



УДК 621.91.01

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ТРЕБУЕМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АВИАЦИОННОГО ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ

Ю.С. Андреев<sup>а</sup>, Н.А. Демкович<sup>б</sup>, Р.М. Исаев<sup>а</sup>, А.А. Целищев<sup>а</sup>, С.Д. Васильков<sup>а</sup><sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация<sup>б</sup> ООО «Би Питрон СП», Санкт-Петербург, 191014, Российская Федерация

Адрес для переписки: ysandreev@corp.ifmo.ru

**Информация о статье**

Поступила в редакцию 24.06.16, принята к печати 19.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1103-1110

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Андреев Ю.С., Демкович Н.А., Исаев Р.М., Целищев А.А., Васильков С.Д. Определение микрогеометрии функциональной поверхности детали, обеспечивающей требуемые показатели авиационного датчика вибрации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1103–1110. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1103-1110

**Аннотация**

**Предмет исследования.** Рассмотрены способы повышения эффективности пьезоэлектрических вибродатчиков, используемых в авиационной технике для контроля уровня вибрации газотурбинных двигателей. Исследовано влияние микрогеометрии поверхности детали вибродатчика на его коэффициент поперечного преобразования. Предложены меры по улучшению эксплуатационной характеристики авиационных датчиков вибрации без увеличения себестоимости их изготовления за счет оптимизации микрогеометрии функциональных поверхностей.

**Метод.** Показан способ нахождения наилучшей микрогеометрии поверхности в заданных производственных условиях. Применен метод оценки микрогеометрии функциональных поверхностей с использованием графических критериев. Для планирования эксперимента по обработке функциональных поверхностей использован метод Тагути, позволивший значительно сократить количество проводимых экспериментов без потери достоверности результатов.

**Основные результаты.** Выявлена взаимосвязь технологических факторов изготовления деталей датчика вибрации и его чувствительности. Определены оптимальные методы и технологические параметры механической обработки поверхностей деталей, обеспечивающие наилучшую чувствительность датчиков. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут найти применение на приборостроительных предприятиях при проектировании и изготовлении датчиков вибрации, принцип работы которых основан на пьезоэлектрическом эффекте.

**Ключевые слова**

микрогеометрия поверхности, механическая обработка, пьезоэлектрический датчик вибрации, метод Тагути, графические критерии, функциональные свойства поверхности

**Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке фонда РФФИ (проект № 16-38-00847). Работа отмечена дипломом «За лучший научно-исследовательский доклад аспиранта» на V Всероссийском конгрессе молодых ученых (2016 г.)

## FUNCTIONAL SURFACE MICROGEOMETRY PROVIDING THE DESIRED PERFORMANCE OF AN AIRCRAFT VIBRATION SENSOR

Yu.S. Andreev<sup>а</sup>, N.A. Demkovich<sup>б</sup>, R.M. Isaev<sup>а</sup>, A.A. Tselishev<sup>а</sup>, S.D. Vasilkov<sup>а</sup><sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation<sup>б</sup> "Bee Pitron" SP, Ltd., Saint Petersburg, 191014, Russian Federation

Corresponding author: ysandreev@corp.ifmo.ru

**Article info**

Received 24.06.16, accepted 19.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1103-1110

Article in Russian

**For citation:** Andreev Yu.S., Demkovich N.A., Isaev R.M., Tselishev A.A., Vasilkov S.D. Functional surface microgeometry providing the desired performance of an aircraft vibration sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1103–1110. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1103-1110

**Abstract**

**Subject of Research.** The paper deals with the methods of efficiency improving for piezoelectric vibration sensors used in aircraft industry to control the level of vibration of gas turbine engines. The study looks into the matter of surface microgeometry effect of the vibro sensor part on its transverse sensitivity ratio. Measures are proposed to improve the sensor performance without cost supplement by optimization of the functional surface microgeometry. **Method.** A method for determination of the best possible surface microgeometry within the specific production conditions is shown. Also, a method for microgeometry estimation of the functional surfaces using graphical criteria is used. Taguchi method is used for design of experiment for functional surfaces machining. The use of this method reduces significantly the number of experiments without validity loss. **Main Results.** The relationship between technological factors of manufacturing the vibration sensor parts and its sensitivity has been found out. The optimal surface machining methods and process conditions for parts ensuring the best possible sensitivity have been determined. **Practical Relevance.** Research results can be used by instrument-making companies to improve the process of piezoelectric vibration sensor design and manufacturing.

