

формационных сигналов дает действительный сигнал: $p - \Delta p = 130,15 - 10,15 = 120$ дБ. Такое суммирование проводится n раз по определенному алгоритму и по специально составленной программе, заложенной в устройстве.

Из результатов экспериментального исследования (см. рис. 2) следует, что полученный разброс звукового давления по частоте можно аппроксимировать по-разному. Считаем наиболее подходящим сигнал в виде треугольника, выдаваемый функциональным генератором. При этом реализация предлагаемого устройства становится проще и эффективнее. В частности, отметим, что в связи с ростом потребности измерения звукового давления разработаны специальные микросхемы для построения импульсных усилителей звуковых частот. Одна из них — микросхема ТДА8920, которая имеет два одинаковых канала, содержащих входные каскады, широтно-импульсные модуляторы, схему управления, выходные ключи и пр. [8].

В заключение отметим, что неравномерность АЧХ измерительной аппаратуры понижается благодаря ее выравниванию с 6—9 дБ до 1—3 дБ на плоском участке характеристики ОУ в рабочем диапазоне частот. Для этого необходимо повысить помехоустойчивость к внешним электромагнитным и синфазным помехам. Целесообразно усилитель заряда 5 поместить в дополнительный экран 6 и связать его с экраном коаксиального кабеля. Защитные цепи (экраны) датчика следует соединить между собой и подключить к экрану УЗ. Сигнальная и защитные цепи, а также электрическая схема источника поляризации должны быть изолированы от земли и испытываемого объекта (см. точку В на рис. 1). Минимальное измеряемое значение пульсаций давления не превышает 0,1 Па (74 дБ). Инерционность датчика, обуслов-

ленная временем поляризации и постоянной времени датчика, не оказывает заметного влияния на результаты измерения пульсаций давления в широком диапазоне звуковой частоты.

Л и т е р а т у р а

1. Казарян А. А. Пленочные датчики давления. М.: Бумажная галерея, 2006.
2. Пат. 2334964 РФ. Измерительный конденсаторный микрофон звукоаого давления и способ его сборки / А. А. Казарян, Н. А. Езеев, А. Н. Шестопалов // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 27.
3. Пат. 2281470 РФ. Устройство для измерения звукового давления / А. А. Казарян, Л. М. Москалик // Изобретения. Полезные модели. 2006. № 22.
4. Порта М. и др. Пленочные датчики давления и их применение / Пер. с фр. М.: Всесоюз. центр переводов, 1983. № Е-32663.
5. Нурберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1970.
6. Моругин Л. А., Глебович Г. В. Наносекундная импульсная техника. М.: Сов. радио, 1964.
7. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Л.: Энергия, 1974.
8. Петропавловский Ю. Микросхемы для построения импульсных усилителей звуковых частот в современной звуковой и видеоаппаратуре // Современная электроника. 2009. № 7. С. 16.

Дата принятия 08.04.2013 г.

621.9

Применение информационно-измерительной системы для повышения точности обработки тонкостенных деталей на фрезерных станках с ЧПУ

А. В. ИСАЕВ, М. П. КОЗОЧКИН

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия
e-mail: avisz@yandex.ru; astra-mp@yandex.ru

Рассмотрен принцип контроля вибраций, возникающих в процессе обработки тонкостенных заготовок фрезами с режущей частью из твердого сплава и кубического нитрида бора, при помощи информационно-измерительной системы реального времени. Проведено сопоставление уровня вибраций с геометрическими параметрами и шероховатостью участков обработанной поверхности.

Ключевые слова: вибродиагностика, информационно-измерительная система, фрезерование.

This paper contains a description of a principle of monitoring of vibrations (chatter) that affect machining process of thin-walled parts on the CNC milling machine by milling cutter with solid carbide and CNB teeth, using a measuring information system, and comparison of the values of vibration signals with roughness of machined surface.

Key words: vibration diagnostics, measuring information system, milling.

Вопросы контроля процессов механической обработки тонкостенных изделий имеют большое значение в современном машиностроении. Это связано с наметившейся в

последнее время тенденцией к увеличению номенклатуры тонкостенных изделий (детали турбин и насосов, корпусные детали и т. д.), обусловленной объективными причинами, в

частности, требованиями по снижению массы изделий и улучшению их эргономичности [1]. Известно, что вибрации отображают функциональное состояние процесса резания, являясь его неотъемлемым параметром, непосредственно влияющим на стойкость режущего инструмента, качество и производительность обработки и, как следствие, на экономическую эффективность производства. Один из способов обработки тонкостенных деталей — фрезерование, в процессе которого прогибы поверхностей под действием сил резания могут быть сопоставимы с общим припуском на обработку. Это приводит к погрешностям обработки, зависящим от износа режущего инструмента, режимов резания, параметров технологической системы и пр. [2]. Поэтому на этапе технологической подготовки производства важно знать тенденции изменения погрешностей обработки в зависимости от задаваемых условий операции [3—5].

