

УДК 621.941.1:621.9.014

*И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный,  
М.М. Радкевич, Т.А. Цимко*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ**

*I.I. Kozar, D.Yu. Kolodyazhniy,  
M.M. Radkevich, T.A. Tsimko*

### **A MATHEMATICAL MODEL OF ERROR FOR INTRACTABLE ALLOY TURNING**

Приведена математическая модель образования погрешности обработки при точении труднообрабатываемых материалов. Приведено описание лабораторной установки для определения и проверки коэффициентов математической модели. Рассмотрены различные параметры, которые влияют на точность и производительность обработки.

ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ; ТОКАРНАЯ ОБРАБОТКА; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; РАЗМЕРНЫЙ ИЗНОС; СИЛЫ РЕЗАНИЯ; ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫЕ СПЛАВЫ.

Presented mathematical model error formation during turning high-temperature titanium alloys. Presented description of the experimental plant for determination and verification of the mathematical model coefficients. Investigated different parameters, which influence on the accuracy and productivity cutting.

ACCURACY OF CUTTING; TURNING; MATHEMATICAL MODEL; WEAR DIMANSIONAL; CUTTING FORCES; INTRACTABLE ALLOYS.

Повышение эффективности современных авиадвигателей и аналогичных силовых установок становится невозможным без использования принципиально новых конструкционных материалов [1–5].

К деталям, изготавливаемым из подобных материалов, предъявляются повышенные требования по точности изготовления [6]. В настоящее время основным возможным методом обеспечения этих требований является обработка резанием. Однако реализация такой обработки затруднена из-за практически полного отсутствия рекомендаций по выбору режимов резания, инструмента и оборудования и большой трудоемкости по подбору таких рекомендаций.

Цели нашего научного исследования — создание и отработка математической модели образования погрешности на примере токарной обработки партии заготовок и разработка экспериментальной установки для определения с ее

помощью коэффициентов модели и, в конечном итоге, управления точностью.

В общем случае точность обработки размеров деталей зависит от большого числа воздействующих технологических факторов во время обработки. Они приводят к образованию составляющих погрешности обработки, которые, суммируясь по определенным законам, смещают уровень настройки инструмента. Суммарная погрешность обработки образуется из следующих составляющих:

из-за упругих деформаций технологической системы;

из-за тепловых деформаций технологической системы;

из-за размерного износа режущего инструмента;

из-за ошибки настройки инструмента на размер;

из-за геометрических погрешностей станка [7].

Для исследования точности механической обработки необходимо создать математическую модель образования погрешности в зависимости от параметров технологического процесса. В дальнейшем на основе этой модели возможен выбор рациональных режимов резания, обеспечивающих минимальную погрешность обработки.

Предварительная оценка составляющих погрешности обработки при чистовом точении показала, что доминирующее воздействие на нее при изготовлении партии деталей оказывают размерный износ резца, упругие деформации технологической системы, температурные деформации резца и детали [8].

Все эти факторы были учтены при создании математической модели образования погрешности изготовления заготовок на токарном станке.

### Создание математической модели погрешности обработки

Общий вид математической модели, описывающей погрешность токарной обработки, [9] следующий:

$$Y_i = f_1(x_1, x_2, \dots) + f_2(x_1, x_2) + \dots + \varepsilon_i \quad (1)$$

где  $f_1, f_2, \dots$  — составляющие погрешности (тепловые и силовые деформации технологической системы, износ режущего инструмента и т. д.);  $x_1, x_2, \dots$  — входные параметры и возмущающие воздействия, которые характеризуют состояние обрабатываемых заготовок, режущего инструмента и станка, режимы резания и т. д.

