

*С. С. ДОБРОТВОРСКИЙ, С. Н. КОНОНЕНКО, Е. В. БАСОВА*

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С НЕРАВНОМЕРНОЙ МАЛОЙ ЖЁСТКОСТЬЮ**

Обработка деталей с неравномерной малой жёсткостью требует учета множества факторов, являющихся препятствием к достижению технологических требований к изделию. Одним из основных факторов возникновения геометрических отклонений в процессе обработки, является упругая деформация маложестких тонкостенных элементов детали. Произведен обзор методов предотвращения появления нежелательных отклонений в процессе обработки маложестких деталей. Предлагается детальный предварительный анализ при помощи средств инженерной автоматизации как один из методов технологического обеспечения требований к геометрии маложестких тонкостенных элементов. Определены составляющие силы резания. Произведен расчет сил возникающих в процессе снятия величины припуска, определена направленная сила, действующая в поперечном сечении тонкостенного элемента. Смоделирован частный случай динамического процесса снятия припуска. Обработаны величины возникающих сил в зоне снятия припуска и включены в модель расчета отклонений критических точек маложесткого образца. Произведено сравнение расчетных и полученных в результате моделирования величин.

**Ключевые слова:** малая жесткость, неравномерная жесткость, упругая деформация, тонкостенные элементы, модель процесса, нежелательные отклонения.

*С. С. ДОБРОТВОРСЬКИЙ, С. М. КОНОНЕНКО, Є. В. БАСОВА*

### **ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З НЕРІВНОМІРНОЮ МАЛОЮ ЖОРСТКІСТЮ**

Обработка деталей з нерівномірною малою жорсткістю потребує врахування багатьох чинників, які є перешкодою до досягнення технологічних вимог до виробу. Одним з основних чинників виникнення геометричних відхилень в процесі обробки, є пружна деформація тонкостінних елементів деталі з малою жорсткістю. Зроблено огляд методів запобігання появи небажаних відхилень в процесі обробки деталей з малою жорсткістю. Пропонується детальний попередній аналіз за допомогою засобів інженерної автоматизації як один з методів технологічного забезпечення вимог до геометрії тонкостінних елементів з малою жорсткістю. Визначено складові сили різання. Зроблено розрахунок сил які виникають в процесі зняття величини припуску, визначена спрямована сила, що діє в поперечному перерізі тонкостінного елемента. Змодельовано окремий випадок динамічного процесу зняття припуску. Опрацьовані величини виникаючих сил в зоні зняття припуску і включені в модель розрахунку відхилень критичних точок зразка з малою жорсткістю. Проведено порівняння розрахункових і отриманих в результаті моделювання величин.

**Ключові слова:** мала жорсткість, нерівномірна жорсткість, пружна деформація, тонкостінні елементи, модель процесу, небажані відхилення.

*S. DOBROTVORSKIY, S. KONONENKO, Ye. BASOVA*

### **TECHNOLOGICAL SUPPORT OF HIGH-SPEED MILLING OF PARTS WITH UNEVEN LOW STIFFNESS**

The processing of parts with uneven low stiffness requires consideration of a number of factors that are an obstacle to achieving technological requirements for the product. One of the main factors of an appearance of geometric deviations in the process of milling is the elastic deformation of the thin-walled elements of the workpiece. The review of methods of prevention of occurrence of undesirable deviations in the process of machining of the uneven parts is made. A detailed preliminary analysis with the help of engineering automation is proposed as one of the methods of technological providing of the requirements for the geometry of thin-walled elements. The components of the cutting force are determined. The forces that appears during the removal of the size of the allowance are calculated, directed force acting in the cross section of the thin-walled element is defined. A special case of the dynamic process of allowance removing is modeled. The values of the forces in the zone of removal of the stock have been processed and included in the model of calculating the deviations of the critical points of the thin-walled uneven sample. A comparison between the calculated and the resulting values is made.

**Key words:** low stiffness, uneven rigidity, elastic deformation, thin-walled elements, process model, undesirable deviations.

**Введение.** Детали, типа лопаток турбин, импеллеры, крыльчатки, и другие, имеющие тонкостенные элементы в своей геометрии, являются необходимыми и незаменимыми в авто-, авиа-, аэрокосмической отрасли. Применяются во множестве узлов приводов, являются ответственными деталями механизмов.

Формирование поверхностей тонкостенных деталей с неравномерной малой жесткостью требует учета множества факторов, препятствующих к достижению технологических требований к изделию. Такими факторами являются: возникающие в процессе обработки отклонения от заданной формы, вибрации, тепловые деформации, погрешности, вносимые инструментом, оборудованием [1-2].