**Keywords**

surface microgeometry, mechanical processing, piezoelectric vibration sensor, Taguchi method, graphical criteria, surface functional properties

**Acknowledgements**

This work was supported by the RFBR (grant No.16-38-00847). The work has earned the award at the V ITMO University Congress of Young Scientists (2016): "Best Scientific and Research Paper Presented by a PhD Student".

**Введение**

Пьезоэлектрический датчик – прецизионный прибор, который используется при измерении усилий, давлений, ускорений, массы, угловых скоростей, моментов, деформаций. Подобные датчики находят применение при решении различных задач, являясь частью тепловых приборов, устройств контроля составов, концентраций газов, влажности [1–6]. Пьезоэлектрические преобразователи обладают рядом достоинств: широкими динамическими и частотными диапазонами, простотой конструкции, высокой линейностью характеристик, надежностью и сроком службы [7–9]. Датчик вибрации с первичным преобразовательным элементом из пьезоэлектрической керамики является универсальным прибором, в настоящее время применяемым почти во всех областях измерения и анализа механических колебаний, например, в авиационной и ракетно-космической технике, атомной промышленности, энергетике, двигателестроении. Зачастую пьезоэлектрические датчики вибрации работают в экстремальных условиях. К таким приборам предъявляются достаточно жесткие требования по механической надежности, по стабильности метрологических характеристик в условиях эксплуатации и по сохранению работоспособности при воздействии внешних дестабилизирующих факторов.

Актуальная задача получения высокоэффективных датчиков, представляющих достоверную измерительную информацию о состоянии и работоспособности сложных технических объектов, решается в основном за счет разработок новых конструкций пьезоэлектрических преобразователей и совершенствования пьезотехнологий [10–12]. Использование классических методов для улучшения характеристик вибродатчиков зачастую сопровождается высокими требованиями к точности размеров, форм, взаимному расположению, а также к микрогеометрии поверхностей деталей. Эти факторы могут привести к существенному увеличению себестоимости, а в ряде случаев даже к нерентабельности производства изделия. Например, повышение точности изготавливаемых деталей требует применения прецизионного оборудования, специального технологического оснащения.

В настоящей работе предлагаются результаты исследования зависимости между микрогеометрией контактной поверхности детали основания датчика вибрации и его коэффициентом поперечного преобразования. В качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии функциональных поверхностей используются графические изображения функций, характеризующие отклонения неровностей профиля микрогеометрии поверхности. Среди ученых, занимавшихся проблемами исследования влияния микрогеометрии поверхностей на эксплуатационные свойства деталей, следует отметить труды И.В. Крагельского, Н.Б. Демкина, Ю.Г. Шнейдера, Э.В. Рыжова, А.Г. Сулова, J.A. Greenwood, Я.А. Рудзита, В.М. Мусалимова, В.А. Валетова и др. [13, 14]. Среди тех, кто занимается пьезоэлектрическими датчиками, можно выделить У. Кэди, Р. Тэрстона, У. Мэзона, Н.Н. Андреева, А.А. Харкевича, В.В. Малова, М.В. Богуша и др. [15, 16]. В рамках предлагаемой авторами работы решаются актуальные задачи улучшения эксплуатационных характеристик датчиков. Исследуется влияние микрогеометрии поверхности детали датчика вибрации на его коэффициент поперечного преобразования. Определяются режимы резания и геометрии режущего инструмента, обеспечивающие получение требуемой микрогеометрии обработанной поверхности. Выявляется микрогеометрия функциональных поверхностей детали, обеспечивающая требуемое значение коэффициента поперечного преобразования вибродатчика. Используются графические критерии оценки микрогеометрии функциональной поверхности детали датчика вибрации, предложенные В.А. Валетовым [13].

**Конструкция и принцип работы датчика вибрации**

Исследуемый датчик (рис. 1) выполнен на основе модульного пьезоэлемента с пятью активными слоями 1. Пьезоэлемент изолирован от металлических деталей датчика с помощью двух шайб 2 из кера-

мического материала. Пьезоэлемент размещается между основанием 3 и грузом 4 и поджимается гайкой 5. Жесткость конструкции обеспечивается стойкой 6, которая ввинчивается в основание 3. Для увеличения чувствительности датчика на нем дополнительно закреплена обойма 7. Токосъемники вводятся через втулку 8. Крепление датчика на контролируемом объекте осуществляется с помощью трех винтов.

