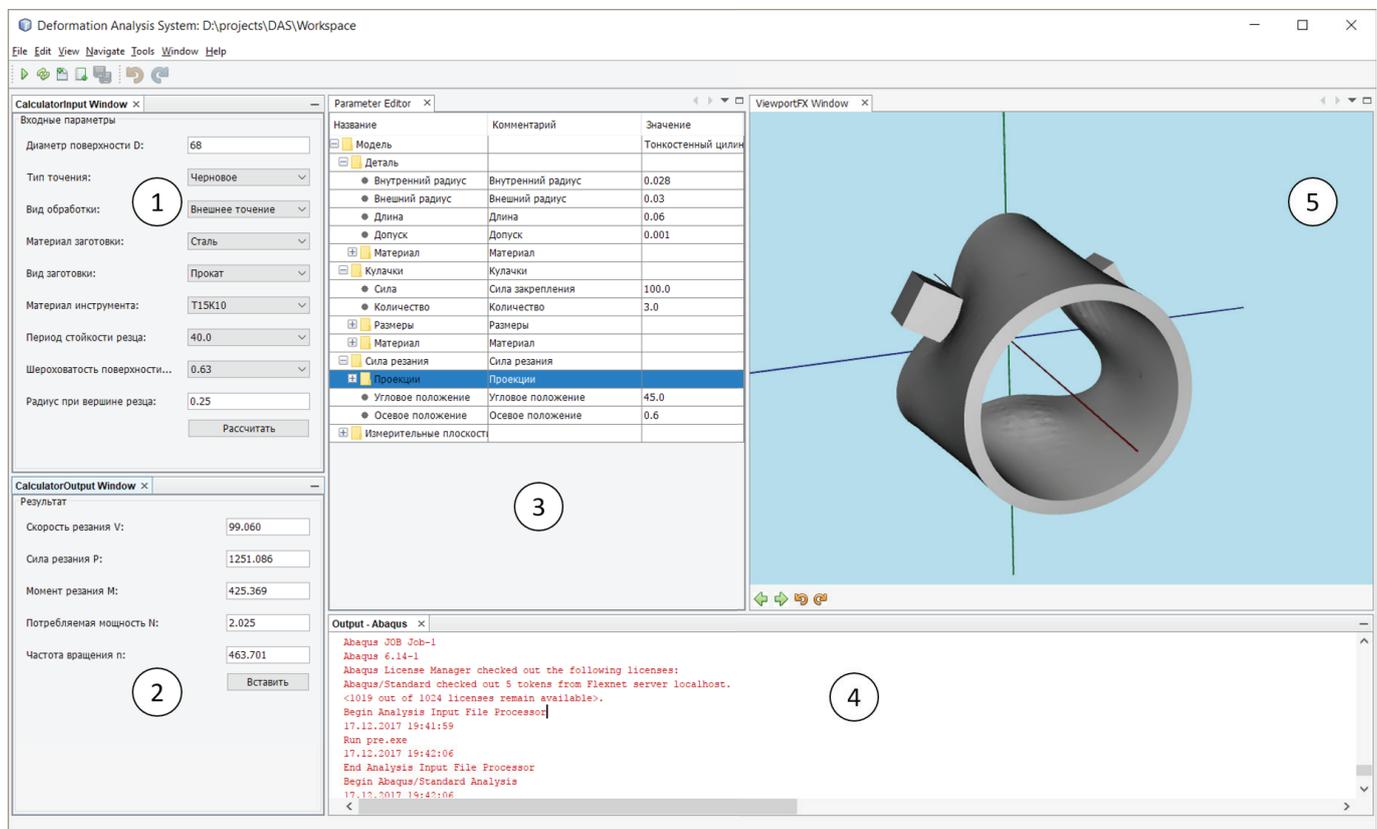


Рис. 1. Графический интерфейс системы анализа деформаций  
 Fig. 1. Graphical user interface of the deformation analysis system