В работе основное внимание уделяется анализу возникающих сил в процессе снятия припуска,

моделированию сложных для расчета процессов, как этапу проектирования с целью уменьшения нежелательных отклонений геометрии.

**Анализ последних исследований и литературы.** В современной промышленности и научно-исследовательской деятельности активно ведутся разработки методов регистрации и анализа параметров процесса резания тонкостенных деталей.

Применяются методы математического анализа дискретного моделирование динамических фрезерных систем. Концевые фрезы с произвольной геометрией делятся на дифференциальные элементы вдоль оси фрезы. Структурная динамика тонкостенных элементов детали также учитывается на каждом дифференциальном элементе в зоне контакта инструмента-детали. Динамическая фрезерная система моделируется матрицей дифференциальных

уравнений, которые используются не только для выявления вибрационной стабильности системы, но и прогнозирования составляющих процесса резания – возникающие силы, размерные ошибки геометрии и др. [3].

В процесс анализа сложно-профильных тонкостенных деталей внедряется экспериментальная деятельность на основе систематического измерения параметров, в процессе резания в виде отклика системы и получения значений сил резания, а так же шероховатости поверхности. Экспериментальная установка включает в себя начальные параметры – подачу, глубину резания, параметры инструмента; непосредственно процесс обработки; датчики силы, профилометр; усилитель сигнала. Производится варьирование полученных значений и извлечение зависимостей влияющих компонентов [4].

Применяется метод на основе переменной коррекции призванной компенсировать влияние нежёсткой конструкции лопаток, случайных, технологических и других факторов на точностные характеристики обработанных лопаток моноколёс. Величины коррекции зависят от области контакта инструмента с деталью. Преобразованный параметрический вид программы обработки дает возможность включать компенсирующие значения к заданному припуску на станке руками оператора. В процессе производить проверку правильности обработки, при наличии на станке измерительных щупов. В случае неправильных значений величин коррекции, вносить изменения в программу и снова запускать обработку [5].

Проводятся исследования направленные на выявление начальных напряжений в структуре материала образцов. Искажение элементов детали сильно связано с состоянием остаточного напряжения, вызванным производственными процессами, такими как термообработка, формование или механическая обработка. Каждый шаг процесса влияет на начальное состояние напряжения на следующем этапе процесса. При удалении материала во время обработки создается новое равновесие напряжений. Напряжения перераспределяются, что приводит к изменению геометрии детали. В особенности для тонкостенных элементов потенциал искажений особо высок. Получение знаний о влиянии начальных нагрузок и выходе искажений в процессе обработки помогает повысить качество и эффективность продукта. В исследовании используются Т-образные тонкостенные образцы, которые испытывают разные величины нагрузок. В результате получена закономерность – увеличение приложенной силы приводит к увеличению профиля остаточных напряжений и увеличению высвобожденного искажения, т.е. количество начального напряжения оказывает значительное влияние на потенциал искажения [6].

Исходя из анализа исследований можно заключить, что, работы включают в себя, как привлечение дополнительной оснастки с целью регистрации изменений [7], так и применение

программных средств, либо комбинацию и того и другого [8].

**Материалы исследований.** Технологический процесс механической обработки деталей и их сборки, может быть принят в производстве, когда заданные технические требования на изделие, производительность и экономичность при его изготовлении обеспечиваются в условиях высокой надежности проектных решений.

Проектным решением, для определения значений нежелательных отклонений, в данной работе, является - предварительный расчет возникающих сил в процессе снятия припуска; сравнение полученных значений с динамическим расчетом в средствах инженерной автоматизации; выполнение расчета отклонений методом конечных элементов в САЕ-модуле.

Для определения сил действующих в поперечном сечении образца, как наиболее влияющих на возникновение нежелательных отклонений, необходимо выявить составляющие сил резания (рис. 1).