Формула, описывающая изменения отклонения диаметральных размеров при чистовом точении партии деталей, имеет вид [10]

$$y_i = 2 \left[ \Delta(i) + u(i, \tau) - \xi_p(i, \tau, u, t) - \xi_d(\xi_p) + \Delta_y(t, u) \right] + \eta_i, \text{ мкм}, \quad (2)$$

где  $\Delta(i)$ , мкм, — суммарная погрешность позиционирования;  $u(i, \tau)$ , мкм, — износ режущего инструмента;  $\xi_p(i, \tau, u, t)$ , мкм, — тепловая деформация режущего инструмента;  $\xi_d(\xi_p)$  — тепловая деформация детали;  $\Delta_y(t, u)$ , мкм, — упругие деформации технологической системы;  $\eta_i = \pm 3\sigma$ , мкм, — неучтенная часть случайной составляющей погрешности обработки;  $i$  — номер детали в партии;  $\tau$  — время обработки  $i$ -й детали;  $t$  — глубина резания;  $\tau_{\text{охл}}$  — время охлаждения режущего инструмента перед обработкой  $i$ -й детали.

Далее определяются все составляющие погрешности в зависимости от параметров технологического процесса.

Суммарная погрешность позиционирования в зависимости от номера детали рассчитывается по формуле

$$\Delta(i) = K_1 \times (i - 1) + K_2, \quad (3)$$

Износ инструмента находится по формуле

$$u(i, \tau) = K_3 \tau + K_3(i - 1) + K_4 \left( 1 - e^{-\frac{(i-1)\tau}{K_5}} \right). \quad (4)$$

Тепловая деформация режущего инструмента определяется из выражения

$$\xi_p(i, \tau, u, t) = K_6 t^{0,85} (1 + K_7 u) \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{K_8}} \right) + e^{\frac{\tau_{\text{охл}}}{8}} \xi_{p(i-1)}^{\text{max}} e^{-\frac{\tau}{K_8}}. \quad (5)$$

Тепловая деформация детали равна

$$\xi_d(\xi_p) = K_9 \xi_p, \text{ мкм}. \quad (6)$$

Упругие деформации технологической системы определяются из следующей зависимости:

$$\Delta_y(t, u) = K_{10} t (1 + K_{11} u) (1 - K_{12} \tau). \quad (7)$$

Подстановка зависимостей (3)–(7) в формулу (2) позволяет получить модель образования погрешности при токарной обработке. Во всех приведенных выше формулах  $K_1, K_2, \dots, K_{12}$  — коэффициенты, зависящие от параметров обработки (материала детали и инструмента, характеристик станка и т. п.).

Для определения конкретных коэффициентов этой модели была создана экспериментальная установка, на которой и проводились дальнейшие исследования.

### Материалы и методика

Все экспериментальные исследования проводились при точении заготовок из титанового труднообрабатываемого сплава, условно названного «Титановый сплав № 1», химический состав которого следующий:

Ti	.....	Основа
Al	.....	5,8–6,6
W	.....	0,35–0,8
Si	.....	0,25–0,45
Zr	.....	2,0–4,0
Mo	.....	0,8–1,5
Sn	.....	2,5–4,5
V	.....	—

Таблица 1

Физико-механические свойства титанового сплава №1

Температура испытания, °С	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, КДж/м <sup>2</sup>	HRC
20	1100	1050	5,8	9,2	45	35
400	1100	1040	6,0	11,5	380	35
600	910	860	11,0	19,5	320	25
800	540	785	16,5	29,5	585	17

Физико-механические свойства этого сплава приведены в табл. 1.

Методика проведения экспериментов и используемое оборудование приведены в следующем разделе.

**Экспериментальная установка для исследования образования погрешности обработки**

На кафедре «Технология машиностроения» была спроектирована экспериментальная установка для одновременного контроля различных параметров, влияющих на точность обработки.