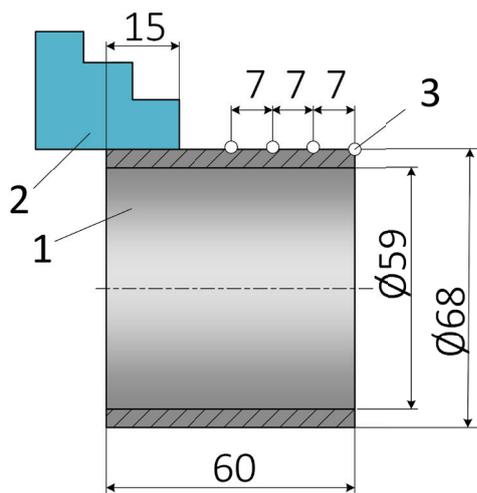


Рис. 2. Эскиз детали:

1 – заготовка; 2 – кулачок токарного патрона; 3 – точки измерения деформаций

Fig. 2. Sketch of the workpiece:

1 – workpiece; 2 – jaw; 3 – checkpoints

Исходя из общефизических положений и расчетных формул традиционной таблично-аналитической методики [20, 21] можно сделать вывод, что наиболее остро вопрос о деформациях тонкостенных деталей стоит при высокой подаче и глубине резания. Поэтому для эксперимента выбраны режимы резания, характерные для черновой обработки. Режимы резания были получены при помощи расчетного модуля, входящего в состав разработанной программной системы. Результат расчета представлен на рис. 3.

Частота вращения округлена до наиболее близкой, которая может быть выставлена на

станке. Так как расчетный модуль использует таблично-аналитическую методику, подача и глубина резания выбраны из ряда допустимых значений и не требуют округления. Результирующие режимы резания приведены в таблице.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 4. Деформации детали, зажатой в патроне, измеряются при помощи измерительной головки, закрепленной на штативе. Контрольные точки равномерно распределены в четырех сечениях. Угловое положение детали изменяется вручную поворотом патрона на  $30^\circ$ , которые отсчитывается по градусному лимбу на фланце трехкулачкового патрона.

Измерение деформаций заготовки происходит на четырех стадиях: а) до зажатия кулачков, при этом деталь удерживается патроном станка с минимально возможным усилием; б) сразу после зажатия кулачков до обработки; в) после обработки в закрепленном состоянии; г) после обработки в свободном состоянии с минимальным зажимом.

Таким образом, эксперимент составляет следующую последовательность действий:

- 1) установить заготовку в патрон токарного станка с минимальным зажимом;
- 2) выставить положение измерительного щупа на нулевом сечении детали (т. е. непосредственно на свободном торце);
- 3) выставить 0 на измерительной головке;
- 4) повернуть заготовку на  $30^\circ$  по шкале патрона;

CalculatorInput Window ×		CalculatorOutput Window ×	
<b>Входные параметры</b>		<b>Результат</b>	
Диаметр поверхности D:	68	Скорость резания V:	104.926
Тип точения:	Черновое	Сила резания P:	1236.772
Вид обработки:	Внешнее точение	Момент резания M:	420.503
Материал заготовки:	Сталь	Потребляемая мощн...:	2.120
Вид заготовки:	Прокат	Частота вращения n:	823.451
Материал инструмента:	T15K10	Подача S:	0.4
Период стойкости резца:	30.0	Глубина резания t:	1
Шероховатость поверхнос...:	0.63		
Радиус при вершине резца:	0.25		
	<input type="button" value="Рассчитать"/>		<input type="button" value="Вставить"/>

Рис. 3. Результат расчета режимов резания в программе

Fig. 3. The result of cutting modes calculation

**Режимы резания**  
**Cutting modes**

Обозначения	Параметр	Значение	
		Режимы, определенные по таблично-аналитической методике	Мягкие режимы
$n$	Частота вращения шпинделя	700 об/мин	800 об/мин
$S$	Подача	0,9 мм/об	0,4 мм/об
$t$	Глубина резания	1,25 мм	1 мм

**Результаты и их обсуждение**

Примеры обработанных деталей показаны на рис. 5. Слева изображена деталь, обработанная на стандартных режимах резания, а справа – на «мягких» режимах, указанных в таблице. Анализ показывает, что применение мягких режимов резания позволяет повысить качество поверхности детали. Однако главная цель подхода заключается не в повышении качества поверхности, которое достигается при финишной обработке, а в снижении огранки, вызванной технологическим деформированием.