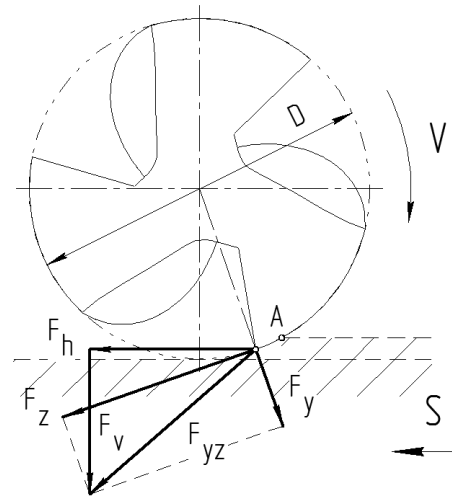


Рис. 1 – Составляющие сил резания при концевом, попутном фрезеровании

Схема действия сил резания при фрезеровании зависит от принятого способа обработки и типа фрезы. Для обработки тонкостенных деталей, типа профили лопаток, используются концевые фрезы. В данной работе рассматривается чистовая обработка попутным фрезерованием образца из алюминиевого сплава. При попутном фрезеровании зуб врежется в материал в точке А (рис. 1), начиная работать при максимальной толщине срезаемого слоя и наибольшей нагрузке, что исключает начальное проскальзывание зуба, так же при попутном фрезеровании получается поверхность с меньшей шероховатостью и более высокой точностью. Однако в случае тонкостенных элементов детали, которые не лишены степени свободы с обратной стороны, эффект отклонения фрезой элемента, ведет к возникновению несоответствия номинальной геометрии изделия.

Суммарная окружная, или касательная, сила  $F_z$  и радиальная сила  $F_y$  имеют равнодействующую  $F_{yz}$ , которую можно разложить на две силы — продольную

$F_h$  и поперечную  $F_v$ . В рамках принятой модели исследования процесса обработки, продольная сила  $F_h$  направлена вдоль линии снятия припуска. Сила  $F_v$  направлена перпендикулярно силе  $F_h$ , в направлении предполагаемого отклонения образца пера лопатки.

С точки зрения выбора параметров инструмента, мощности оборудования интерес представляет суммарная окружная, или касательная, сила  $F_z$ . Однако, для определения, степени влияния инструмента на тонкостенный маложесткий элемент, наибольшую роль играет поперечная сила  $F_v$ .

В результате расчетов, при глубине резания  $t=0.25$  mm, ширине резания  $B=3$  mm, диаметре участка контакта концевой спиральной трехзаходной фрезы  $D=7.5$  mm, и материале детали – алюминиевый сплав, значение окружной силы составило  $F_z=263,2$  Н. Исходя из анализа литературы, предлагается использовать относительные значения составляющих сил. Силы  $F_z$  и  $F_v$  находятся в соотношении, как  $F_z:F_v=0.7-0.9$ . Исходя из соотношения, расчетное значение поперечной силы составляет  $F_v=210,5$  Н.

Полученные величины необходимы для дальнейшего сравнения со значениями, вычисленными в результате моделирования в CAE среде.

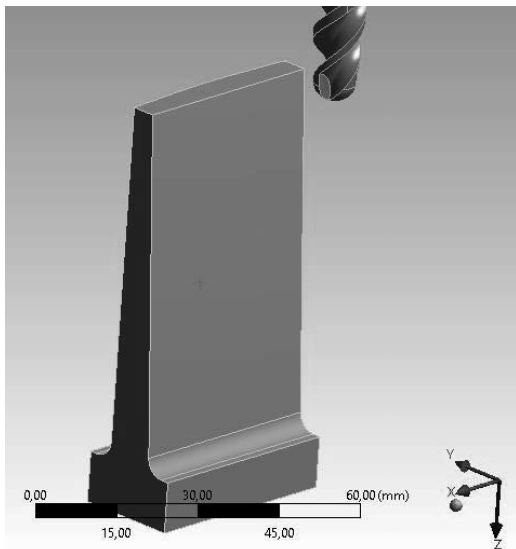


Рис. 2 – Модель тонкостенного образца с неравномерной малой жесткостью и коническая спиральная концевая фреза

**Расчет основных характеристик процесса обработки в CAE среде.** Моделирование процесса высокоскоростной обработки фрезерованием произведено с использованием программы инженерного анализа ANSYS.

Спроектированы и импортированы CAD модели спиральной конической трехзаходной фрезы со сферическим концом и образец тонкостенного элемента с неравномерным распределением жесткости (рис. 2).

Заданы материал, контактные поверхности образца и фрезы, граничные поверхности, сетка для конечно-элементного расчета.

Предполагаемый припуск на чистовую обработку находится в пределах до 500мкм. Поэтому плотность конечно-элементной сетки образца значительно меньше, чем у детали, и составляет 0,5мм.

Начальное взаимное положение фрезы и образца рассчитывается на этапе CAD проектирования. Особое внимание следует уделять положению образца и инструмента, как относительно друг друга, так и относительно системы координат. В CAE среде оба элемента привязаны к глобальной системе координат. При этом фрезе дополнительно назначена цилиндрическая система координат.