Экспериментальная часть работы заключается в контроле вибраций, возникающих при фрезеровании тонкостенных алюминиевых заготовок, последующем измерении полученных изделий на современном контрольно-измерительном оборудовании и установлении зависимостей между параметрами процесса резания, уровнем вибраций и геометрическими характеристиками обработанных поверхностей, такими как толщина стенок и шероховатость их поверхности.

Исследования проводили на фрезерном обрабатывающем центре MIKRON VCE 1000 Pro в Государственном инженеринговом центре МГТУ «СТАНКИН». Для измерения вибраций использовали информационно-измерительную систему (ИИС) [6], в состав которой входит акселерометр KD35, установленный в горизонтальной плоскости по направлению подачи фрезы, усилитель ВШВ-003 и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) Е-440 фирмы L-CARD [7, 8]. Система позволяет регистрировать сигнал виброускорения с частотой до 39 кГц в диапазоне (0,01—50)g с чувствительностью 100 мВ на 1g и погрешностью не более 0,001g. Она построена на базе системы сбора данных LTR, обладающей модульной структурой, собственным сигнальным процессором (семейство Blackfin) и использующей операционную систему (ОС) реального времени (FreeRTOS) для обработки результатов измерения. Применение этой ОС позволяет интегрировать ИИС с другими системами реального времени, например, с числовым программным управлением (ЧПУ) станка по протоколу обмена Modbus. Как показано в [9], по мере износа обрабатывающего инструмента уровень вибраций в наибольшей степени возрастает в октавной полосе со средней геометрической частотой 2 кГц. Именно в этом частотном диапазоне обычно находятся собственные частоты колебаний технологической системы для фрезерных станков, аналогичных рассматриваемой модели. Если для оценки состояния инструментов сравнивать амплитудные значения в указанной октавной полосе, то можно значительно упростить систему контроля процесса резания при фрезеровании. Для этого в ИИС можно ввести аналоговый модуль, выделяющий из сигнала вибраций октавную полосу и формирующий на выходе огибающую ее амплитудных значений. Значения такой огибающей, поданные на АЦП системы ЧПУ станка, можно оцифровывать с частотой не более 1 кГц, что упростит организацию работы по управлению станком. Подробное описание ИИС приведено в [10].

Измерения толщины стенок готовых деталей проводили на координатно-измерительной машине DEA Global Performance 05.05.05, а параметров шероховатости обработанных поверхностей — на профилографе Hommel Tester T8000.

Результаты исследований показали, что направление фрезерования (попутное или встречное) значительно влияет на уровень вибраций в процессе обработки и, как следствие, на точность и шероховатость обработанной поверхности [11—16]. Попутное фрезерование характеризуется совпадением направлений подачи заготовки и вектора скорости резания, а встречное — их противоположной направленностью.

На рис. 1, а показан эскиз обрабатываемой детали. Радиусы внутренних углов заготовки выбраны таким образом, что два из них равны радиусу чистовой фрезы, т. е. $r_{фр} = 6$ мм, а два другие вдвое превышают его. Были проведены серии экспериментов по обработке заготовок с номинальной тол-

щиной стенок $t_{ст}^H = 1,5; 1,0; 0,5; 0,3$ мм. Для удобства каждой из стенок был присвоен номер 1—4. Параметры резания: скорость 188 м/мин, подача 0,03 мм/зуб, глубина 0,5 мм, ширина фрезерования 3,6 мм. Заготовки обрабатывали последовательно сверху вниз за пять проходов цельными твердосплавными и составными фрезами, оснащенными напайными режущими элементами из кубического нитрида бора (КНБ). На рис. 1, б представлена схема измерения толщины стенок в точках 1—6, а на рис. 2 даны графики изменения толщины стенок в этих точках для изделий с предельными номиналь-

ными значениями $t_{ст}^H = 1,5$ и 0,3 мм.