Характерные значения перемещений, описывающие процесс упругой деформации, представлены на рис. 6 и 7 для сечений 0 и 21 мм соответственно. На графиках показаны полученные в ходе эксперимента отклонения в зависимости от углового положения заготовки. Теоретические кривые были построены при помощи численного моделирования в программе для ЭВМ [21].

Наибольшие расхождения возникают на крайнем сечении 21 мм и вызваны нестационарным характером начального этапа обработки.

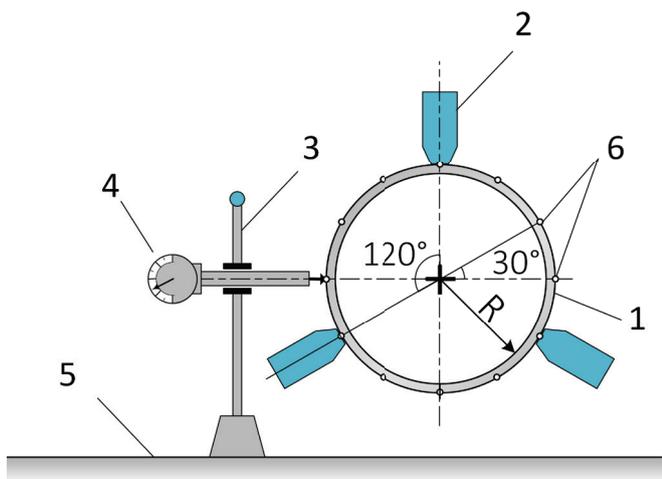


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1 – цилиндрическая заготовка; 2 – кулачок токарного патрона; 3 – штатив; 4 – измерительная головка; 5 – станина токарного станка; 6 – точки измерения

Fig. 4. The scheme of the experimental facility:

1 – cylindrical workpiece; 2 – chuck jaw; 3 – stand; 4 – indicator head; 5 – lathe base; 6 – checkpoints

5) записать показания на индикаторной головке;

6) повторить пп. 4, 5, пока измерительный щуп не вернется в исходное положение относительно детали;

7) сдвинуть деталь в направлении движения подачи на 7 мм;

8) повторить измерения, описанные в пп. 4–6 еще для трех сечений;

9) зажать заготовку и повторить измерения в пп. 2–8;

10) обработать заготовку, повторить измерения в пп. 2–8;

11) разжать заготовку до минимального усилия, но таким образом, чтобы она удерживалась в патроне, повторить измерения в пп. 2–8.