Имея заданные параметры выше, установлены взаимные динамические параметры: осевое вращение фрезы, и осевое перемещение детали на продольную величину обработки.

Одним из основных параметров, интересующих в рамках поставленной задачи, являются силы, воздействующие на тонкостенный элемент в поперечном направлении линии обработки (Normal stress). Значения сняты с обратной стороны образца, вдоль линии контакта фрезы (рис. 3) и занесены в таблицу для сравнения расчетного значения и значений, полученных в результате моделирования (табл. 1).

Анализируя полученные значения, можно установить, что конечно-элементный анализ дает возможность оценить примерные величины сил. Однако стоит учитывать небольшую различность значений, в зависимости от места снятия пробы, несмотря на неизменные параметры резания, вдоль линии контакта с образцом. Это может быть обусловлено, как неточностями в контексте данного вида моделирования, так и необходимостью задания сетки с большей плотностью.

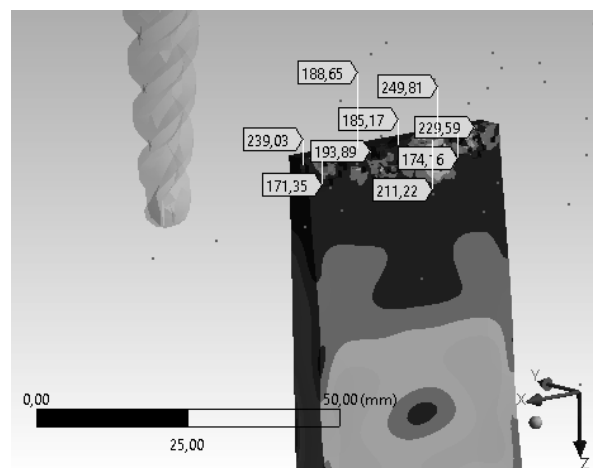


Рис. 3 – Модель динамического процесса и полученные величины возникающих сил

Таблица 1 – Сравнение расчетного значения со значениями в результате моделирования

$F_v$ расч., Н	210,5				
$F_v$ модел., Н	239,03	193,8	185,1	229,5	211,2

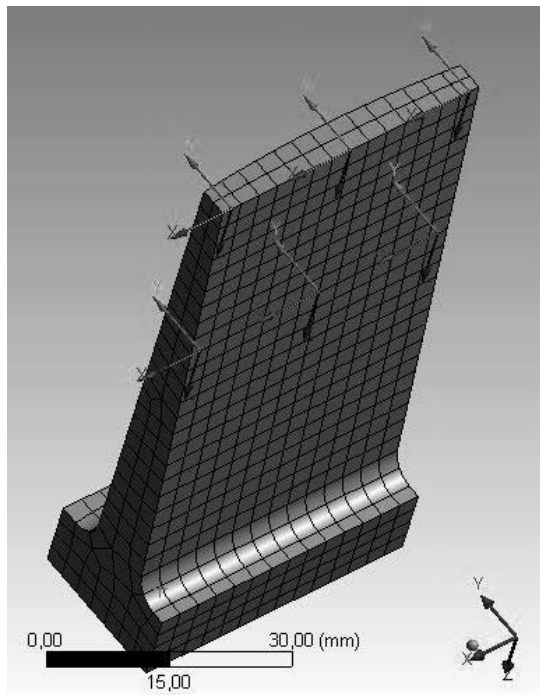


Рис. 4 – Расположение критических точек

Используя полученные значения выше, осуществлено моделирование отжимающего эффекта фрезой тонкостенного образца.

Рассмотрим шесть точек на поверхности (рис. 4), пять из которых, являются критическими – они находятся на краях образца и максимально удалены от места фиксации. Следовательно, в этих точках предположительно будет наблюдаться максимальное отклонение от изначального состояния [9]. Расположение точек обусловлено предполагаемыми линиями снятия припуска.

Нагрузив попеременно критические точки силами, можно оценить величину отклонений в каждой области. Направление действия сил задано вдоль осей Y локальных систем координат. Ось Y перпендикулярна поверхности образца. Значения отклонений, выбранных на разном уровне, отличаются, что обусловлено неравномерным распределением жесткости.