Из анализа рис. 2 можно сделать вывод, что при относительно толстых стенках имеется тенденция к увеличению их толщины с приближением к основанию заготовки, и она больше проявляется для встречного фрезерования. Объясняется это тем, что по мере приближения к основанию заготовки жесткость стенок растет, и на фрезу начинают действовать силы со стороны ранее обработанной поверхности, на которой происходят процессы трения и микрорезания. Следовательно возрастает отклонение тела фрезы и увеличивается толщина стенок. Попутному фрезерованию менее свойственны процессы трения в зоне резания при входе и выходе зубьев, что обеспечивает меньшие деформации тела фрезы и отклонения толщины стенок.

С уменьшением толщины стенок, т. е. их жесткости, ситуация меняется. В этом случае деформации перераспределяются в сторону обрабатываемой стенки. При попутном

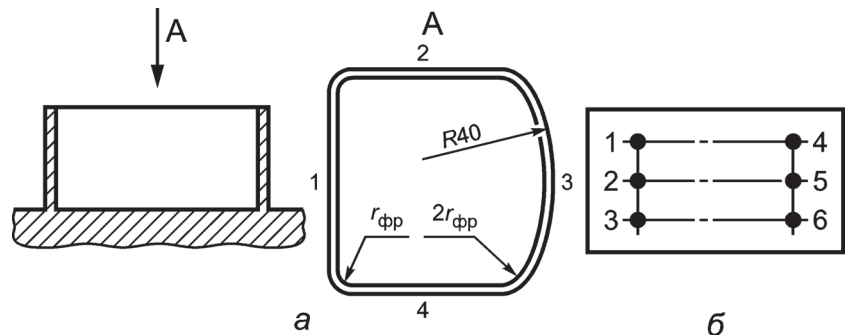


Рис. 1. Эскиз экспериментальной детали с номерами 1—4 стенок заготовки (а) и схема расположения точек измерения 1—6 толщины стенок (б)

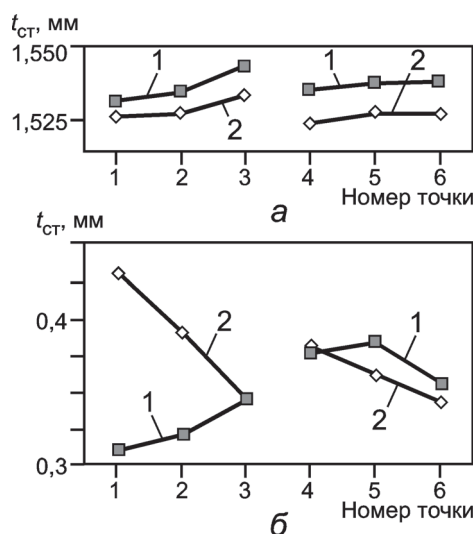


Рис. 2. Результаты измерения толщины стенок $t_{СТ}$ по высоте изделия в зависимости от вида фрезерования — встречного (1) и попутного (2) при разной номинальной толщине $t_{СТ}^н = 1,5; 0,3$ мм (соответственно а, б)

фрезеровании составляющая силы резания, направленная по нормали к обрабатываемой поверхности, действует в момент врезания каждого зуба. При встречном фрезеровании эта же составляющая направлена от обрабатываемой поверхности и действует в момент выхода зуба из зоны резания, стремясь прижать обрабатываемую поверхность к телу фрезы.

Результаты измерения шероховатости R_a стенки 1 (см. рис. 1, а) для каждой исследуемой толщины приведены в табл. 1. Проходы с меньшими номерами находятся ближе к верхнему краю заготовки. Шероховатость пятого прохода не указана из-за трудностей измерений в крайней позиции щупа профилографа. Также в таблице даны значения R_a для малых радиусов поверхностей в углах детали, измеренные в направлении, нормальном к направлению подачи фрезы.

Шероховатость детали R_a на разных проходах фрезы и в углах детали

Толщина стенки, $t_{СТ}$, мм	R_a , мкм, при фрезеровании									
	встречном					попутном				
	Номер прохода				В углах детали	Номер прохода				В углах детали
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1,5	0,3	0,3	0,8	0,5	5,5	0,4	0,4	0,4	1,0	4,7
1,0	0,2	0,4	0,5	0,4	5,0	0,4	0,3	0,3	0,4	4,9
0,5	0,7	0,3	0,4	0,5	7,8	0,3	0,3	0,3	0,2	2,8
0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	6,5	0,2	0,2	0,2	0,3	2,05

