

А.И. Гермашев, к.т.н.

В.А. Логоминов, к.т.н.

Е.Б. Козлова, к.т.н.

Запорожский национальный технический университет

В.А. Кришталь,

Э.В. Кондратюк, к.т.н.

ГП «Ивченко-Прогресс»

Определение оптимальной скорости резания при фрезеровании сложно-профильных тонкостенных элементов деталей

В статье рассмотрены особенности выбора оптимальной скорости резания при высокоскоростном фрезеровании. Показано, что высокая прерывистость процесса фрезерования тонкостенных деталей ведет к снижению температуры инструмента по сравнению с традиционными методами обработки. Поэтому температура уже не является лимитирующим фактором, влияющим на стойкость инструмента. На первый план выходит обеспечение виброустойчивости обработки. Показано, что амплитуда колебаний тонкостенной детали существенно зависит от частоты вращения шпинделя, а не от скорости резания. Таким образом при обработке тонкостенных деталей или фрезеровании поверхностей сложной формы оптимальная скорость резания должна выбираться исходя из условий виброустойчивости обработки, а не из диапазона значений из справочной литературы.

Ключевые слова: фрезерование; тонкостенная деталь; скорость резания; температура резания.

Введение. Постановка проблемы. Пятиосевое фрезерование является распространённой технологической операцией, особенно при производстве тонкостенных деталей со сложной формой и конфигурацией поверхностей. Наиболее востребованными такие детали являются в авиакосмической и автомобильной промышленности. Они изготавливаются путем удаления до 95 % материала заготовки, что выдвигает повышенные требования к эффективности обработки. При изготовлении тонкостенных деталей радиальные и осевые глубины резания невелики и обуславливаются геометрической формой детали, а также требованиями к шероховатости поверхности. Поэтому повышение производительности возможно лишь путем увеличения минутной подачи за счет большей скорости резания, что реализуется использованием высокоскоростных шпинделей. На данный момент одним из актуальных направлений в области обработки тонкостенных сложно-профильных деталей является освоение новых, более высоких, скоростей резания.

Общепринято, что выбор режимов резания осуществляется с помощью справочной литературы, основополагающее большинство которой составлено тридцать и более лет назад и ориентировано на трехкоординатную фрезерную обработку, в которой номенклатура операций существенно ограничена и производительность достигается за счет высоких глубин резания, а также приведен инструмент преимущественно большого диаметра. При этом, значение скорости резания ограничено температурой в зоне резания, при которой сохраняется высокий период стойкости инструмента. Для концевых фрез из твердого сплава рекомендации по выбору скорости резания не превышают 120 м/мин [2], а при обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов это значение падает до 50 м/мин [1]. Такие низкие значения не способны обеспечить высокоскоростную обработку.

Также одним из способов выбора режимов резания является использование рекомендаций непосредственно производителя инструмента. Это гарантирует использование современной информации в привязке к конкретному инструменту. Однако многие машиностроительные предприятия содержат собственное инструментальное производство и нуждаются в общих рекомендациях. К тому же использование одного и того же инструмента возможно при обработке различного типа поверхностей и значениях глубин резания, что существенно влияет на назначение режимов резания.

Анализ основных исследований и публикаций. Обработка тонкостенных сложнопрофильных деталей имеет свои особенности, которые широко рассмотрены в работе [3]. Одной из них является малая длина дуги контакта инструмента и детали (рис. 1). При таком виде обработки время резания одним зубом фрезы не превышает 5 % периода вращения инструмента. Таким образом, оставшееся время зуб фрезы охлаждается, а при использовании смазывающе-охлаждающих технологических сред происходит его активное охлаждение. Кроме этого, учитывая, что процесс фрезерования является прерывистым и резание периодически сменяется свободным движением детали и инструмента, до 70 % времени одного оборота фрезы она не находится в зацеплении с припуском. То есть происходит и

охлаждение детали, что является немаловажным при обработке титановых сплавов. В связи с этим существует возможность существенного увеличения скорости резания. При этом время резания одним зубом становится очень мало, и величина нагрева инструмента снижается. Именно в такой кинематике обработки и заключается возможность реализации высокоскоростного фрезерования. В случае же использования классического концевое фрезерования, когда зуб фрезы большую часть времени оборота находится в контакте с инструментом, а в процессе резания всегда находится один и более зуб, охлаждения фрезы не происходит. В связи с этим скорости резания существенно ограничены. В подавляющем большинстве справочной литературы рассмотрен именно такой вариант.