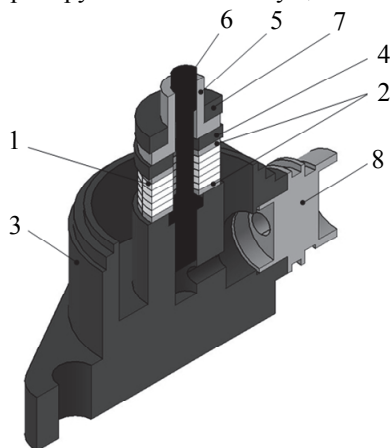


Рис. 1. Вид геометрической модели датчика вибрации в разрезе

Чувствительный элемент датчика изготавливается из пьезокерамики ЦТС-26, электроизоляционные шайбы – из керамического материала синоксаль-49, металлические детали конструкции выполняются из стали различных марок (12Х18Н10Т, ВНС-33).

В основу работы пьезоэлектрического вибродатчика положен пьезоэффект – явление возникновения разности потенциалов на пьезокристалле при его механической деформации. При действии ускорения гармонических колебаний происходит деформация чувствительного элемента, в результате чего на его поверхностях генерируется электрический заряд. Регистрация генерируемого заряда осуществляется токосъемниками. В процессе изготовления датчика определяются такие важнейшие характеристики, как частота установочного резонанса (кГц), коэффициент преобразования датчика (пКл·с<sup>2</sup>/м), относительный коэффициент поперечного преобразования (%).

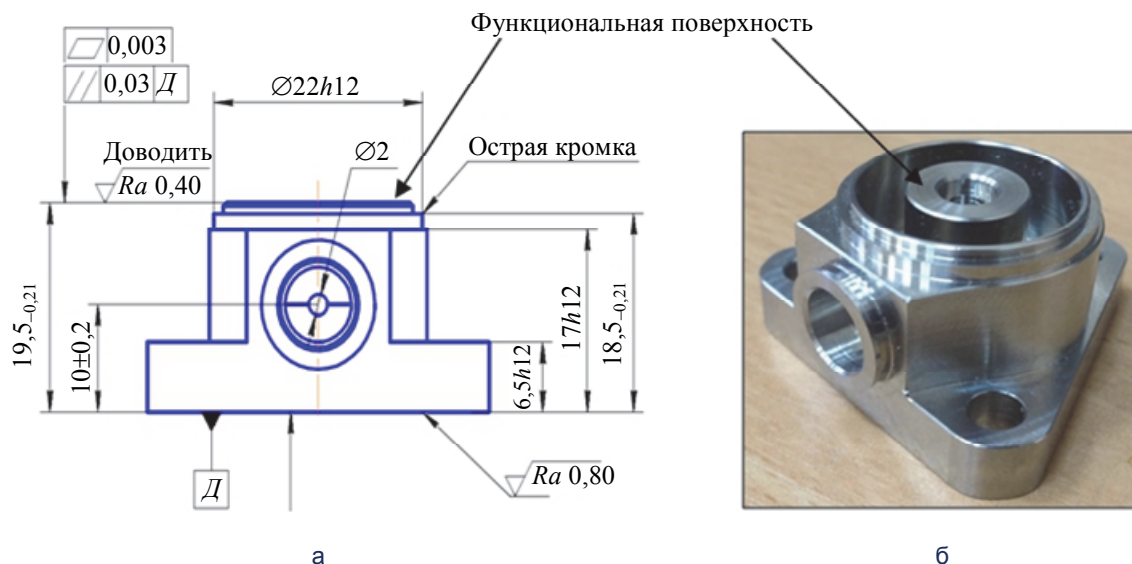


Рис. 2. Эскиз (а) и внешний вид (б) детали «Основание» датчика вибрации

Измерение относительного коэффициента поперечного преобразования (боковой чувствительности) датчика вибрации проводится на специальной испытательной установке. При определении коэффициента поперечного преобразования образец устанавливают так, чтобы его ось чувствительности была перпендикулярна направлению возбуждаемой вибрации. Постепенно поворачивая образец вокруг оси чувствительности на 360°, определяют коэффициент поперечного преобразования в направлении, где его значение максимально. Амплитуду выходного сигнала образца, полученного при возбуждении вибрации в направлении, в котором коэффициент поперечного преобразования максимален, представляют в процентах от амплитуды выходного сигнала, который был бы получен при возбуждении той же вибрации в направлении оси чувствительности датчика. Это значение не должно превышать 5% по техническим условиям на датчики вибрации.