Полученные значения при помощи расчета в САЕ среде, позволяют наглядно оценить степень максимальных значений отклонений образца в разных областях (рис. 5–6). Результаты вычислений занесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Сравнение значений отклонений в зависимости от положения приложенной нагрузки

Критические точки и значения отклонений, мм		
1	2	3
0,095	0,076	0,095
4	5	6
0,035	0,029	0,035

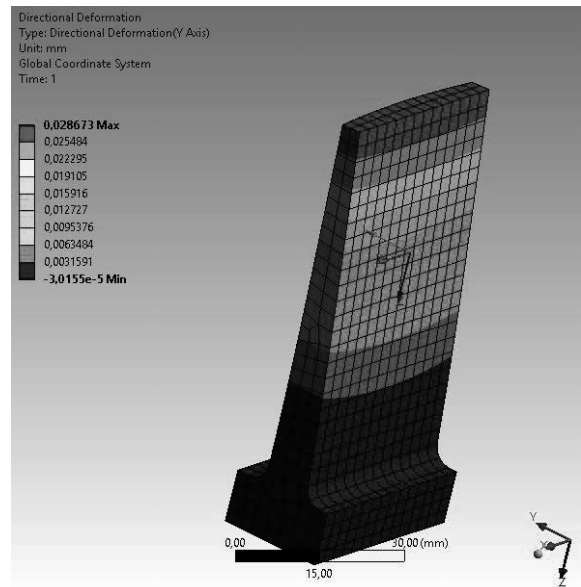


Рис. 5 – Отклонение образца на величину 0,029 мм

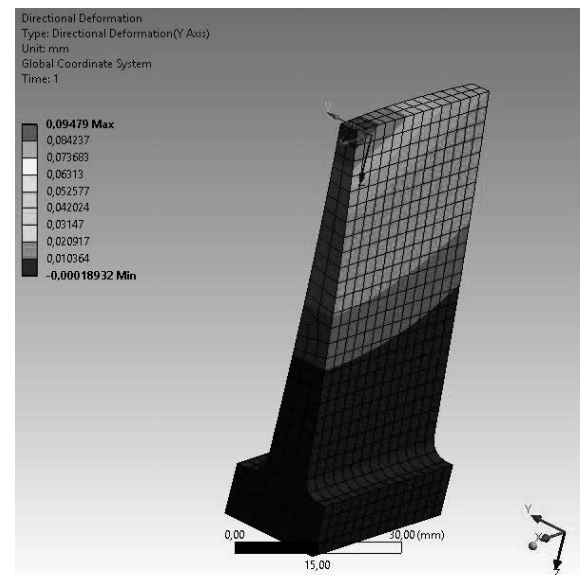


Рис. 6 – Отклонение образца на величину 0,095 мм

**Выводы.** Произведен инженерный анализ образца с неравномерной малой жесткостью, в результате которого определены составляющие силы резания; выполнен расчет, как основной осевой силы резания, так и относительной поперечной, которая составила 210,5 Н.

Выполнено моделирование динамических сил при концевом попутном фрезеровании, что дало возможность получить значения поперечных сил посредством снятия проб с обратной поверхности образца.

Произведено сравнение расчетной величины силы со значениями полученными в результате моделирования, что позволило установить возможность применения САЕ систем для получения динамических характеристик и величин отклонений в

разных областях образца с неравномерной малой жесткостью.

#### Список литературы

1. Иванов В. О. Конструкторско-технологичний аналіз сучасних свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів / В. О. Иванов, В. С. Карпусь, І. М. Дегтярьов // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Технології в машинобудуванні = Bulletin of National Technical University "KhPI" : coll. of sci. papers. Ser. : Techniques in a machine industry. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 33 (1205). – С. 95–105.
2. Карпусь, В.Е. Конструктивно-технологическое обеспечение эффективной эксплуатации станков с ЧПУ / В.Е. Карпусь, В.А. Иванов, А.В. Котляр // Авиационно-космическая техника и технология. – Харків : НАУ ім. Н.Е. Жуковського "ХАІ", 2008. – № 7 (54). – С. 32–35.
3. C. Eksioglu, Z. M. Kilic and Y. Altintas. Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems. Journal of Manufacturing Science and Engineering 134(6):061006, November 12, 2012.
4. Gururaj Bolar, Argha Das, Shrikrishna N. Joshi. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components. Measurement 121, June 2018, pp. 190–204.
5. Мозговой В. Ф., Балушок К. Б., Котов И. И., Панасенко В. А., Бирук М. К. Стратегии обработки лопаток моноколеса на обрабатывающих центрах с ЧПУ с переменной 3D-коррекцией. Авиационно-космическая техника и технология. - 2013. - № 7. С. 22–28
6. V. Schulze, P. Arrazola, F. Zanger, J. Osterried. Simulation of Distortion due to Machining of Thin-walled Components. Procedia CIRP, 2013, pp. 45–50.
7. Внуков Ю. Н. Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей при концевом фрезеровании. Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сб. Харьков: НТУ «ХПИ». 2011. Вып. 80. С. 32–37.
8. Zhou-Long Li, Oguzhan Tuysuz, Li-Min Zhu, Yusuf Altintas. Surface form error prediction in five-axis flank milling of thin-walled part. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 128, May 2018, Pages 21–32.
9. Добротворский С.С., Басова Е.В., Кононенко С.Н. Усовершенствование технологии фрезерования деталей с неравномерной жесткостью. Сборник научных трудов «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии» № 72. Харьков: «ХАИ», 2016. С. 105–111.