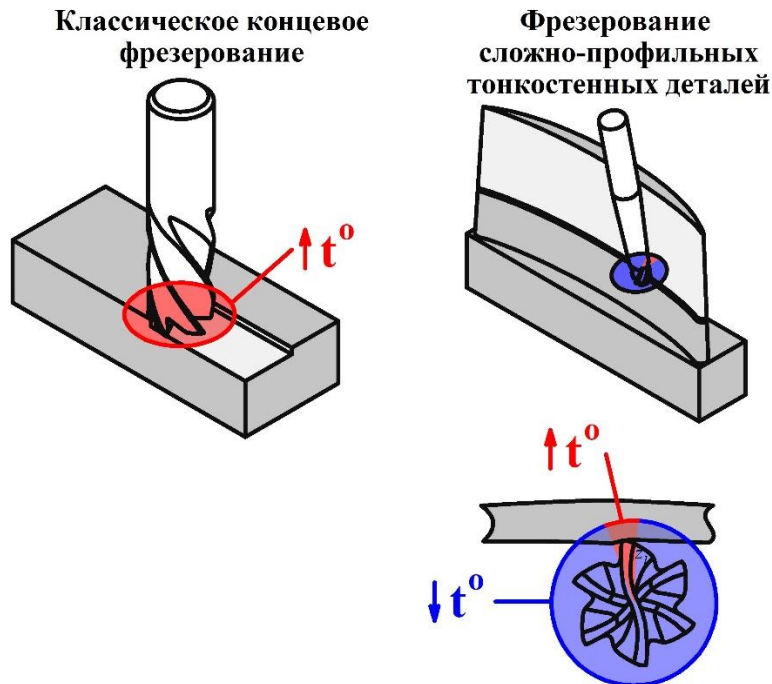


Рис. 1. Условия работы инструмента при классическом фрезеровании и фрезеровании сложно-профильных тонкостенных деталей

В работе [10] проведено исследование температур при прерывистом фрезеровании Сталей 45 инструментом с режущими пластинами из твердого сплава, где показано, что температура на задней поверхности возрастает от 340°C при 52.2 м/мин до 770°C при 628.3 м/мин при обработке без СОТС. Кроме этого отмечено, что при частоте вращения шпинделя $n = 6000$ об/мин во время свободного движения детали температура на задней поверхности фрезы падает на 150°C с 730°C до 580°C , а во время резания температура резко увеличивается на данное значение. Учитывая, что зуб фрезы за 1 секунду испытывает 100 подобных температурных скачков, то предположено, что механизм его разрушения наступает скорее от циклических нагрузок, чем от высоких температур.

В работе [9] предложена двумерная конечно-элементная модель обработки алюминия твердосплавной фрезой при прерывистом резании. Отмечено, что наибольшие температуры возникают на передней поверхности инструмента вблизи режущего клина. Показано, что температура изменилась всего на 100°C в диапазоне скоростей от 700 м/мин до 1300 м/мин от 326°C до 421°C , при этом при 1100 м/мин температура составляла 370°C .

Авторы [8] рассмотрели обработку никелевого и титанового сплавов, используемых в авиационной промышленности, при точении и прерывистом фрезеровании. Результаты исследования показали, что при фрезеровании титанового сплава приемлемой скоростью резания является 628 м/мин, в то время как при точении данная величина ограничена 200 м/мин. На рис. 2 приведен график изменения температуры при традиционном точении и точении выступов (имитация прерывистого фрезерования), где показано, что во время свободного движения инструмента, происходит существенное снижение температуры. Стоит отметить, что при фрезеровании инструмент совершает вращательное движение, что дополнительно увеличивает его охлаждение, и зуб режет только один раз за период вращения, в отличие от точения, где резец режет несколько выступов за одно вращение заготовки. То есть эффект снижения температуры при свободном движении инструмента при фрезеровании выше.

