
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENT ENGINEERING AND RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 681.2.084
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-612-622

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ДОВОДКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СВЯЗАННЫМ АБРАЗИВОМ

С. А. ЮДИН^{1*}, Ю. С. АНДРЕЕВ¹, А. В. ОСТАШКОВ²

¹ *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,
YudinYudin7@gmail.com

² *Техприбор, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Пьезоэлектрические датчики вибрации являются одними из наиболее часто используемых датчиков для измерения механических колебаний. Рассмотрена технологическая операция доводки плоских параллельных поверхностей связанным абразивом. Представлены алгоритм и методика определения рациональных режимов технологической операции доводки связанным абразивом на основе метода планирования экспериментальных исследований Тагути и дисперсионного анализа. Описаны условия изготовления опытных образцов. Приведены промежуточные результаты экспериментальных исследований, продемонстрировавшие возможность исключить из технологического процесса операцию шлифования перед доводкой.

Ключевые слова: шероховатость, пьезоэлектрический датчик вибрации, допуск плоскостности, допуск параллельности, относительный коэффициент поперечного преобразования, доводка, метод Тагути, дисперсионный анализ, определение режимов доводки

Ссылка для цитирования: Юдин С. А., Андреев Ю. С., Осташков А. В. Методика определения рациональных режимов технологической операции доводки плоских поверхностей связанным абразивом // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 7. С. 612—622. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-612-622.

METHOD FOR DETERMINING THE RATIONAL MODES OF THE TECHNOLOGICAL OPERATION OF FINISHING FLAT SURFACES WITH A BONDED ABRASIVE

S. A. Yudin^{1*}, Yu. S. Andreev¹, A. V. Ostashkov²

¹ *ITMO University, St. Petersburg, Russia
YudinYudin7@gmail.com*

² *Tehpribor, St. Petersburg, Russia*

Abstract. Piezoelectric vibration sensors are among the most used sensors for measuring mechanical vibrations. The technological operation of finishing flat parallel surfaces with fixed abrasive is considered. An algorithm for determining rational modes of fine-tuning is presented, and the method based on planning experimental studies by Taguchi and dispersion analysis is described. The conditions for manufactory prototypes are described. Intermediate results of experimental studies are presented, the possibility to exclude the grinding operation from the technological process before finishing is demonstrated.

Keywords: roughness, piezoelectric vibration sensor, flatness tolerance, parallelism tolerance, relative coefficient of transverse transformation, finishing, Taguchi method, dispersion analysis, determination of finishing modes

For citation: Yudin S. A., Andreev Yu. S., Ostashkov A. V. Method for determining the rational modes of the technological operation of finishing flat surfaces with a bonded abrasive. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 7. P. 612—622 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-7-612-622.

Введение. Неотъемлемая часть многих технических систем и процессов — измерительные информационные системы вибрационного контроля, предназначенные для измерения параметров вибрации. Вибрация является одним из наиболее сложных колебательных процессов из-за наличия различных степеней свободы, а также широкого спектра колебаний, которые при этом могут быть неперiodическими.

Начальным звеном измерительной информационной системы вибрационного контроля являются датчики параметров вибрационных и ударных колебаний [1], расположенные непосредственно на контролируемом объекте и осуществляющие преобразование измеряемой механической величины в электрический сигнал, поступающий на регистрирующее устройство. Такие датчики работают при высоких температурах, сильных переменных полях, интенсивных вибрационных и ударных нагрузках, высоких давлениях и т. д. В связи с этим к датчикам вибрации предъявляются особые требования по точности, надежности и стабильности метрологических характеристик. Существует множество типов датчиков вибрации, но пьезоэлектрические датчики вибрации являются одними из наиболее часто используемых для измерения параметров механических колебаний [2, 3].

При разработке и изготовлении пьезоэлектрических датчиков вибрации, вследствие особенностей их устройства и конструкции, высокие требования предъявляются к шероховатости поверхности функциональных деталей, допускам формы и расположения, из чего следует необходимость выполнения таких трудоемких технологических операций, как шлифование, доводка и полирование [4]. При этом данные операции, как правило, следуют друг за другом, кратно увеличивая суммарную трудоемкость изготовления высокоточных деталей. Ранее в работах [5—8] были определены особенности изготовления деталей пьезоэлектрического датчика вибрации, а также влияния шероховатости поверхности сопрягаемых деталей на относительный коэффициент поперечного преобразования — характеристику датчика, которая позволяет оценить его метрологические свойства.