Из табл. 1 следует, что при малой толщине стенок попутное фрезерование дает несколько меньшие значения шероховатости, чем встречное. Преимущество попутного фрезерования существенно при обработке поверхностей в углах с малым радиусом скругления, равным радиусу фрезы, что вызывает большие нагрузки на фрезу (так называемый «обжим» фрезы). При попутном фрезеровании тело фрезы от-

жимается от обрабатываемой поверхности под действием нормальной составляющей силы резания, уменьшая при этом нагрузку и глубину оставляемых следов. При встречном фрезеровании эта же составляющая силы резания препятствует отжиму фрезы. В результате после выхода из зоны резания каждого зуба возникает разгрузка упругой системы, оставляющая на поверхности глубокий след. При всех видах фрезерования обработка углов сопровождается интенсивными колебаниями. Этот факт подтверждается данными, приведенными в [17], согласно которым в случае обработки тонкой и высокой стенки за один проход при попутном фрезеровании, кроме всего прочего, наблюдалось смятие и даже прорыв металла в углах, чего не отмечалось при встречном фрезеровании.

При обработке угловых участков с большими радиусами отсутствуют проблемы, связанные с увеличением шероховатости. Следует отметить, что обработка поверхности радиусом 40 мм (стенки 3, см. рис. 1, б) давала более стабильную чистоту поверхности по высоте стенки, что объясняется ее большей жесткостью по сравнению с плоскими поверхностями. Наибольшие вибрации наблюдаются при обработке прямого угла с радиусом скругления, равным радиусу фрезы.

В процессе эксперимента проводилась запись виброакустических (ВА) сигналов при помощи акселерометра, установленного на столе с закрепленной заготовкой. На рис. 3 показаны примеры записей ВА-сигналов при встречном 1 и попутном 2 фрезеровании. При встречном фрезеровании сигнал 1 сопровождается пакетами импульсов длительностью до 0,3 с. Появление таких импульсов связано с возможностью попадания частиц стружки под зуб, входящий в зону резания, что не оказывает существенного влияния на шероховатость, но ухудшает внешний вид поверхности. На рис. 3 приведен пример записи ВА-сигнала 1' в крупном масштабе при встречном фрезеровании на участке, где наблюдалось ухудшение качества поверхности из-за попадания стружки в зону резания. Из записи ВА-сигнала 2' при попутном фрезеровании следует, что на каждый оборот фрезы приходится один мощный импульс сигнала. Между крупными оборотными импульсами видны значительно меньшие импульсы, создаваемые другими зубьями. Такая ситуация типична для

Таблица 1

фрезерования концевыми фрезами, особенно если в процессе обработки одновременно участвуют менее двух зубьев, т. е. фрезерование является неравномерным [18]. Очевидно, что биение зубьев и их неравномерный износ будут сказываться на качестве получаемой поверхности. Конкретные способы повышения равномерности фрезерования зависят от условий обработки и параметров технологической системы [19, 20].

Сравнение видов сигналов 1' и 2' показывает, что в условиях встречного фрезерования стружка создает демпфирующее воздействие на динамическую систему в зоне резания. Это отражается в заметном нарушении симметрии ВА-сигнала, обусловленного трением частиц стружки, попавших между контактирующими поверхностями. Анализ ВА-сигналов показал, что в спектрах виброперемещения преобладают амплитуды на оборотной $f_{об}$ частоте, значительно превышающие амплитуды на основной частоте.

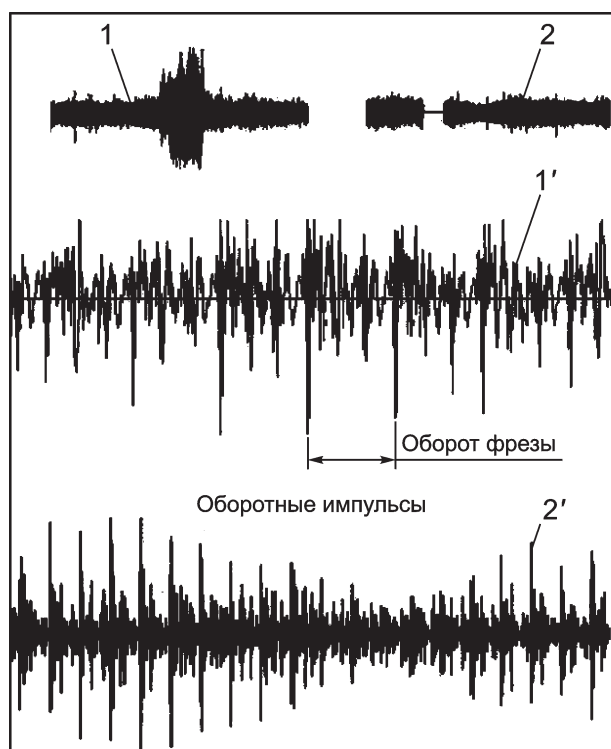


Рис. 3. Примеры записи ВА-сигнала:

1, 2 — при встречном и попутном фрезеровании, соответственно;
1', 2' — то же в крупном масштабе

литуды на зубцовой $f_{зуб}$ частоте и кратных ей гармониках, например $2f_{зуб}$. В табл. 2 приведено соотношение доминирующих амплитуд виброперемещения и ускорения на соответствующих частотах. Данные табл. 2 представлены по проходам попутного фрезерования от верхнего к нижнему; в последней строке для сравнения записаны результаты последнего прохода при встречном фрезеровании. Из табл. 2 следует, что на оборотной частоте проявляются демпфирующие свойства стружки, попавшей в зону резания.

Таблица 2

Соотношение максимумов в спектрах
виброперемещения A_{max} и ускорения A_{max}^a

Номер прохода (вид фрезерования)	$A(f_{об})/A_{max}$, %	$A^a(2f_{зуб})/(A_{max}^a)$, %
1 (попутное)	53	76
2 (попутное)	68	95
3 (попутное)	81	99
4 (попутное)	86	100
5 (попутное)	100	64
5 (встречное)	33	63

На рис. 4 показаны фотографии поверхностей, полученные в разных условиях фрезерования (изображения на рис. 4, а, б и в повернуты на 90°). На рис. 4, а заметны пери-

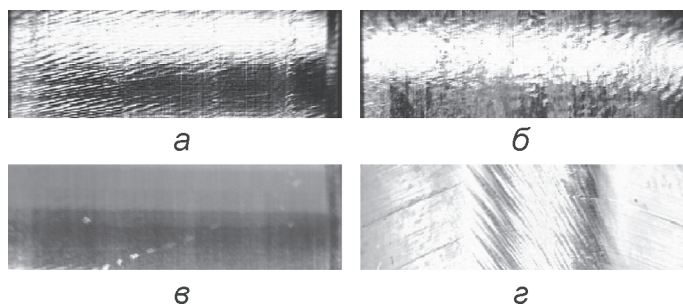


Рис. 4. Поверхности, полученные при обработке стенок $t_{ст}^H = 0,3$ мм:
а, б — попутное и встречное фрезерование; в, г — попутное и встречное фрезерование поверхностей соответственно радиусами 40 и 6 мм (увеличение 40×)

одически повторяющиеся следы при попутном фрезеровании, шаг которых соответствует одному обороту фрезы, что определяется биением инструмента; в левой части изображения, примыкающей к основанию детали, следы фрезерования более заметны по сравнению с верхней частью стенок (правая сторона фото). На рис. 4, б вся обработанная поверхность при встречном фрезеровании покрыта пятнами от шаржирования частицами стружки, попавшей в зону резания. На рис. 4, в следы фрезерования малозаметны по сравнению с плоской поверхностью. На рис. 4, г следы фрезерования радиусной поверхности в углу заготовки на порядок выше, чем на прилегающих поверхностях.

Важно отметить, что применение инструмента с КНБ дает ощутимые преимущества по производительности черновой обработки (выборке основного объема материала) тонкостенных заготовок по сравнению с твердосплавным инструментом вследствие достижения более высоких режимов резания [21]. В то же время при чистовой обработке фрезами, оснащенными КНБ, наблюдаются те же отрицательные эффекты, что и в случае использования твердого сплава.

Выводы. При отладке технологии обработки тонкостенных заготовок целесообразно использовать ИИС для записи и последующего анализа сигналов вибраций, сопровождающих процесс резания и позволяющих быстрее диагностировать причины возникающих отклонений. Кроме того, при сопоставлении данных, полученных от ИИС, с результатами измерения параметров обработанных тонкостенных поверхностей следует, что примененная (или аналогичная по структуре) ИИС в комплексе с оборудованием, измеряющим характеристики поверхности объекта, обеспечивает достаточно точную диагностику процессов фрезерования и управление ими в режиме реального времени в условиях промышленного производства тонкостенных изделий.

Литература

- Емельянов П. Н. и др. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 56—59; Emelyanov P. N. et al. Con-temporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 11. P. 1311—1315.