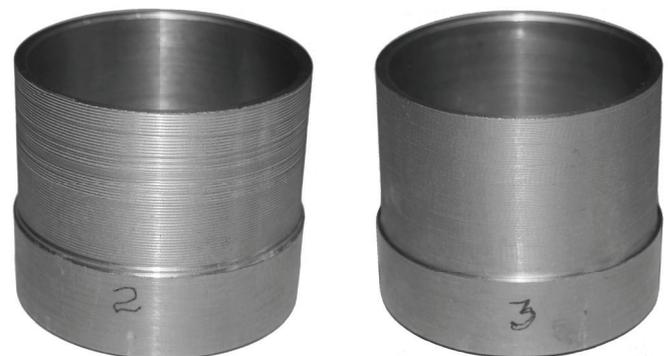


Рис. 5. Примеры обработанных деталей

Fig. 5. The samples of processed workpieces

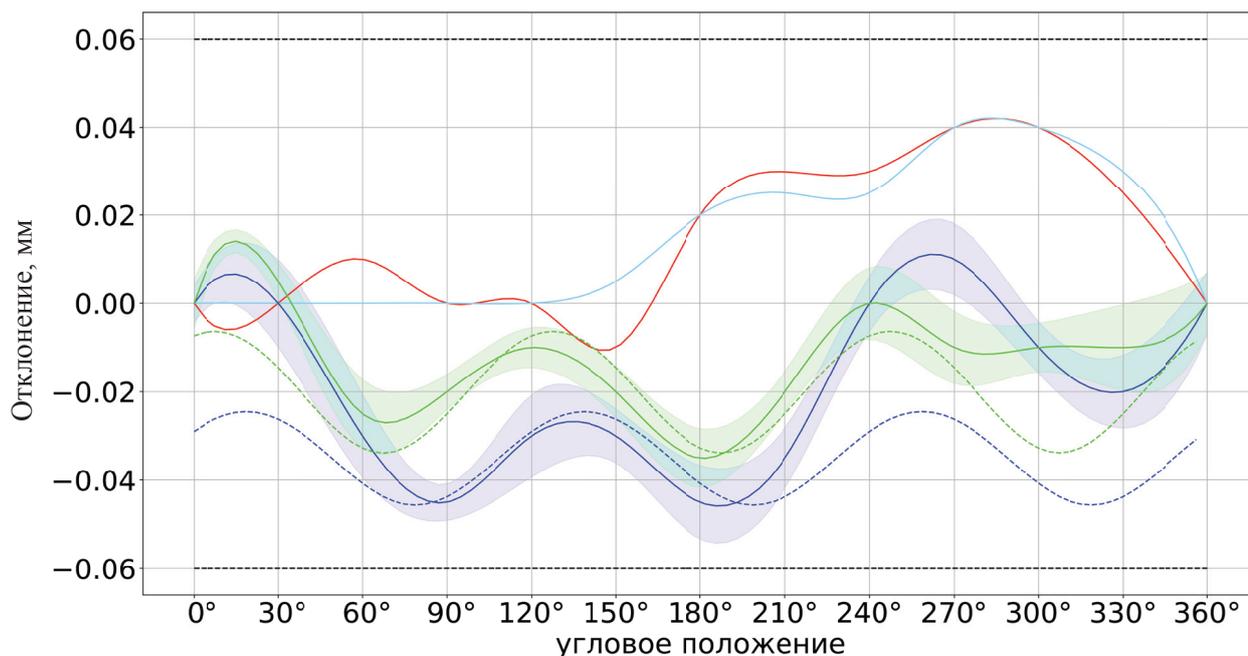


Рис. 6. График измеренных отклонений для сечения 0 мм

Fig. 6. The chart of measured deflections at 0 mm section

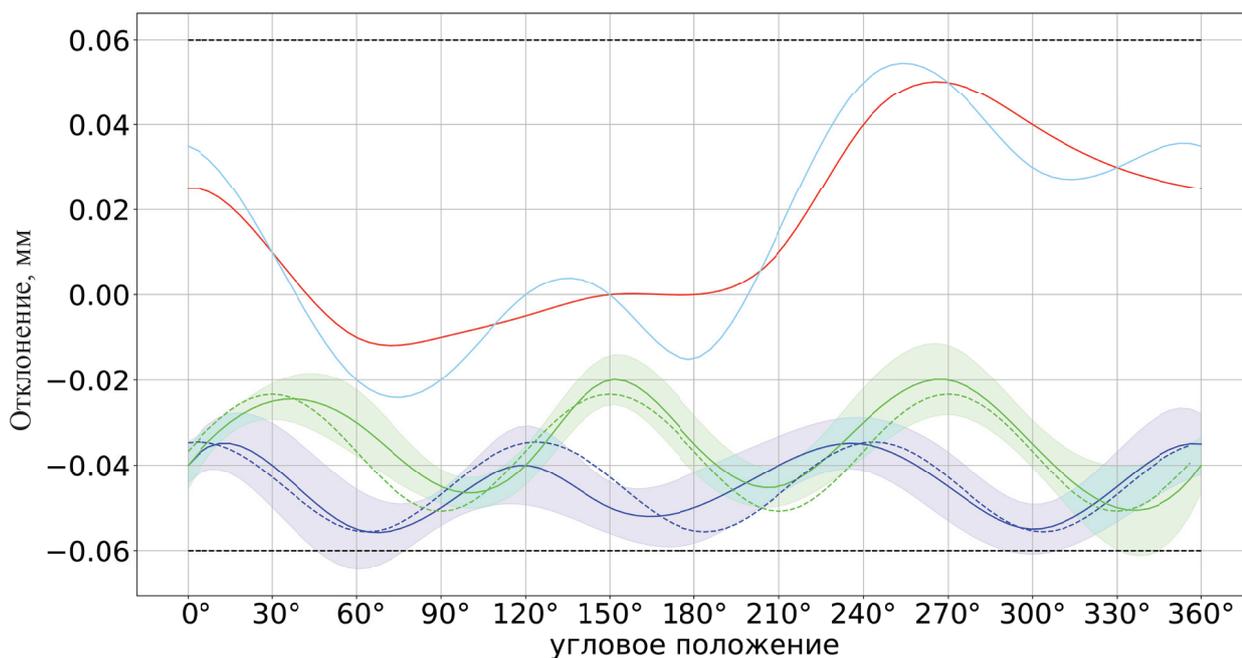


Рис. 7. График отклонений для сечения 21 мм

Fig. 7. The chart of measured deflections at 21 mm section

Обозначения на графиках, рис. 6 и 7 / Indications on charts:

- свободная до обработки / Free before treatment
- зажатая до обработки / Chucked before treatment
- зажатая после обработки / Chucked after treatment
- свободная после обработки / Free after treatment
- - - зажатая после обработки (теор.) / Chucked after treatment (theoretical)
- - - свободная после обработки (теор.) / Free after treatment (theoretical)

Кривые, соответствующие необработанной заготовке до закрепления и после, подтверждают, что тонкостенная заготовка существенно деформируется под действием силы закрепления: голубая кривая относительно красной приобретает минимумы, обусловленные воздействием кулачков токарного патрона. Это явно видно на рис. 7 для сечения, наиболее близкого к кулачкам.

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментом показывает хорошее совпадение для стационарного процесса резания, относительная погрешность в этом случае не превышает 24 %.

В целом форма и периодичность полученных эмпирических кривых соответствует результату численного моделирования, что позволяет говорить о подтверждении работоспособности программной системы для анализа режимов резания тонкостенных заготовок.

### Выводы

Метод мягких режимов резания был предложен в качестве альтернативного подхода для обработки тонкостенных деталей и расширяет возможности технолога в выборе способа изготовления в первую очередь в единичном и мелкосерийном производстве. Применение указанного способа целесообразно, для того чтобы избежать необходимости разрабатывать и закупать специализированную оснастку при производстве небольших партий изделий. Вместе с тем для внедрения метода мягких режимов резания потребуется применение специализированной программной системы, что накладывает ограничения на программную инфраструктуру предприятия. Применение метода мягких режимов рекомендуется рассматривать в том случае, если величина пружинения (т.е. упругого отклонения детали без снятия материала) сопоставима с глубиной резания.

В настоящей работе экспериментальные данные показали работоспособность спроектированной интегрированной программной системы, а также адекватность применяемых моделей и расчетных параметров. Полученные результаты подтверждают перспективность развиваемого метода мягких режимов механообработки тонкостенных деталей.