Шероховатость поверхности можно определить как совокупность ее неровностей, выделенных с помощью базовой длины. Проще говоря, шероховатость поверхности можно определить как следы, оставленные инструментом в результате обработки поверхности.

Нормирование параметров текстуры поверхности и методы их измерения важны для обеспечения заданных функциональных свойств поверхностей и качественной их обработки [9—15]. Вопросами влияния технологии изготовления деталей приборов и машин на их эксплуатационные характеристики, в том числе влияния шероховатости поверхности, занимались многие ученые: Ю. Г. Шнейдер, Э. В. Рыжов, В. А. Валетов, В. М. Мусалимов, К. Н. Войнов, И. В. Крагельский, Н. Б. Демкин, Я. А. Рудзит, Д. В. Васильков и др.

Технологическая операция доводки. Для изготовления сопрягаемых деталей, входящих в состав вибропреобразователя пьезоэлектрического датчика вибрации, используются следующие технологические операции: ленточно-отрезная, токарная, фрезерная, слесарная, промывка, шлифование, доводка, контроль. Из этого перечня стоит выделить операцию шлифования и следующую за ней доводку. Такая последовательность определена необходимостью подготовки поверхностей перед доводкой. После операции шлифования плоские параллельные поверхности должны иметь отклонение от плоскостности не более 0,01 мм и шероховатость поверхности не более Ra 0,8.

Рассмотрим технологическую операцию доводки. Известны два способа доводки плоских параллельных поверхностей — ручная [16] и машинная [17].

Для ручной доводки необходимо использовать абразивные доводочные пасты и производить круговые и восьмерчатые движения на стеклянной или чугунной доводочной плите. В качестве абразива могут быть использованы корунд, карбид кремния, кубический нитрид бора или искусственные алмазные зерна.

Машинная же доводка выполняется на специальном оборудовании — доводочных станках. Станки доводочной группы современных моделей предназначены для обработки поверхностей деталей с малым допусками формы и размеров, а также малыми параметрами шероховатости. Рассмотрим кинематику технологической операции доводки на плоскодоводочных станках (рис. 1). Заготовки деталей 1 устанавливаются в специальные кассеты-сепараторы 2, которые совершают планетарное движение вокруг своей оси и центральной оси станка. При этом применяется как попутное, так и встречное принудительное вращение притиров и шестерен. Сепараторы устанавливаются между двумя чугунными доводочными дисками 3, которые имеют плоские торцевые поверхности и вращаются в противоположных направлениях с регулируемой частотой вращения. Поскольку сепараторы на доводочном диске располагаются эксцентрично, при вращении дисков притираемые заготовки совершают сложные движения и сьем материала происходит с двух сторон одновременно, что, в свою очередь, повышает производительность процесса доводки и обеспечивает наилучший результат в случае необходимости получить малый допуск параллельности и плоскостности. При этом на качество поверхности влияют множество факторов, к которым следует отнести технологические режимы операции доводки, а также изначальное качество поверхности заготовки; технологические режимы операции доводки также влияют на производительность процесса доводки.

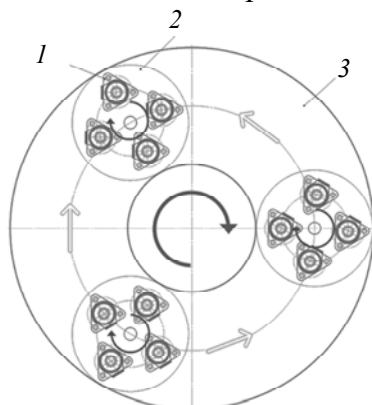


Рис. 1

К параметрам, характеризующим технологические режимы, следует отнести фракцию абразива, подаваемого в зону обработки или нанесенного на доводочный круг, давление, возникающее между заготовкой и доводочными кругами, скорость и направление вращения доводочных кругов, а также время выполнения операции. Так, например, чем больше размер абразивного зерна и одновременно с этим больше давление, тем больше будет глубина резания и грубее шероховатость поверхности.