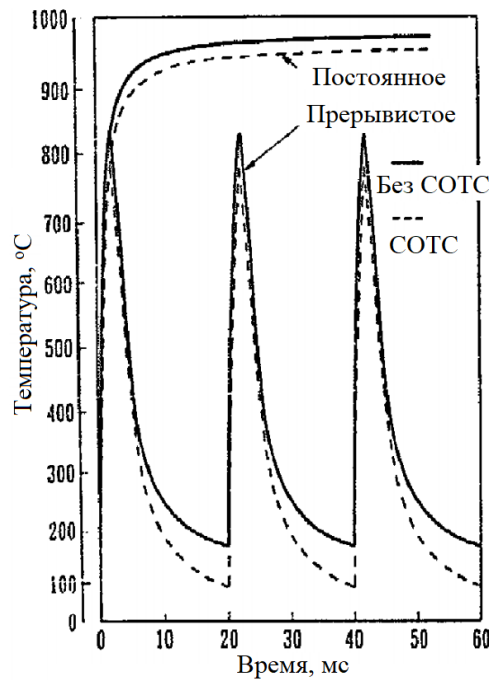


Рис. 2. Изменение температуры на передней поверхности резца [8]
(скорость резания 100 м/мин, подача 0.1 мм/об)

Таким образом, показано, что скорости резания при прерывистом фрезеровании, могут достигать 1000 м/мин и более. Именно поэтому одновременная 5 осевая обработка является высокоэффективным способом формообразования поверхности. Кроме этого он обладает высокой точностью обработки и дает возможность получать детали сложной формы.

Постановка задачи. При обработке тонкостенных деталей существенной проблемой является появление вибраций, которые ограничивают качество обработанной поверхности и способствуют повышенному износу инструмента и его преждевременному выходу из строя. Таким образом, при сложно-профильном фрезеровании тонкостенных деталей выбор скорости резания должен основываться не на температуре в зоне резания, так как ее величина, даже при высоких скоростях, является допустимой для твердосплавного инструмента, а на режиме обработки, который обеспечит стабильные виброустойчивые условия обработки.

В данной работе проведены экспериментальные исследования в широком диапазоне частот вращения шпинделя с использованием фрез различного диаметра.

Целью работы является определение оптимальной скорости резания при обработке сложно-профильных тонкостенных деталей, а также экспериментально показать, что при выборе режимов резания подобных деталей основополагающим фактором является именно нахождение виброустойчивых условий обработки.

Экспериментальный стенд и условия проведения исследований. Для изучения процесса фрезерования сложно-профильных тонкостенных деталей предложен стенд, изображенный на рисунке 3. Детальная информация по стенду изложена в работах авторов [5, 7]. Захватное устройство представляет собой массивное основание, которое устанавливается на столе фрезерного станка через электроизоляцию, и служит для надежного крепления упругого элемента (тонкостенной пластины). На пластине жестко закрепляется обрабатываемый образец. При фрезеровании, в результате действия силы отжима со стороны фрезы, происходит перемещение образца, величину которого измеряют датчиком перемещения по изменению зазора - Δ .

Конструкция стенда была доработана системой измерения условий контактирования инструмента с деталью [4, 6]. К измерительному стенду подводится низковольтный источник питания. При контакте зуба фрезы с обрабатываемым образцом электрический сигнал передается через подвижный токосъемник на АЦП. Запись сигнала с токосъемника и сигнала перемещения образца осуществляется одновременно, что дает возможность их высокоточного совмещения (рис. 3).

Система измерения наличия контакта между фрезой и инструментом является принципиальным элементом экспериментального стенда для изучения процесса прерывистого резания, так как позволяет разделять осциллограмму колебания детали на процесс резания и холостой ход.