2. **Юркевич В. В.** Измерение колебаний резца при токарной обработке // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 22—24; **Yurkevich V. V.** Measurement of cutting tool vibrations during turning // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 7. P. 660—663.
3. **Глубоков А. В., Глубокова С. В., Телешевский В. И.** Автоматизированный выбор методов и средств измерений отклонений расположения // Измерительная техника. 2012. № 6. С. 30—33; **Glubokov A. V., Glubokova S. V., Teleshevsky V. I.** The automated choice of methods and instruments for measuring deviations of arrangement // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 6. P. 637—642.
4. **Григорьев С. Н. и др.** Контроль параметров процесса резания на основе диагностирования инструмента и заготовки // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 46—48; **Grigoriev S. N. et al.** Control of parameters of the cutting process on the basis of diagnostics of the machine tool and workpiece // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 5. P. 555—558.
5. **Григорьев С. Н., Телешевский В. И.** Проблемы измерений в технологических процессах формообразования // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 3—7; **Grigoriev S. N., Teleshevskii V. I.** Measurement problems in technological shaping processes // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 7. P. 744—749.
6. **Козочкин М. П., Порватов А. Н., Сабиров Ф. С.** Оснащение технологического оборудования информационно-измерительными системами // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 29—32; **Kozochkin M. P., Porvatov A. N., Sabirov F. S.** The fitting of technological equipment with data-measuring systems // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 5. P. 530—534.
7. **Григорьев С. Н. и др.** Техническая диагностика станочного оборудования автоматизированного производства // Контроль. Диагностика. 2011. № 8. С. 48—54.
8. **Гусев А. В., Козочкин М. П., Порватов А. Н.** Разработка мобильных систем для мониторинга и диагностики станочных узлов // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 3. С. 20—23.
9. **Завгородний В. И. и др.** Влияние динамических характеристик инструмента и заготовки на результаты виброакустического контроля процесса резания // СТИН. 2010. № 6. С. 13—17.
10. **Исаев А. В., Козочкин М. П., Порватов А. Н.** Информационно-измерительная система для контроля вибраций при металлообработке // Метрология. 2011. № 8. С. 18—25.
11. **Гречишников В. А., Косарев Д. В., Косарев В. А.** Снижение уровня вибраций при нарезании внутренних резьб резцовыми фрезами, оснащенными сменными твердосплавными пластинами // СТИН. 2010. № 6. С. 21—24.
12. **Жарков И. Г.** Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986.
13. **Исаев А. В., Гречишников В. А.** Применение режущих пластин с прямолинейной кромкой для обработки криволинейных участков профиля // СТИН. 2010. № 1. С. 26—30.
14. **Исаков А. И., Чулин И. В.** Экспериментальные исследования работоспособности регулируемой торцевой фрезы с режущими элементами из СТМ при обработке мерных пазов // Справочник. Инженерный журнал. 2012. № 13. С. 23—25.
15. **Козочкин М. П., Солис Н. В.** Исследование связи вибраций при резании с качеством получаемой поверхности / Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2009. № 2. С. 16—23.
16. **Чулин И. В.** Влияние угла в плане φ на стойкость фасонных фрез // СТИН. 2010. № 11. С. 16—17.
17. **Купцов В. Р.** Исследование способов фрезерной обработки применительно к производству тонкостенных корпусных деталей // Технология машиностроения. 2013. № 2 (128). С. 13—16.
18. **Гречишников В. А., Косарев В. А., Косарев Д. В.** Повышение виброустойчивости сборного режущего инструмента // Справочник. Инженерный журнал. 2009. № 5. С. 27—30.
19. **Козочкин М. П., Кочинев Н. А., Сабиров Ф. С.** Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 30—34; **Kozochkin M. P., Kochinev N. A., Sabirov F. S.** Diagnostics and monitoring of complex production processes using measurement of vibration-acoustic signals // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 7. P. 672—678.
20. **Сабиров Ф. С., Савинов С. Ю.** Диагностика и контроль точности приводов подач многокоординатных металлорежущих станков с ЧПУ // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 20—22; **Sabirov F. S., Savinov S. Yu.** Diagnostics and control of the accuracy of axis drives for automatically controlled multi-coordinate metal cutting machines // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 8. P. 879—882.
21. **Гречишников В. А., Исаков А. И.** Регулируемые торцевые фрезы с режущими элементами из СТМ // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. № 1. С. 12—14.

Дата принятия 12.08.2013 г.