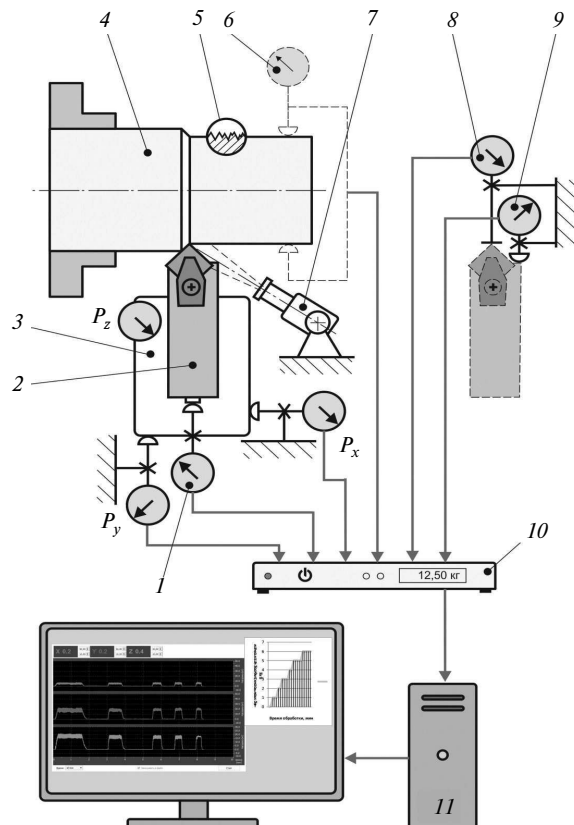


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На основании уравнения (2), описывающего изменение размеров обрабатываемых заготовок, была разработана программа, позволяющая по экспериментальным результатам, полученным при изготовлении партии деталей, подбирать коэффициенты математической модели таким образом, чтобы расхождения между точечными диаграммами изменения диаметральных размеров, полученных экспериментально и рассчитанных с помощью модели, были бы минимальными.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки.

Экспериментальная установка размещена на токарном станке 16Б16КА и включает в себя следующие измерительные системы: систему измерения 1 температурной деформации резца в процессе резания; динамометр 3 для измерения трех составляющих силы резания ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ) во время обработки.

Деталь 4 закрепляется на специальной оправке или в патроне. Измерительная скоба 6 контролирует диаметр детали до и после обработки. Тепловизор 7 измеряет температуру в зоне резания. Устройство 8, расположенное в задней бабке, измеряет положения режущей кромки резца, а устройство 9 — положения державки резца. Вся информация обрабатывается контроллером 10 и передается на компьютер 11, который предварительно обрабатывает информацию и записывает ее. Компьютер соединен по сети с другим компьютером, на который передается информация после проведения эксперимента.

Размеры и форма обработанной заготовки после снятия со станка измерялась на координатно-измерительной машине Contura G2, погрешность измерений которой составляет 1,8 мкм.

Для определения сил резания на токарно-винторезном станке 16Б16КА вместо резцедержателя на суппорт устанавливался универсаль-

ный модернизированный динамометр УДМ-100М со специальным приспособлением для крепления резца.

В комплект измерительного комплекса входит: динамометр-датчик УДМ-100М, блок сбора и обработки первичной информации УДП, блок вторичной обработки информации, прогнозирования и выдачи управляющего сигнала (ЭВМ). Кроме перечисленного, в комплекс включена система измерения температурной деформации резца.

Мгновенные значения сил резания в диапазоне частот от 0 до 500 Гц можно измерять с погрешностью не более 10 %, регистрируя показания динамометра на устройстве вывода [11, 12].

Для проведения экспериментов была проведена глубокая модернизация динамометра: ламповый тензоусилитель заменен тензоусилителем на интегральной схеме; использован микроконтроллер для аналого-цифрового преобразования сигналов и передачи данных на компьютер в реальном масштабе времени; разработана программа хранения и обработки результатов эксперимента на компьютере, а также программа вывода данных на дисплей в реальном масштабе времени; изготовлен резцедержатель, позволяющий устанавливать специальную конструкцию резца с устройством для измерения температурной деформации в процессе резания; модернизирована механическая часть динамометра; встроены кронштейны для крепления первичного преобразователя для измерения температурной деформации резца.

В ходе проведения эксперимента полученные аналоговые сигналы по трем координатам поступали в блок сбора и обработки первичной информации. Затем они усиливались и преобразовывались в цифровую форму и с дискретностью 0,02 с передавались на ЭВМ, где записывались в файл и одновременно выводились на дисплей в виде трех графиков и таблиц, содержащих в себе численные значения сил, измеренные с заданным интервалом времени.