Стоит также отметить, что для реализации стабильного управляемого процесса доводки необходимо обеспечить равномерный износ рабочей поверхности доводочного круга. Задача усложняется при выполнении доводочной операции поверхностей малой площади по отношению к площади притира, что приводит к образованию локального износа доводочных кругов и негативно сказывается на качестве обработанной поверхности.

Для проведения экспериментальных исследований по определению влияния технологических режимов на шероховатость поверхности использовался плоскодоводочный автомат двустороннего действия ПД2С-902М [18]. Производителем данного доводочного станка по регламенту предполагается обработка поверхности свободным абразивом, т. е. в процессе доводки в зону обработки оператором выполняется подмешивание абразива со смазочно-

охлаждающей жидкостью (СОЖ). С целью повышения степени автоматизации процесса была выполнена модификация станка, которая заключается в нанесении на ранее используемые доводочные круги абразива марки АСМ на латунной связке. Подвод смазочно-охлаждающей жидкости выполняется с помощью насоса.

При этом методика, представленная производителем станка, которая заключается в вычислении режимов с использованием коэффициентов удельного давления на доводимую поверхность и усредненной минутной производительности для сталей, закаленных более 50 HRC, твердых сплавов, керамики, рубина, графита, не позволяет определить рациональные режимы технологической операции доводки для обработки поверхностей деталей из жаропрочной коррозионно-стойкой стали аустенитного класса 12Х18Н10Т.

Алгоритм и методика. С целью определения влияния технологического режима на шероховатость поверхности был разработан алгоритм по определению рациональных режимов операции доводки плоских поверхностей связанным абразивом (рис. 2).