К функциональной поверхности детали «Основание» (рис. 2) предъявляются высокие требования по шероховатости и точности взаимного расположения относительно других поверхностей. Это обусловлено тем, что при изготовлении основания с недостаточной точностью ось чувствительности датчика вибрации будет наклонена, вследствие чего относительный коэффициент поперечного преобразования увеличится, что не допускается по техническим условиям.

Как установлено авторами, микрогеометрия функциональной поверхности основания существенно влияет на характеристики датчика вибрации. Известно несколько способов обработки данной поверхности, в том числе точение, фрезерование, шлифование, доводка и т.д. Микрогеометрия поверхности зависит от многих технологических факторов: применяемого оборудования, режущего инструмента, оснастки, смазочно-охлаждающей жидкости, режимов резания, стратегии обработки, материала заготовки и др.

**Исследование влияния микрогеометрии поверхности детали датчика вибрации на его коэффициент поперечного преобразования**

В рамках эксперимента изготовлено нескольких деталей «Основание» из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с различной исходной микрогеометрией рабочих поверхностей. При обработке исследуемой поверхности на токарном станке намеренно назначались различные режимы резания. После изготовления образцов проведены измерения шероховатости поверхностей с использованием профилометра Hommel Tester T8000.

Собранные датчики вибрации с основаниями, изготовленными при различных режимах, испытаны на стенде измерения коэффициента поперечного преобразования датчиков вибрации, разработанном на предприятии ПАО «Техприбор». Результаты измерений приведены в табл. 1.

Образец	Шероховатость поверхности основания $Ra$ , мкм	Коэффициент поперечного преобразования, %
1	0,1	3,1
2	0,13	3,2
3	0,59	6,7

Таблица 1. Шероховатость и коэффициент поперечного преобразования при точении с различными режимами резания

Как видно из табл. 1, коэффициент поперечного преобразования меньше на образце с минимальным значением шероховатости по параметру  $Ra$ . Значение коэффициента поперечного преобразования у третьего образца выходит за допустимый предел в 5%. Таким образом, микрогеометрия поверхности детали основания датчика вибрации влияет на его чувствительность.

В рамках эксперимента проведено сравнение технологически возможных способов обработки функциональной поверхности детали «Основание» датчика вибрации. Образцы изготавливались на токарном, фрезерном и доводочном оборудовании с одинаковой шероховатостью по параметру  $Ra$ . В табл. 2 приведены результаты измерения коэффициента поперечного преобразования для трех видов обработки поверхности основания с одинаковой шероховатостью поверхности по параметру  $Ra$ .

Образец	Вид обработки	Коэффициент поперечного преобразования, %
1	точение	3,1
2	фрезерование	Более 5
3	доводка	2,4

Таблица 2. Коэффициент поперечного преобразования для трех видов обработки с одинаковой шероховатостью поверхности по параметру  $Ra=0,1$  мкм

Вибродатчик с основанием, выполненным фрезерованием, в ходе эксперимента вышел из строя. Керамический изолятор, прилегающий к обработанной поверхности, раскололся, вследствие чего весь чувствительный пакет прибора стал свободно перемещаться вдоль стойки. В таких условиях датчик перестает работать. Можно также отметить, что при одинаковой шероховатости по параметру  $Ra$  способ обработки функциональной поверхности основания оказывает влияние на коэффициент поперечного преобразования датчика. Очевидно, что параметр  $Ra$ , являясь интегральным параметром, не полностью отражает микрогеометрию поверхности. По этой причине была предпринята попытка применить для более подробного анализа графические критерии оценки микрогеометрии, впервые предложенные В.А. Валетовым [13].

Построение и сравнение графических критериев оценки выполнено с использованием программ-

ного продукта «Лемминг» [14]. На программном уровне выполнены фильтрация профилей с помощью прямого и обратного преобразования Фурье, построение графических критериев оценки профиля поверхности: графиков плотности распределения ординат профиля и плотности распределения тангенсов углов наклона профиля (рис. 3). На графиках:  $H$  – отношение количества ординат данной величины к общему количеству ординат;  $Y$  – ордината профиля;  $Rq$  – среднеквадратическое отклонение ординат исходного профиля;  $\operatorname{tg}\alpha$  – тангенс угла наклона профиля. Графики (рис. 3) содержат полную информацию об угловых и высотных характеристиках профиля. Видно, что профили образцов носят различный характер, несмотря на то, что параметр  $Ra$  у них одинаковый.