Для измерения температурного поля на верхней поверхности стружки и передней поверхности резца был применен тепловизор модели VALTECH TR-01500.

Определение коэффициентов излучения проводили при одновременном нагреве струж-

ки титанового сплава и резца. Резец и стружку выдерживали в муфельной печи, нагретой до определенной температуры, до полного прогрева. Температура прогрева измеряли двумя образцовыми термомпарами. Проводили съемку и устанавливали коэффициенты излучения передней поверхности резца и верхней поверхности стружки.

В процессе резания записывали также и температурную деформацию державки резца, измерение которой производили с помощью специально разработанного приспособления (см. схему на рис. 2).

В державке резца 1 выполнено сквозное отверстие, в котором проходит стержень 2 из инвара. Одним концом стержень крепится под режущей кромкой в поперечной плоскости, проходящей через вершину резца. Другой конец стержня проходит через втулку по скользящей посадке (втулка выполнена из теплоизоляционного материала) и упирается своим торцом в измерительный наконечник индуктивного датчика 4, закрепленного на кронштейне 5. В процессе обработки резец нагревается, удлиняется, изменяется положение вершины резца относительно места его крепления, что приводит к перемещению стержня, которое фиксируется датчиком 4. Обладая коэффициентом линейного расширения приблизительно в двадцать раз меньше, чем у стали, стержень из инвара практически не меняет своей длины, что дает возможность следить за тепловыми деформациями резца. Информация, получаемая при измерении, фиксируется индуктивной измерительной системой М-200 и записывается с помощью контроллера в память компьютера.

Измерение износа резца по задней грани производилось на микроскопе модели VMS-001–200х с вмонтированной в нем камерой, которая непосредственно соединена с ЭВМ.

Измерение размерного износа проводили с помощью приспособления, установленного в задней бабке станка.

Система измерения размерного износа позволяет непосредственно на станке измерить размерный износ резца без предварительной температурной стабилизации державки резца.

Измерение положения резца происходит со стороны заготовки с помощью индуктивных измерительных датчиков.