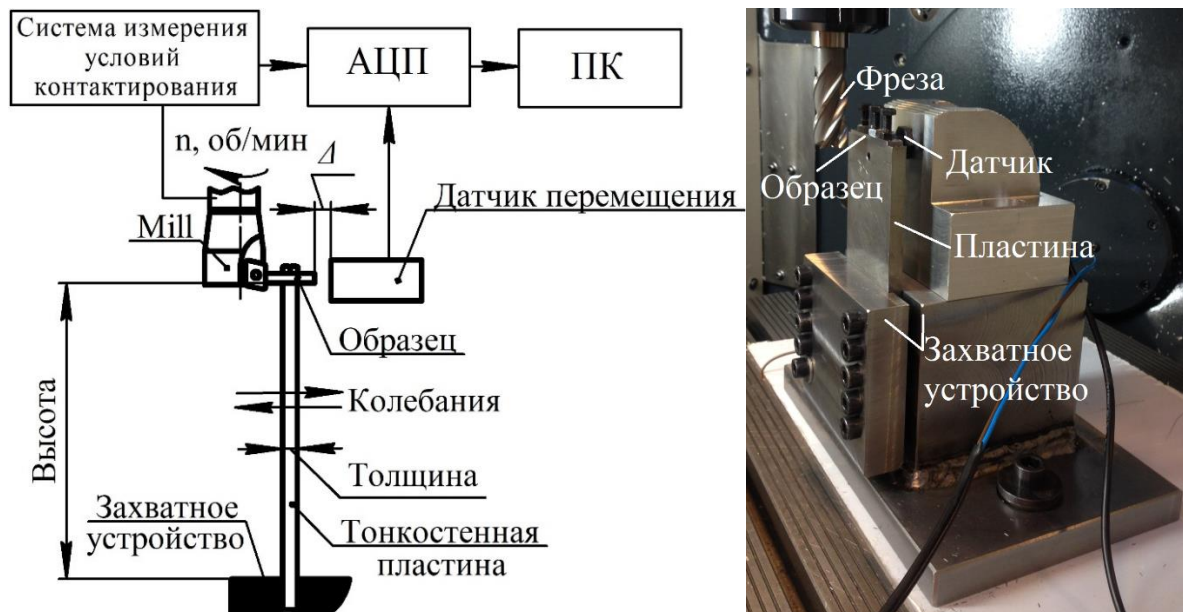


Рис. 3. Экспериментальный стенд для изучения высокоскоростного фрезерования тонкостенных деталей

Экспериментальные исследования проводили на фрезерном станке с ЧПУ DMU 50. В качестве упругого элемента была использована консольно-защемленная пластина (материал Сталь 65Г) толщиной $h = 8$ мм и шириной 60 мм, вылет пластины составлял 80 мм. На свободном конце пластины был жестко закреплен образец (материал Сталь 3), который обрабатывался твердосплавной концевой цилиндрической четырехзубой фрезой (угол наклона винтовой линии $w = 33^\circ$). Были рассмотрены фрезы диаметром 10 мм и 19 мм. Частота собственных колебаний упругой системы (УС) тонкостенной детали составляла $f_{\text{ск}} = 725$ Гц, коэффициент демпфирования $\xi = 0,03$, жесткость $C = 2400$ Н/мм.

Во всех экспериментах осевая глубина резания составляла 2 мм, радиальная глубина – 0,5 мм, подача на зуб – 0,05 мм/зуб, направление подачи – попутное. Смазывающе-охлаждающая технологическая среда не применялась. То есть, условия проведения экспериментальных исследований соответствуют режимам обработки сложно-профильных деталей, где снятие припуска осуществляется с малыми радиальными и осевыми глубинами.

Были проведены две серии экспериментов с использованием фрез аналогичной геометрии, но разного диаметра. Замер динамики фрезерования осуществляли в скоростном диапазоне от 500 об/мин до 10000 об/мин. Шаг изменения частоты вращения шпинделя составлял 100 об/мин. Анализируемым параметром процесса обработки являлась максимальная амплитуда колебания детали.