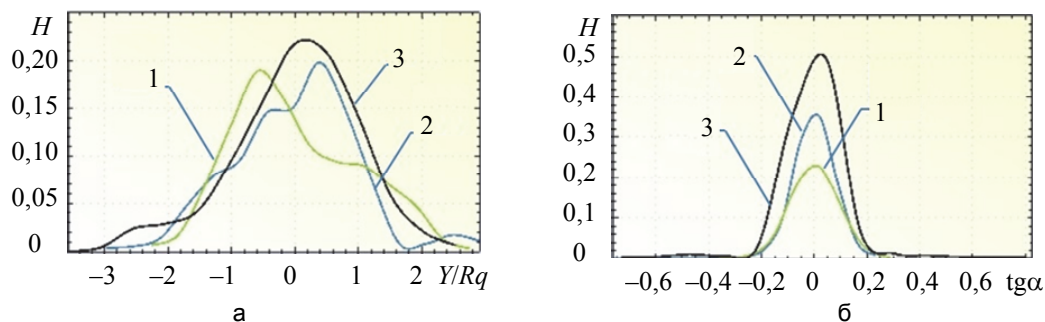


Рис. 3. Графические критерии оценки профилей поверхностей трех образцов, обработанных на различном оборудовании: график плотности распределения ординат профилей (а), график плотности распределения тангенсов углов наклона профилей (б); 1 – образец после токарной обработки, 2 – образец после фрезерной обработки, 3 – образец после доводочной операции

#### Определение режимов изготовления контактной поверхности детали датчика вибрации с применением метода Тагути

Как было показано выше, наилучшие эксплуатационные характеристики имеют детали, рабочая поверхность которых обработана на токарном станке. Мы задались целью определения и оптимизации режимов обработки (резания). В качестве материала основания выбрана сталь 12X18H10T. Образцы представляли собой плоскопараллельные цилиндры диаметром 18 мм и высотой 4 мм. Обработка проводилась на токарном станке HAAS SL-10.

Факторами, имеющими наибольшее влияние на изменение шероховатости и профиля поверхности, являются подача (A), глубина резания (B) и скорость резания (C), угол при вершине резца (D). Фактор D определяет профиль режущего инструмента, который может иметь наибольшее влияние на формирование профиля поверхности. Из каталога инструмента [17] выбраны по три уровня обработки: минимальные, средние и максимальные значения (табл. 3).

Факторы		Уровни обработки		
		1	2	3
A	Подача, мм/об	0,03	0,09	0,15
B	Глубина резания, мм	0,1	0,3	0,5
C	Скорость резания, м/мин	140	190	240
D	Угол при вершине резца, °	35	55	80

Таблица 3. Факторы эксперимента и их уровни

Даже такая простая задача по определению оптимальных режимов (четыре фактора) требует  $3^4$  экспериментов, что приводит к существенным трудозатратам. Нами использован метод Тагути [18, 19], позволяющий сократить число экспериментов. Для этого выбирается матрица сочетаний уровней факторов (так называемый «ортогональный набор»). В нашем случае он обозначен как  $L_9$  ( $3^4$ ) [18].

Опуская принятую для этого метода последовательность вычислений, отметим, что было получено подтверждение о наибольшем влиянии факторов A и D на шероховатость обработанных поверхностей. Получен оптимальный набор режимов резания A1B1C1D1 для достижения профиля обработанной поверхности с минимальной высотой выступов.

#### Определение микрогеометрии поверхности детали «Основание» датчика вибрации, обеспечивающей минимальное значение коэффициента поперечного преобразования

Так как решение поставленной в заголовке данного раздела задачи с помощью параметров оценки микрогеометрии поверхностей практически невыполнимо [13, 14], воспользуемся предложенной в этих источниках методикой решения задачи с помощью графических критериев.

На данном этапе нами определена микрогеометрия рабочей поверхности основания с точки зрения обеспечения минимального значения коэффициента поперечного преобразования вибродатчика. С этой целью изготовлено несколько образцов основания на токарном станке. Режимы обработки приведены в табл. 4.