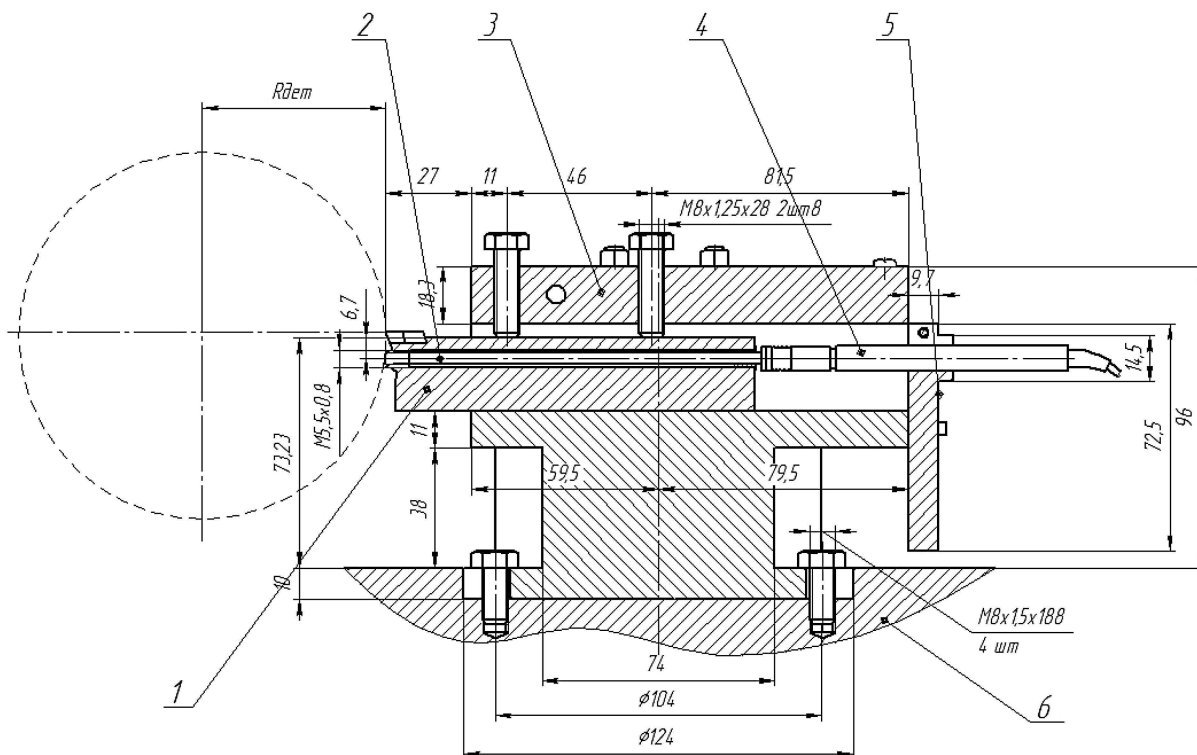


Рис. 2. Устройство для измерения температурного удлинения резца

Датчики измерения положения реперной точки на державке резца и положения его вершины расположены практически в одной плоскости, что дало возможность исключить влияние температурной деформации резца. Данные измерений размерного износа записывает ЭВМ после каждого рабочего хода.

### Проведение экспериментов

Подбор коэффициентов модели осуществляется в диалоговом режиме с использованием дополнительной информации о ходе технологического процесса обработки. Например, возможен учет влияния изменения глубины резания при изготовлении конкретной детали в партии и тепловой деформации резца, связанной с этим изменением, а также учет влияния этих факторов на размер следующей детали.

Чем больше дополнительной информации вводится при определении коэффициентов модели, тем с большей точностью описывается процесс изменения диаметральных размеров в партии.

Качество подбора коэффициентов математической модели в процессе точения было оце-

нено с помощью статистических характеристик, приведенных в табл. 2.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать заключение о совпадении результатов моделирования с экспериментом не только по внешнему виду, основным статистическим характеристикам, но и по параметрам, отражающим внутренние взаимосвязи процесса формообразования.

Результаты работы программы, полученные в графической форме, представлены на рис. 3, где по вертикальной оси отложены отклонения диаметров деталей  $y_i$  в мкм в зависимости от номера детали в партии  $i$ .

График изменения диаметральных размеров в партии деталей был получен при точении колец диаметром 140 мм и длиной 40 мм со следующими режимами резания: скорость резания  $V = 200$  м/мин, подача  $S = 0,03$  мм/об. Обработка велась резцом, оснащенным пластинкой из твердого сплава Т15К6. Глубина резания при изготовлении партии деталей изменялась от 0,12 до 0,24 мм.

На рис. 3 представлены точечные диаграммы изменения диаметральных размеров партии

Таблица 2

Параметры проверки модели

Наименование параметра	Экспериментальные данные	Данные, полученные по модели
Наибольший разброс размеров в партии $y_{\max} - y_{\min}$ , мкм	85	83
Среднее значение рассеяния размеров деталей в партии, мкм	53	52
Среднее квадратическое отклонение рассеяния деталей в партии, мкм	22,5	22
Коэффициент корреляции между колебанием глубины резания и колебанием размеров в начале обработки	0,7	0,85
Коэффициент корреляции между колебанием глубины резания и колебанием размеров в конце обработки	0,81	0,9

проточенных колец при выбранных режимах резания, а также смоделированные точечные диаграммы изменения размеров колец.

График 1 относится к размерам колец у правого торца, что соответствует началу обработки, а график 2 — к размерам колец у левого торца, то есть в конце обработки.

Графики 3 и 4 относятся к смоделированным размерам колец соответственно у правого и левого торца.

При моделировании учитывалось колебание глубины резания, которое происходило при изготовлении данной партии деталей.

Полученные соотношения дают возможность заключить, что при чистовом точении

действуют, по крайней мере, пять факторов, которые соизмеримы по влиянию на точность обработки. Устранение или компенсация одного из них не только не гарантирует уменьшение суммарной погрешности обработки, но может, напротив, привести к ее увеличению.