### Список литературы

1. Machining surface quality analysis of aluminum alloy thin-walled parts in aerospace / D. Bing, Y. Guangbin, G. Yan-qi, S. Jun-peng, W. Xue-mei, L. Yu-xin // *International Journal of Security and Its Applications*. – 2015. – Vol. 9, N 11. – P. 201–208. – doi: 10.14257/ijisia.2015.9.11.19.
2. Технология машиностроения. В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / под общ. ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 370 с. – ISBN 978-5-7038-3442-8.
3. Кузнецов Ю.И., Мослов А.Р., Бойков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ: справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с. – ISBN 5-217-01114-9.
4. Евгеньев Г.Б., Гаврюшин С.С., Хоботов Е.Н. Основы автоматизации технологических процессов и производств. В 2 т. Т. 2. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 479 с. – ISBN 978-5-7038-4139-6.
5. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts / S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, A.A. Becker // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2004. – Vol. 44, iss. 15. – P. 1629–1641. – doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.06.001.
6. Demyanenko E.G., Popov I.P., Menshikov V.S. Research of the process of axisymmetric forming of thin-walled flat blanks into the conical parts with minimal thickness variation // *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, Tomsk, Russia, 27–29 October 2016*. – Bristol, 2017. – Art. 012122. – (IOP conference series. Materials science and engineering; vol. 177). – doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012122.
7. Huang Y., Zhang X., Xiong Y. Finite element analysis of machining thin-wall parts: error prediction and stability analysis // *Finite element analysis – applications in mechanical engineering* / ed. by F. Ebrahimi. – Rijeka, Croatia: InTech, 2004. – doi: 10.5772/50374.
8. Joshi S.N., Bolar G.J. Three-dimensional finite element based numerical simulation of machining of thin-wall components with varying wall constraints // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. – 2017. – Vol. 98, iss. 3. – P. 343–352. – doi: 10.1007/s40032-016-0246-9.
9. Joshi S.N., Bolar G.J. Three-dimensional numerical modeling, simulation and experimental validation of milling of a thin-wall component // *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2017. – Vol. 231, iss. 5. – P. 792–804. – doi: 10.1177/0954405416685387.
10. Scippa A., Grossi N., Campatelli G. FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining // *Procedia CIRP*. – 2014 – Vol. 14. – P. 287–292. – doi: 10.1016/j.procir.2014.03.023.

11. *Zienkiewicz O.C.* The finite element method in engineering science. – London; New York: McGraw-Hill, 1972. – 521 p. – ISBN 978-0-0709-4138-0.

12. *Bathe K.J.* Finite element method procedures. – [S. l.]: Klaus-Jurgen Bathe, 2007. – 1037 p. – ISBN 978-0-9790-0490-2.

13. *Izamshah R.A., Mo J.P.T., Ding S.L.* Finite element analysis of machining thin-wall parts // *Key Engineering Materials*. – 2011. – Vol. 458. – P. 283–288. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.458.283.

14. Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies / A. Isaev, V. Grechishnikov, P. Pivkin, M. Kozochkin, Y. Ilyuhin, A. Vorotnikov // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 41. – P. 1023–1026. – doi: 10.1016/j.procir.2015.08.088.

15. *Shamsuddin K.A., Ab-Kadir A.R., Osman M.H.* A comparison of milling cutting path strategies for thin-walled aluminium alloys fabrication // *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*. – 2013. – Vol. 2, iss. 3. – P. 1–8.

16. Метод определения условий механической обработки тонкостенных деталей / С.С. Гаврюшин, А.Д. Жаргалова, Г.П. Лазаренко, В.И. Семисалов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2015. – № 11. – С. 53–61. – doi: 10.18698/0536-1044-2015-11-53-61.

17. *Жаргалова А.Д., Еремейкин П.А.* Программная система автоматизированного выбора режимов механической обработки тонкостенных деталей // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 9–14.

18. *Eremeykin P.A., Zhargalova A.D., Gavriushin S.S.* A software system for thin-walled parts deformation analysis // *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education* / ed. by Z. Hu, S.V. Petukhov, M. He. – Cham: Switzerland Springer Nature, 2018. – P. 259–265. – (Advances in intelligent systems and computing; vol. 658). – doi: 10.1007/978-3-319-67349-3\_24.

19. *Еремейкин П.А., Жаргалова А.Д., Лазаренко Г.П.* Интегрированная система поддержки принятия решения о выборе режимов механической обработки тонкостенных деталей: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663071.