Номер образца	Режимы резания		
	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Скорость резания, м/мин
1	0,03	0,1	140
2	0,015	0,1	140
3	0,008	0,1	140

Таблица 4. Режимы резания при изготовлении образцов точением на токарном станке

Первый образец изготовлен с использованием определенных ранее режимов резания по методу Тагути. С учетом того, что нами выявлен фактор, оказывающий наибольшее влияние на микрогеометрию поверхности – подача, именно она была выбрана как переменный фактор.

На изготовленных образцах измерены шероховатости поверхностей. После сборки датчиков вибрации определен их коэффициент поперечного преобразования. Измеренные величины составили 2,4; 2,2 и 1,6% для датчиков, смонтированных на основаниях 1, 2, 3 соответственно. Лучший результат имеет третий образец, поэтому графические критерии для него приняты как эталонные. В соответствии с этими критериями назначен допуск на возможные отклонения при контроле в серийном производстве (рис. 4).

Графические критерии образца с поверхностью, обработанной доводкой, а также критерии других поверхностей серийно выпускаемых деталей, не выходящие за пределы обозначенного допуска, обеспечивают микрогеометрию поверхностей, позволяющую достичь коэффициентов поперечного преобразования датчика вибрации, не выходящих за допустимые пределы.

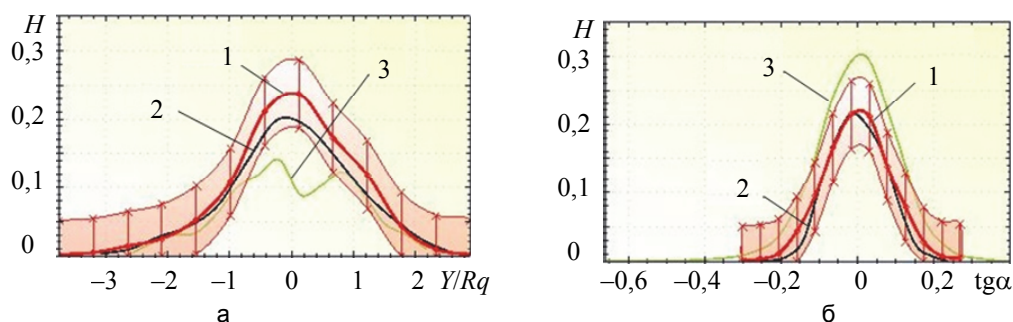


Рис. 4. Эталонные графики с допуском 10% на возможные отклонения: плотность распределения ординат профиля (а), плотность распределения тангенсов углов наклона профиля (б); 1 – лучший образец после токарной обработки, 2 – образец после доводочной операции, 3 – образец после фрезерной обработки

### Заключение

В результате проделанной работы была показана зависимость коэффициента преобразования датчика вибрации от микрогеометрии поверхностей одной из важнейших деталей – основания. Определен предпочтительный способ изготовления рабочих поверхностей детали датчика вибрации – точение. Выявлены наиболее значимые факторы процесса обработки, оказывающие наибольшее влияние на микрогеометрию поверхности. Определен оптимальный набор режимов механической обработки. Выявлена микрогеометрия поверхности основания, обеспечивающая требуемое значение коэффициента поперечного преобразования датчика вибрации. Показана целесообразность проведения нормирования и контроля микрогеометрии с помощью графических критериев оценки шероховатости поверхности, позволяющих достаточно полно описать требуемый микрорельеф.

### Литература

1. Rothemann L., Schretter H. Active vibration damping of the alpine ski // *Procedia Engineering*. 2010. V. 2. N 2. P. 2895–2900. doi: 10.1016/j.proeng.2010.04.084
2. Sharma A., Olszewski O.Z., Torres J., Mathewson A., Houlihan R. Fabrication, simulation and characterisation of MEMS piezoelectric vibration energy harvester for low frequency //

### References

1. Rothemann L., Schretter H. Active vibration damping of the alpine ski. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, no. 2, pp. 2895–2900. doi: 10.1016/j.proeng.2010.04.084
2. Sharma A., Olszewski O.Z., Torres J., Mathewson A., Houlihan R. Fabrication, simulation and characterisation of MEMS piezoelectric vibration energy harvester for low frequency.