Сравнение результатов чистовой обработки нескольких партий заготовок с результатами моделирования показало хорошее качественное и количественное их совпадение. Погрешности моделирования составили:

по изменению диаметра детали по длине обработки — в среднем 10 %;

по отлнчию величины тренда на одну деталь — примерно 5 %;

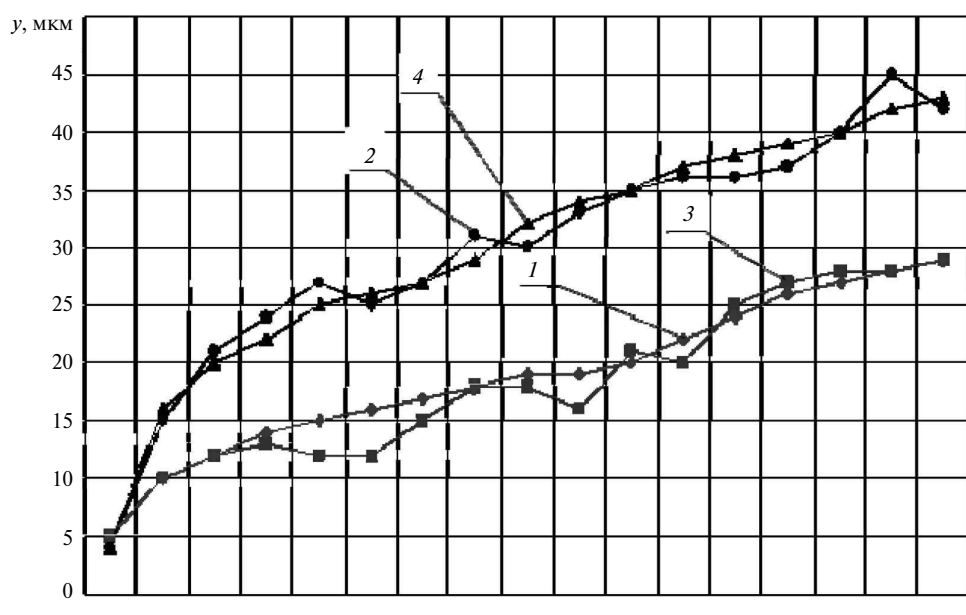


Рис. 3. Точечные диаграммы изменения диаметральных размеров деталей и смоделированные точечные диаграммы изменения размеров этих же деталей (i — номер детали в партии)

по коэффициентам корреляции между глубиной резания и изменением диаметров деталей — около 15 %.

Подведем итоги.

Для обеспечения точности токарной обработки партии заготовок возможны достоверное моделирование процесса образования суммарной погрешности.

Созданная математическая модель колебания диаметральных размеров деталей в партии при чистовом точении дает возможность прогнозировать результаты применения возможных способов компенсации погрешностей обработки.

Имитация обработки резанием при различных режимах с помощью модели позволяет получить результаты по точности обработки и таким образом изучить влияние на нее режимов резания.

Модель позволяет проводить анализ причин развития погрешностей на этапе отладки технологического процесса изготовления партии деталей.

В модели нашли отражение наиболее существенные закономерности, свойственные токарной обработке, и, как показывают эксперименты, она может быть применена при анализе любых других видов лезвийной обработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скибин В.А., Солонин В.И., Сосунов В.А. Авиационному двигателю 100 лет // ТВФ. 2004. № 5.
2. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД. 2010. // Труды ВИАМ. 2013. С. 8–13 с.
3. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: Изд-во МИСиС, 2001. 632 с.
4. Мухин В.С. Основы технологии машиностроения (авиадвигателестроение). Уфа: Изд-во УГАТУ, 2007. 148 с.
5. TMC-0614. Timet Datasheet alloy 834 Timet. 2000. 3 p. /<http://www.timet.com/images/document/datasheets/alphaalloys/834.pdf>
6. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития: Сборник. М.: Изд-во ВИАМ, 2010. 43–46 с.
7. Колкер Я.Д. Математический анализ точности

механической обработки. Киев.: Техника, 1976. 200 с.