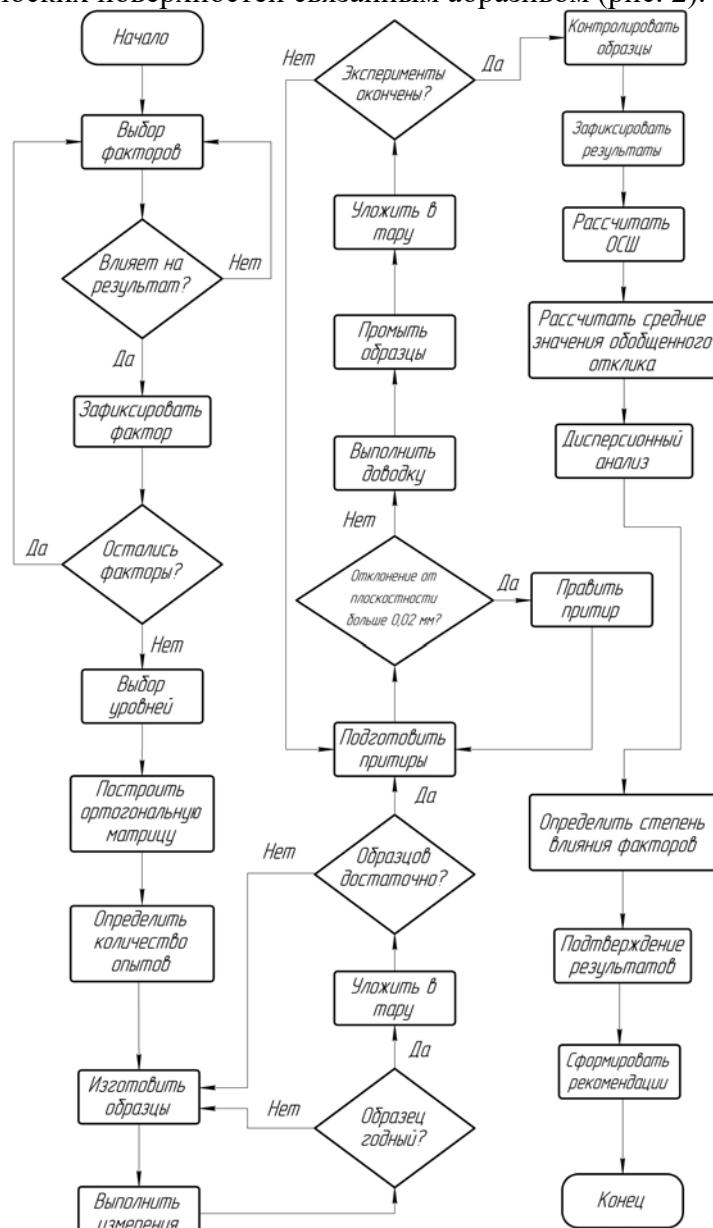


Рис. 2

Согласно представленному алгоритму, планирование экспериментального исследования, анализ полученных результатов и определение зависимостей между технологическими режимами доводки и получаемой шероховатостью поверхности предлагается выполнять по методу Тагути,

который является одним из инструментов по повышению качества производственных процессов, а также их оптимизации и сокращения времени и затрат. Метод Тагути основан на идее, что качество продукции зависит от множества факторов, которые могут быть контролируруемыми и неконтролируемыми [19, 20]. Цель метода Тагути — минимизировать влияние неконтролируемых факторов на качество продукции путем оптимизации контролируемых факторов.

Согласно методу Тагути, можно выделить статические и динамические задачи оптимизации, в которых, как правило, присутствует несколько управляющих факторов, определяющих желаемое значение выходной характеристики. Статической задачей является определение оптимальных уровней факторов, обеспечивающих заданные значения выходного параметра. Динамической оптимизационной задачей является управление выходными параметрами и их варьирование.

Статическую оптимизационную задачу можно описать с помощью схемы продукт/процесс (рис. 3). Показанные на схеме „шумы“ должны участвовать в процессе, но не должны влиять на „выходной параметр“. Согласно методу Тагути, при выполнении оптимизационных задач необходимо свести к минимуму колебания „выходного параметра“.

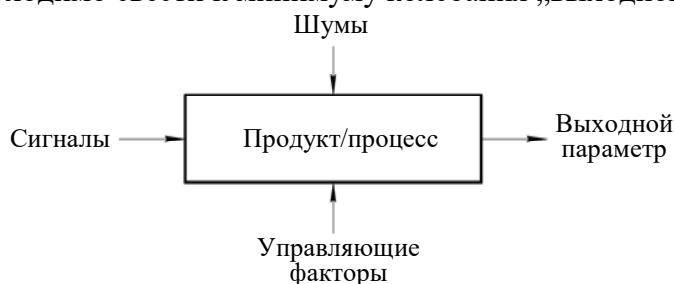


Рис. 3

Отношение сигнал/шум (ОСШ) является ключевым инструментом при инжиниринге качества производственных процессов. С помощью ОСШ можно определять факторы и степень их влияния на различные процессы, следовательно, установив факторы и варьируя их, можно улучшать качество производимого изделия, т. е. изделие будет реагировать на „сигналы“ и не будет реагировать на „шумы“. Таким образом, чем больше отклик, тем сильнее влияние „управляющего фактора“ на „выходной параметр“.

На основании представленного алгоритма была разработана методика определения технологических режимов операции доводки плоских поверхностей связанным абразивом, обеспечивающим заданные значения шероховатости поверхности, в конкретных производственных условиях. В основе методики лежит экспериментальное исследование влияния различных параметров технологических режимов доводки на получаемую шероховатость поверхности с использованием метода Тагути.

Предлагаемая методика содержит следующие этапы.

1-й этап. Определение комбинаций технологических режимов доводочной операции на модифицированном плоскоповодочном станке двустороннего действия связанным абразивом; используется метод Тагути — выбор влияющих на результат факторов и их уровней для последующего построения ортогональной матрицы.

Для выделения факторов рассмотрим режимы доводочной операции, на которые можно повлиять. К ним относятся: усилие прижима; длительность цикла обработки; количество циклов обработки; зернистость доводочного круга; скорость вращения доводочных кругов и сепаратора с заготовками; наличие или отсутствие СОЖ. Примем, что использование СОЖ предполагается в любом случае. Рассмотрим, на что влияют режимы обработки:

— на производительность процесса влияют: усилие прижима, зернистость доводочного круга и скорость вращения доводочных кругов и сепаратора;

— на качество получаемой поверхности влияют: усилие прижима, время обработки; скорость вращения доводочных кругов; зернистость доводочного круга.