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

21. *Гузев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В.* Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: справочник / под ред. В.И. Гузеева. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2007. – 368 с.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 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)



## Empirical Evaluation of Technological Deformations for “Soft” Cutting Modes During Thin-Walled Parts Turning

*Petr Eremeykin*<sup>1, a, \*</sup>, *Ayagma Zhargalova*<sup>2, b</sup>, *Sergei Gavriushin*<sup>1, 2, c</sup>

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4 Maly Kharitonievskiy Pereulok, Moscow, 101990, Russian Federation

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, 5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6291-8309>, [eremeykin@gmail.com](mailto:eremeykin@gmail.com), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6251-1004>, [azhargalova@bmstu.ru](mailto:azhargalova@bmstu.ru),

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6547-1351>, [gss@bmstu.ru](mailto:gss@bmstu.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 15 December 2017

Revised: 17 January 2018

Accepted: 15 February 2018

Available online: 15 March 2018

#### Keywords:

Cutting modes definition

Turning

Technological deformation

Thin-walled workpiece

Software

Experiment

Cutting modes

#### Acknowledgements:

The authors are grateful to *Vitalij Semisalov* and *Vladimir Komarov* for technical assistance.

#### Funding:

The work was carried out within grant: “Automation of technical systems and technological processes monitoring within the concept of digital manufacturing” No. 2.7918.2017 / 8.9.

### ABSTRACT

**Introduction.** The problem of thin-walled parts processing is actual for various areas: aviation and space industries, power machine building and others. The literature review shows that modern methods of thin-walled parts processing suppose applying additional technological equipment that increases product cost. Recently the researchers have suggested a “soft” cutting modes method, which proposes a rational pick of cutting and clamping parameters. The method allows parts processing without additional equipment due to the effective selection of the technological process parameters (feed, rotation frequency, cutting depth) based on deformations numerical modeling. In previous papers, researchers described a computer system which allows a technologist superficially estimate the applicability of the chosen cutting modes and take the suppleness into account. Due to this system, a technologist is able to pick the parameters to minimize deformation of the workpiece before the processing starts. **The purpose of the paper** is to estimate the efficiently of the developed software. **The article considers** the case of a hollow cylindrical workpiece clamped by a three-jaw chuck. **The methods of investigation:** the experiment was carried out on a dedicated facility, constructed on the basis of a lathe. A dial gauge was used to measure deformations in predefined points on the workpiece surface. **Results and Discussion.** The experimental results are presented as deflection graphs. The graphs show both theoretical and experimental curves for various sections of the workpiece. The behavior and periodicity of the experimental curves fit the theoretical. The conducted experiments show that the developed software system is effective and reliable.

**For citation:** Eremeykin P.A., Zhargalova A.D., Gavriushin S.S. Raschetno-eksperimental'naya otsenka tekhnologicheskikh deformatsii pri «myagkikh» rezhimakh tokarnoi obrabotki tonkostennykh detalei [Empirical evaluation of technological deformations for “soft” cutting modes during thin-walled parts turning]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 22–32. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.1-22-32. (In Russian).

#### \* Corresponding author

*Eremeykin Petr A.*, post-graduate student  
 Mechanical Engineering Research Institute  
 of the Russian Academy of Sciences,  
 4 Maly Kharitonievskiy Pereulok,  
 101990, Moscow, Russian Federation  
 Tel.: 8 (916) 662-57-38, e-mail: [eremeykin@gmail.com](mailto:eremeykin@gmail.com)