8. Любомудров С.А. Технологическое обеспечение качества: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 195 с.

9. Жуков Э.Л., Козарь И.И., Мурашкин С.Л. [и др.]. Технология машиностроения: в двух кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения. Учебное пособие для вузов / Под ред. С. Л. Мурашкина. 3-е изд., доп. М.: Высш. шк., 2008. 278 с.

10. Анухин В. И., Любомудров С.А., Макарова Т.А. Обеспечение качества чистовой токарной обработки путем дискретной стабилизации размеров. // Управление качеством: проблемы, исследования, опыт. Сборник научных трудов. Вып. 2. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. С. 167–180.

11. Любомудров С.А., Тарасов С.Б. Метрология, стандартизация сертификация. Выбор средств измерения: Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. 95 с.

12. <http://www.renishaw.ru>. Контактные измерительные системы для станков с ЧПУ, 2010.

### REFERENCES

1. Skibin V.A., Solonin V.I., Sosounov V.A. Air engine 100 year. *TVF*. 2004. № 5. (rus.)
2. Kashaпов O.S., Novak A.V., Nochovnaya N.A., Pavlova T.V. State, problems and prospects of creation of heat resisting titanic alloys for GTD details. *Electronic scientific magazine» Works VIAM»*. 2013. S. 8–13. №3 (rus.)
3. Kablov E.N. Cast in vanes of the engines gas-turbine (alloys, technologie, cover). M.: Izd-vo MISIS, 2001. 632 p. (rus.)
4. Moukhin V.S. Technology of machine building (aircraft industry). Ufa: Izd-vo UGAYU, 2007. 148 p. (rus.)
5. TMC-0614. Timet Datasheet alloy 834 Timet. 2000. 3 p. /<http://www.timet.com/images/document/datasheets/alphaalloys/834.pdf>

6. Inozemhsev A.A., Bachcatov I.G., Korykovchev A.S. Alloys of titanium in the manufacturing article design which are ОАО «Aviadvigatel». *Modern alloys of titanium and problems of their development: Collection*. M.: VIAM, 2010. 43–46 p. (rus.)

7. Kolker Y.D. Mathematical analysis of the accuracy of cutting. Kiev.: Technika, 1976. 200 p. (rus.)

8. Lyubomudrov S.A. Technological guaranteeing of the quality: manual. SPb.: Publishing house Politech. university, 2010. 195 p. (rus.)

9. Zhoukov E.L., Kozar I.I., Mourashkin S.L. [and others.]. Technology of machine building: two manual, M-al.1. third publ., add. M.: Higher school, 2008. 278 p. (rus.)

10. Anouhin V.I., Lyubomudrov S.A., Makarova T.A. Guaranteeing of cutting quality during finish turning by means of discrete stabilization sizings. *Management of quality: problems, research, experience. Collection of the sciences works*. Т. 2. SPb: Izd-vo SPbGPU, 2008. 95 p. (rus.)

11. Lyubomudrov S.A., Tarasov S.B. Metrology, standardization and certification. Election of means measure: manual. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2008. 95 p. (rus.)

12. <http://www.renishaw.ru>. Measuring contacts systems for machine-tool with numerical program control, 2010.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КОЗАРЬ Иван Иванович** — кандидат технических наук доцент кафедры технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: kii49@yandex.ru

**КОЛОДЯЖНЫЙ Дмитрий Юрьевич** — кандидат технических наук доцент кафедры технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: kolod@uk-odk.ru

**РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович** — доктор технических наук заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: mmftkm@yandex.ru

**ЦИМКО Татьяна Анатольевна** — студент, лаборант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: *TS/m-koshka@mail.ru*

#### AUTHORS

**KOZAR Ivan I.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: kii49@yandex.ru

**KOLODYAZHNIY Dmitriy Yu.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: kolod@uk-odk.ru

**RADKEVICH Mikhail M.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: mmftkm@yandex.ru

**TSIMKO Tatiana A.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: *TS/mkoshka@mail.ru*