- Procedia Engineering, 2015. V. 120. P. 645–650. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.695
3. Las V., Zencik R., Kroupa T., Bartosek J. Reconstruction of impact force on curved panel using piezoelectric sensors // *Procedia Engineering*, 2012. V. 42. P. 367–374. doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.527
  4. Voglhuber-Brunnmaier T., Jakoby B. Modeling of a piezoelectric fluid sensor excited by lateral fields using a spectral domain approach // *Procedia Engineering*, 2010. V. 5. P. 82–86. doi: 10.1016/j.proeng.2010.09.053
  5. Bau M., Ferrari M., Tonoli E., Ferrari V. Sensors and energy harvesters based on piezoelectric thick films // *Procedia Engineering*, 2011. V. 25. P. 737–744. doi: 10.1016/j.proeng.2011.12.182
  6. Olszewski O.Z., Houlihan R., O’Keeffe R., O’Neill M., Waldron F., Mathewson A., Jackson N. A MEMS silicon-based piezoelectric AC current sensor // *Procedia Engineering*, 2014. V. 87. P. 1457–1460. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.724
  7. Hazan A., Verleysen M., Cottrell M., Lacaille J. Trajectory clustering for vibration detection in aircraft engines // *Lecture Notes in Computer Science*, 2010. V. 6171. P. 362–375. doi: 10.1007/978-3-642-14400-4\_28
  8. Киселев Ю.В., Киселев Д.Ю., Тиц С.Н. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники. Самара: СГАУ, 2012. 207 с.
  9. Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2006. 572 с.
  10. Богущ М.В. Анализ и синтез пьезоэлектрических датчиков для вихревых расходомеров на основе пространственных электротермоупругих моделей: дис. ... док. тех. наук. Ростов-на-Дону, 2009. 266 с.
  11. Симчук А.А. Разработка пьезоэлектрических датчиков динамического давления с улучшенными метрологическими характеристиками и расширенной областью применения: дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2011. 109 с.
  12. Вускер В.Ю. Повышение чувствительности элементов датчиков вибрации и быстропеременного давления на основе совершенствования конструкций и пьезотехнологий: дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2009. 141 с.
  13. Валетов В.А. Проблемы оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей для обеспечения их конкретных функциональных свойств // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2015. Т. 58. № 4. С. 250–267.
  14. Филимонова Е.А. Разработка методики и программы автоматизированного контроля микрогеометрии поверхностей деталей приборов с помощью графических критериев и их использование в технологических исследованиях: автореф. ... канд. техн. наук. СПб., 2014. 24 с.
  15. Walter P.L. The history of the accelerometer 1920s-1996 – prologue and epilogue // *Sound and Vibration*, 2007. V. 41. N 1. P. 84–92.
  16. Богущ М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 3. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 2006. 346 с.
  17. Каталог инструмента ARNO. Сменные пластины. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.arnoru.ru/upload/media/Turning/INDEXABLE%20INSE-RTS.pdf](http://www.arnoru.ru/upload/media/Turning/INDEXABLE%20INSE-RTS.pdf), свободный. Яз. рус. (дата обращения 04.05.2016).
  18. Wu Y., Wu A., Taguchi G. Taguchi Methods for Robust Design. ASME INTL, 2000. 336 p.
  19. Jagtap K., Pawade R. Experimental investigation on the influence of cutting parameters on surface quality in SPDT of PMMA // *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 2014. V. 7. N 2. P. 53–58.
  20. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 120, pp. 645–650. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.695
  3. Las V., Zencik R., Kroupa T., Bartosek J. Reconstruction of impact force on curved panel using piezoelectric sensors. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 42, pp. 367–374. doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.527
  4. Voglhuber-Brunnmaier T., Jakoby B. Modeling of a piezoelectric fluid sensor excited by lateral fields using a spectral domain approach. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 5, pp. 82–86. doi: 10.1016/j.proeng.2010.09.053
  5. Bau M., Ferrari M., Tonoli E., Ferrari V. Sensors and energy harvesters based on piezoelectric thick films. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 25, pp. 737–744. doi: 10.1016/j.proeng.2011.12.182