## References

1. Bing D., Guang-bin Y., Yan-qi G., Jun-peng S., Xue-mei W., Yu-xin L. Machining surface quality analysis of aluminum alloy thin-walled parts in aerospace. *International Journal of Security and Its Applications*, 2015, vol. 9, no. 11, pp. 201–208. doi: 10.14257/ijasia.2015.9.11.19.
2. Dal'skii A.M., ed. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. V 2 t. T. 1. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Engineering technology. In 2 vol. Vol. 1. Engineering technology basics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999. 370 p. ISBN 978-5-7038-3442-8.
3. Kuznetsov Yu.I., Moslov A.R., Boikov A.N. *Osnastka dlya stankov s ChPU: spravochnik* [CNC machine tools equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 512 p. ISBN 5-217-01114-9.
4. Evgenev G.B., Gavriushin S.S., Khobotov E.N. *Osnovy avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv*. V 2 t. T. 2 [Basics of manufacturing automation. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015. 479 p. ISBN 978-5-7038-4139-6.
5. Ratchev S., Liu S., Huang W., Becker A.A. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004. vol. 44, iss. 15, pp. 1629–1641. doi: 10.1016/j.ijmactools.2004.06.001.
6. Demyanenko E.G., Popov I.P., Menshikov V.S. Research of the process of axisymmetric forming of thin-walled flat blanks into the conical parts with minimal thickness variation. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*, Tomsk, Russia, 27–29 October 2016, art. 012122. doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012122.
7. Huang Y., Zhang X., Xiong Y. Finite element analysis of machining thin-wall parts: error prediction and stability analysis. *Finite element analysis - applications in mechanical engineering*. Ed. by F. Ebrahimi. Rijeka, Croatia, InTech, 2004. doi: 10.5772/50374.
8. Joshi S.N., Bolar G.J. Three-dimensional finite element based numerical simulation of machining of thin-wall components with varying wall constraints. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 2017, vol. 98, iss. 3, pp. 343–352. doi: 10.1007/s40032-016-0246-9.
9. Joshi S.N., Bolar G.J. Three-dimensional numerical modeling, simulation and experimental validation of milling of a thin-wall component. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2017, vol. 231, iss. 5, pp. 792–804. doi: 10.1177/0954405416685387.
10. Scippa A., Grossi N., Campatelli G. FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 287–292. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.023.
11. Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science*. London, New York, McGraw-Hill, 1972. 521 p. ISBN 978-0-0709-4138-0.
12. Bathe K.J. *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe, 2007. 1037 p. ISBN 978-0-9790-0490-2.
13. Izamshah R.A., Mo J.P.T., Ding S.L. Finite element analysis of machining thin-wall parts. *Key Engineering Materials*, 2011, vol. 458, pp. 283–288. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.458.283.
14. Isaev A., Grechishnikov V., Pivkin P., Kozochkin M., Ilyuhin Y., Vorotnikov A. Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 1023–1026. doi: 10.1016/j.procir.2015.08.088.
15. Shamsuddin K.A., Ab-Kadir A.R., Osman M.H. A Comparison of milling cutting path strategies for thin-walled aluminium alloys fabrication. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2013, vol. 2, iss. 3, pp. 1–8.
16. Gavriushin S.C., Zhargalova A.D., Lazarenko G.P., Semisalov V.I. Metod opredeleniya uslovii mekhanicheskoi obrabotki tonkostennykh detalei [The method of determining the conditions for machining thin-walled parts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 11, pp.53–61. doi: 10.18698/0536-1044-2015-11-53-61.
17. Zhargalova A.D., Eremykin P.A. Programmaya sistema avtomatizirovannogo vybora rezhimov mekhanicheskoi obrabotki tonkostennykh detalei [Integrated decision support system for thin-walled parts cutting]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii = Actual problems in machine building*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 9–14.
18. Eremykin P.A., Zhargalova A.D., Gavriushin S.S. A software system for thin-walled parts deformation analysis. *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education*. Ed. by Z. Hu, S.V. Petukhov, M. He. Cham, Switzerland Springer Nature, 2018, pp. 259–265. doi: 10.1007/978-3-319-67349-3\_24.
19. Eremykin P.A., Zhargalova A.D., Lazarenko G.P. *Integrirovannaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya o vybore rezhimov mekhanicheskoi obrabotki tonkostennykh detalei* [Integrated software system for selecting rational

cutting modes during thin-walled workpieces processing]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2016663071. (In Russian, unpublished).

20. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., eds. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya*. V 2 t. T. 2 [Reference book of the technologist. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 418 p.

21. Guzeev V.I., Batuev V.A., Surkov I.V. *Rezhimy rezaniya dlya tokarnykh i sverlil'no-frezerno-rastochnykh stankov s chislovyim programmnyim upravleniem: spravochnik* [Cutting modes for CNC lathes]. Ed. by V.I. Guzeev. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 368 p.

### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 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/>).