Результаты исследований. На рис. 4 показаны результаты экспериментальных исследований максимальной амплитуды колебаний в зависимости от частоты вращения шпинделя. Амплитуда колебания детали изменяется до 6 раз в зависимости от выбранного режима резания. Представленный график показывает, как сильно изменяются условия фрезерования тонкостенной детали в зависимости от частоты вращения шпинделя. Так большие амплитуды колебаний в значительной мере ухудшают качество обработки и многократно повышают нагрузки на инструмент, вынуждая его работать в условиях повышенного износа.

Из графика видно, что оба рассматриваемых диаметра фрез возбуждают как максимальные, так и минимальные колебания при близких частотах вращения шпинделя. Такие результаты являются закономерными и связаны с явлением полирезонанса, которое более подробно будет рассмотрено в дальнейших работах авторов. Стоит отметить, что скорость резания для двух серий экспериментов отличается почти в 2 раза. То есть, близкие условия обработки, с точки зрения колебаний, наблюдаются при одинаковых частотах вращения шпинделя, а не скоростях резания. Такие результаты свидетельствуют о том, руководствуясь табличными значениями невозможно определить оптимальную скорость резания.

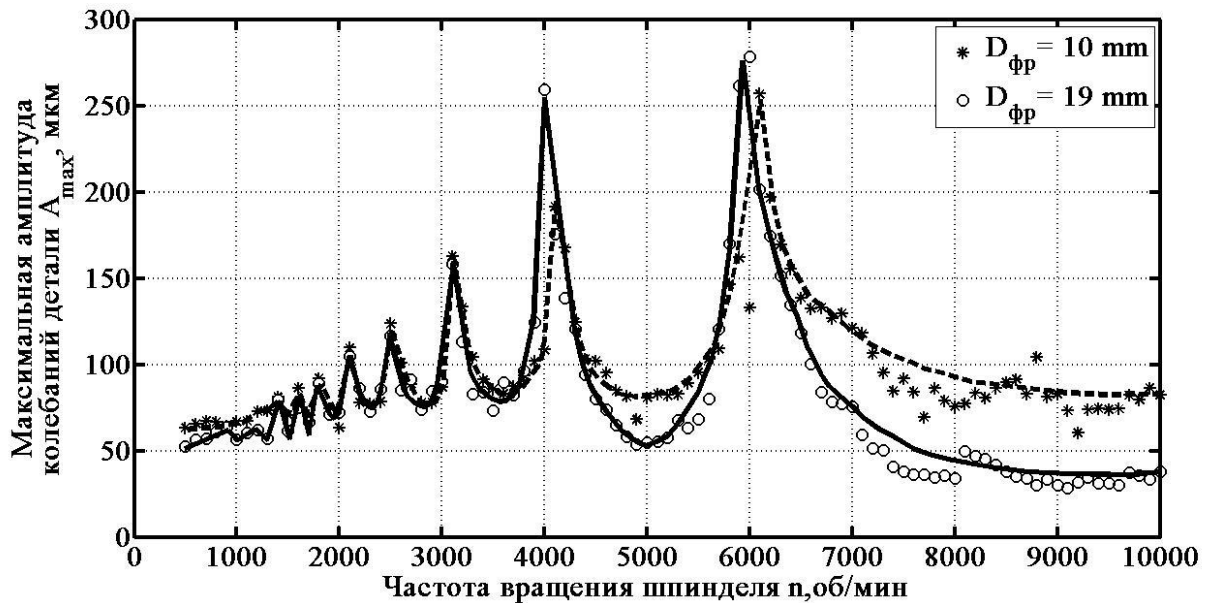


Рис. 4. Изменение максимальной амплитуды колебания детали при различных частотах вращения шпинделя

Таким образом, установлено, что при обработке сложно-профильных тонкостенных деталей оптимальная скорость резания не может быть определена как некий диапазон. Данная величина требует расчета с учетом индивидуальных особенностей конкретной детали, ее статических и динамических характеристик, которые изменяются в ходе обработки при удалении припуска, характеристик инструмента.

Выводы.