  6. Olszewski O.Z., Houlihan R., O’Keeffe R., O’Neill M., Waldron F., Mathewson A., Jackson N. A MEMS silicon-based piezoelectric AC current sensor. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 87, pp. 1457–1460. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.724
  7. Hazan A., Verleysen M., Cottrell M., Lacaille J. Trajectory clustering for vibration detection in aircraft engines. *Lecture Notes in Computer Science*, 2010, vol. 6171, pp. 362–375. doi: 10.1007/978-3-642-14400-4\_28
  8. Kiselev Yu.V., Kiselev D.Yu., Tits S.N. *Vibration Diagnostics of Systems and Structures in Aeronautical Engineering*. Samara, SSAU Publ., 2012, 207 p. (In Russian)
  9. *Aviatsionnye Pribory i Izmeritel’no-Vychislitel’nye Kompleksy* [Aviation Devices and Measuring-Computing Systems]. Ufa, ASATU Publ., 2006, 572 p.
  10. Bogush M.V. *Analiz i Sintez P’ezoelektricheskikh Datchikov dlya Vikhrevykh Raskhodomerov na Osnove Prostranstvennykh Elektrotermouprugikh Modelei*. Dis. Dok. Tekh. Nauk [Analysis and Synthesis of Piezoelectric Sensors for Vortex Flowmeters based on the Spatial Electric Thermoelastic Models. Dis. Dr. Eng. Sci.]. Rostov-on-Don, 2009, 266 p.
  11. Simchuk A.A. *Razrabotka P’ezoelektricheskikh Datchikov Dinamicheskogo Davleniya s Uluchshennymi Metrologicheskimi Kharakteristikami i Rasshirennoi Oblast’yu Primeneniya*: Dis. Kand. Tekh. Nauk [Development of Piezoelectric Dynamic Pressure Sensors with Improved Metrological Characteristics and an Expanded Area of Application. Dis. Eng. Sci.]. Moscow, 2011, 109 p.
  12. Vusker V.Yu. *Povyshenie Chuvstvitel’nosti Elementov Datchikov Vibratsii i Bystroperemennogo Davleniya na Osnove Sovershenstvovaniya Konstruktsii i P’ezotekhnologii*: Dis. Kand. Tekh. Nauk [Increasing the Sensitivity of Elements of Vibration and Rapidly Pressure Sensors based on Perfection of Designs and Piezo Techniques. Dis. Eng. Sci.]. Moscow, 2009, 141 p.
  13. Valetov V.A. Problems of optimization of workpiece surface microgeometry to ensure specific functional properties. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 250–267.
  14. Filimonova E.A. *Development of Methodology and Software for Automated Control of Instruments Surface Microgeometry using Graphical Criteria and their Application in Technological Research*. Eng. Sci. Dis. Thesis. St. Petersburg, 2014, 24 p. (In Russian)
  15. Walter P.L. The history of the accelerometer 1920s-1996 – prologue and epilogue. *Sound and Vibration*, 2007, vol. 41, no. 1, pp. 84–92.
  16. Bogush M.V. *Piezoelectric Instrument Making. V. 3. Piezoelectric Sensors for Extreme Conditions*. Rostov-on-Don, SKNTs VSh, 2006, 346 p.
  17. *Indexable Inserts*. Available at: [www.arnoru.ru/upload/media/Turning/INDEXABLE%20INSE-RTS.pdf](http://www.arnoru.ru/upload/media/Turning/INDEXABLE%20INSE-RTS.pdf) (accessed 04.05.2016).
  18. Wu Y., Wu A., Taguchi G. *Taguchi Methods for Robust Design*. ASME INTL, 2000, 336 p.
  19. Jagtap K., Pawade R. Experimental investigation on the influence of cutting parameters on surface quality in SPDT of PMMA. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 53–58.

**Авторы**

**Андреев Юрий Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ysandreev@corp.ifmo.ru

**Демкович Наталия Александровна** – руководитель отдела, ООО «Би Питрон СП», Санкт-Петербург, 191014, Российская Федерация, dna@beepitvon.ru

**Исаев Расим Мирмагмудович** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, irm@corp.ifmo.ru

**Целищев Андрей Александрович** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, tselishchevandrey@yandex.ru

**Васильков Сергей Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sergey.vasilkov@corp.ifmo.ru

**Authors**

**Yuriy S. Andreev** – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ysandreev@corp.ifmo.ru

**Nataliia A. Demkovich** – Head of R&D Project Support Section, Bee Pitron SP, Ltd., Saint Petersburg, 191014, Russian Federation, dna@beepitvon.ru

**Rasim M. Isaev** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, irm@corp.ifmo.ru

**Andrey A. Tselishchev** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, tselishchevandrey@yandex.ru

**Sergey D. Vasilkov** – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sergey.vasilkov@corp.ifmo.ru