#### References (transliterated)

1. Ivanov V. O., Karpus V. E., Dehtiarov I. M. *Konstruktorsko-tekhnologichnyj analiz suchasnyx sverdlylno-frezerno-roztochuvalnyx verstativ* [Design and manufacturing analysis of modern drilling-milling-boring machine tools] // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – pp. 95–105.
2. Karpus V. E., Ivanov V. A., Kotliar A. V. *Konstruktivno-tekhnologicheskoe obespechenye effektivnoy ekspluatatsiy stankov s ChPU* [Design and technological assurance of effective using of CNC machine tools] Aerospace Technique and Technology. Kharkiv: NAU "KhAI", 2008. No. 7 (54). pp. 32–35.
3. C. Eksioglu, Z. M. Kilic and Y. Altintas. Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems. Journal of Manufacturing Science and Engineering 134(6):061006, Nov 12, 2012.
4. Gururaj Bolar, Argha Das, Shrikrishna N. Joshi. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components. Measurement 121, June 2018, pp. 190–204.
5. V. F. Mozgovoy, K. B. Balushok, I. I. Kotov, V. A. Panasenko, M. K. Biruk. Strategii obrabotki lopatok monokoles na obrabatyvayushchikh tsentrakh s ChPU s peremennoy 3D-korreksiyey [Strategies for processing blades on CNC machining centers with variable 3D correction]. Aerospace Engineering and Technology. - 2013. - № 7. pp. 22–28
6. V. Schulze, P. Arrazola, F. Zanger, J. Osterried. Simulation of Distortion due to Machining of Thin-walled Components. Procedia CIRP, 2013, pp. 45–50.
7. Vnukov Ju. N. (2011), "Stand for the study of mechanical oscillations in the milling of ladder parts at the end milling", Cutting and tools in technological systems: Int. scientific-techn. Sat [Stend dlja izuchenija mehanicheskikh kolebanij pri frezerovanii malozhestkikh detalej koncevymi frezami], Kharkov: NTU "KhPI". Issue. 80. pp. 32–37.
8. Zhou-Long Li, Oguzhan Tuysuz, Li-Min Zhu, Yusuf Altintas. Surface form error prediction in five-axis flank milling of thin-walled part. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 128, May 2018, Pages 21–32.
9. Dobrotvorskiy S.S., Basova Y.V., Kononenko S.N. *Usovershenstvovanie tekhnologii frezerovanija detalej s neravnomernoj zhestkost'ju*. [Improving the technology of milling parts with uneven rigidity]. Sbornik nauchnyh trudov «Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii» [Collection of scientific works "Open information and computer integrated technologies"] № 72. Kharkov: «KhAI», 2016. pp. 105–111.

Поступила (received) 30.01.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Добротворський Сергій Семенович (Добротворський Сергій Семенович, Dobrotvorskiy Sergey S)** – доктор технічних наук, професор кафедри технології машиностроєння і металорежущих станків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна; тел.: (057) 720-66-25; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1223-1036>, e-mail: [sdobro50@gmail.com](mailto:sdobro50@gmail.com).

**Кононенко Сергій Николаєвич (Кононенко Сергій Миколайович, Serhii Kononenko)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3874-4772>; тел.: (098) 281-31-03; e-mail: [sergeykono@gmail.com](mailto:sergeykono@gmail.com).

**Басова Євгенія Володимирівна (Басова Євгенія Володимирівна, Yevheniia Basova)** – кандидат технічних наук, доц. кафедри Технології машиностроєння і металорежущих станків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4788>; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: [e.v.basova.khpi@gmail.com](mailto:e.v.basova.khpi@gmail.com)