1. В данной работе показано, при обработке тонкостенных сложно-профильных тонкостенных деталей температура в зоне резания существенно ниже, по сравнению с классическим фрезерованием и точением, что связано с высокой прерывистостью процесса обработки и охлаждением инструмента в моменты свободного его движения.

2. Снижение температур в зоне резания способствует возможности существенного повышения скоростей резания при 5 осевой обработке поверхностей сложной формы. Именно поэтому и возможно высокоскоростная обработка подобных деталей.

3. Так как температура инструмента является не лимитирующим фактором при выборе оптимальной скорости резания для подобных деталей, то на первый план выходят вибрации, снижающие период стойкости фрезы.

4. Экспериментально показано, что амплитуда колебаний детали существенно зависит от частоты вращения шпинделя, а не от скорости резания.

5. При обработке тонкостенных деталей или фрезеровании поверхностей сложной формы оптимальная скорость резания должна быть обусловлена выбором виброустойчивых условий фрезерования, а не диапазоном значений из справочной литературы.

6. Оптимальная скорость резания для тонкостенной детали может находиться в нескольких интервалах, а ее выбор зависит от частотных характеристик шпинделя станка.

Список использованной литературы:

1. Режимы резания металлов : справочник / Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич, А.Д. Корчемкин. – М. : НИИТавтопром, 1995. – 456 с.
2. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов : справочник / В.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина, А.И. Садыхов. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Особенности концевое фрезерования сложно-профильных тонкостенных деталей / С.Б. Беликов, А.И. Гермашев, В.А. Логоминов, Е.Б. Козлова, В.А. Кришталь // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2017. – № 2. – С. 15–22.
4. Методика определения условий контактирования инструмента с тонкостенной деталью при ее концевом фрезеровании / Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – Вып. 85. – С. 48–55.

5. Внуков Ю.Н. Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей концевыми фрезами / Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов, П.А. Каморкин // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 32–37.
6. Устройство для исследования условий контактирования инструмента с деталью при цилиндрическом фрезеровании тонкостенных деталей / А.И. Герماشев, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, Ю.Н. Внуков // «Инженерия поверхности и реновация изделий» : тезисы доклада XV Международной научно-технической конференции, 1–5 июня 2015 г., г. Затока. – К. : АТМ Украины, 2015. – С. 45–47.
7. Пат. 94974 Україна, МПК (2006) G01H11/00, G01M7/02. Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей / В.О. Логоминов, А.І. Герماشев, С.І. Дядя, О.Б. Козлова ; заявник та власник патенту Запорізький національний технічний університет. – № 201405981 ; заявл. 02.06.14 ; опубл. 10.12.14, Бюл. № 23. – 6 с.
8. Kitagawa T. Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti 6Al 6V 2Sn / T.Kitagawa, A.Kubo, K.Maekawa // Wear. – 1997. – Vol. 202. – № 2. – Pp. 142–148.
9. Simulation on Cutting Temperature during High-Speed Milling Aluminum Alloy 7055 / L.Tan, C.F. Yao, W.Zuo, D.X. Wu // Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications, 2013. – Vol. 328. – Pp. 486–490.
10. Temperature on flank face of cutting tool in high speed milling / T.Ueda, A.Hosokawa, K.Oda, K.Yamada // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2001. – Vol. 50. – № 1. – Pp. 37–40.

References:

1. Baranovskij, Ju.V., Brahman, L.A, Gdalevich, A.I. and Korchemkin, A.D. (1995), *Rezhimy rezanija metallov, spravocnik*, НИТавтопром, Москва, 456 p.
2. Baranchikov, V.I., Zharinov, A.V., Judina, N.D. and Sadyhov, A.I. (1990), *Progressivnye rezhushhie instrumenty i rezhimy rezanija metallov, spravocnik*, Mashinostroenie, Москва, 400 p.
3. Belikov, S.B., Germashev, A.I., Logominov, V.A., Kozlova, E.B. and Krishtal', V.A. (2017), «Osobennosti koncevogo frezerovaniya slozhno-profil'nyh tonkostennyh detalej», *Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, No. 2, pp. 15–22.
4. Vnukov, Ju.N., Germashev, A.I., Djadja, S.I. and Kozlova, E.B. (2015), «Metodika opredelenija uslovij kontaktirovanija instrumenta s tonkostennoj detal'ju pri ee koncevom frezerovanii», *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah, mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij sbornik*, Vol. 85, NTU «HPI», Har'kov, pp. 48–55.
5. Vnukov, Ju.N., Logominov, V.A. and Kamorkin, P.A. (2011), «Stend dlja izuchenija mehanicheskikh kolebanij pri frezerovanii malozhestkikh detalej koncevymi frezami», *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah, mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij sbornik*, Vol. 80, NTU «HPI», Har'kov, pp. 32–37.
6. Germashev, A.I., Djadja, S.I., Kozlova, E.B. and Vnukov, Ju.N. (2015), «Ustrojstvo dlja issledovanija uslovij kontaktirovanija instrumenta s detal'ju pri cilindricheskom frezerovanii tonkostennyh detalej», *XV Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Inzhenerija poverhnosti i renovacija izdelij»*, tezisy doklada, ot 1–5 ijunja, Zatoka, АТМ України, Kiev, pp. 45–47.
7. Logominov, V.O., Germashev, A.I., Djadja, S.I. and Kozlova, O.B., Zaporiz'kij nacional'nij tehnicnij universite (2014), *MPK (2006) G01H11/00, G01M7/02. Stend dlja doslidzhennja kolivan' pri kincevomu cilindrichnomu frezeruvanni tonkostinnih elementiv detalej* [A stand for the study of oscillations in the finite cylindrical milling of thin-walled elements of parts], State Register of Patents of Ukraine, Kiiv, UA, Pat. № 94974.
8. Kitagawa, T., Kubo, A. and Maekawa, K. (1997), «Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti 6Al 6V 2Sn», *Wear*, Vol. 202, No. 2, pp. 142–148.
9. Tan, L., Yao, C.F., Zuo, W. and Wu, D.X. (2013), «Simulation on Cutting Temperature during High-Speed Milling Aluminum Alloy 7055», *Mechanics and Materials*, Vol. 328, Trans Tech Publications, pp. 486–490.
10. Ueda, T., Hosokawa, A., Oda, K. and Yamada, K. (2001), «Temperature on flank face of cutting tool in high speed milling», *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 50, No. 1, pp. 37–40.

Герماشев Антон Игоревич – кандидат технических наук, докторант кафедры «Технологии машиностроения» Запорожского национального технического университета.

Научные интересы:

- концевое фрезерование тонкостенных деталей;
- динамика фрезерования;
- обработка сложнопровильных поверхностей.

E-mail: germashevanton@mail.ru.

Логоминов Виктор Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения» Запорожского национального технического университета.

Научные интересы:

- концевое фрезерование тонкостенных деталей;
- динамика процессов лезвийной обработки;
- качество фрезерования тонкостенных деталей.

E-mail: logominov.v@gmail.com.

Козлова Елена Борисовна – кандидат технических наук, докторант кафедры «Технологии машиностроения» Запорожского национального технического университета.

Научные интересы:

- обработка концевыми разнонаклонными фрезами и фрезами с переменным шагом;
- динамика фрезерования;

E-mail: kozlova@zntu.edu.ua.

Кришталь Владимир Александрович – начальник цеха ГП «Ивченко-Прогресс».

Научные интересы:

- концевое фрезерование тонкостенных деталей;
- динамика фрезерования;
- качество фрезерования тонкостенных деталей.

E-mail: logominov.v@gmail.com.

Кондратюк Эдуард Васильевич – главный технолог ГП «Ивченко-Прогресс».

Научные интересы:

- обеспечение качества обработки деталей и сборки авиационных двигателей;
- повышение эксплуатационных характеристик деталей ГТД технологическими методами.

E-mail: KondratyukEV@ivchenko-progress.com.

Статья поступила в редакцию 17.10.2017.