Для проводимых исследований наибольшую значимость имеет качество получаемой поверхности, поэтому определим следующие четыре фактора: A — усилие прижима, B — время обработки, C — скорость вращения доводочных кругов, D — зернистость абразивного круга. Для указанных факторов были заданы три уровня: 1 — минимальное значение фактора, 2 — среднее, 3 — максимальное допустимое (табл. 1).

Таблица 1

Фактор		Уровень		
		1	2	3
A	Усилие, Н	285	440	685
B	Время, мин	10	25	40
C	Скорость, об/мин	16	32	48
D	Зернистость, мкм	7/5	60/40	125/100

2-й этап. Построение ортогональной матрицы L_9 (4 фактора + 3 уровня), которая позволяет определить необходимое и достаточное количество экспериментальных исследований и требуемое количество экспериментальных образцов деталей (табл. 2). Необходимое количество экспериментов равно 9, а минимальное количество образцов — 36 вследствие особенностей конструкции плоскодоводочного автомата двустороннего действия.

Таблица 2

Номер эксперимента	Значения уровней факторов			
	A , об/мин	B , Н	C , мин	D , мкм
1	16	140	10	7/5
2	16	295	25	60/40
3	16	430	40	80/63
4	32	140	25	80/63
5	32	295	40	7/5
6	32	430	10	60/40
7	48	140	40	60/40
8	48	295	10	80/63
9	48	430	25	7/5

3-й этап. Изготовление и оценка качества поверхностей опытных образцов из соответствующей марки материала. Вследствие технологических особенностей процесса абразивной доводки плоских поверхностей и малого съема материала при обработке (глубина резания равна размеру абразивного зерна) для достижения рациональной производительности необходимо обеспечить шероховатость обрабатываемых поверхностей не менее $Ra\ 0,8$ и отклонение от плоскостности и параллельности не более 0,02 и 0,05 мм соответственно.

Геометрическую точность изготовленных образцов следует определять с помощью поверенного измерительного оборудования: для измерения шероховатости поверхности используется профилометр или профилограф-профилометр, для измерения отклонения от плоскостности и параллельности — координатно-измерительная машина.

4-й этап. Подготовка технологического оснащения, которая заключается в измерении степени износа доводочных кругов. Для контроля степени истирания абразивного слоя следует с помощью штангенциркуля ШЦ-125-0,1-1 (ГОСТ 166–89) измерить его толщину перед обработкой каждой новой партии деталей. Для измерения отклонения от плоскостности используются ледяная линейка ЛД-0 – 320 (ГОСТ 8026–92) и набор щупов № 1 (ТУ 2-034-225-87); отклонение от плоскостности не должно превышать 0,02 мм. В случае несоответствия доводочного круга этому значению выполняется правка круга по плоскости на плоскошлифовальном автомате или полуавтомате до получения заданного значения отклонения от плоскостности. Правка доводочных кругов выполняется шлифовальными кругами из кубического нитрида бора.

После определения соответствия отклонению от плоскостности (не более 0,02 мм) выполняется установка доводочных кругов на плоскодоводочный станок (с последующей

протижкой их поверхностей бязью насухо). Затем выполняется установка двух сепараторов с равномерным распределением по площади доводочного круга, и экспериментальные образцы помещаются в гнезда сепаратора по две штуки в каждый в равноудаленном положении.

5-й этап. Установка технологических режимов доводки согласно ортогональной матрице и номеру экспериментального исследования и выполнение операции доводки связанным абразивом с подачей СОЖ.

После окончания доводки плоских поверхностей опытных образцов с заданными технологическими режимами выполняется очистка и обезжиривание образцов от СОЖ в ваннах ультразвуковой промывки или путем протирания спирто-нефрасовой смесью. При этом хранение и перемещение опытных образцов выполняется в пронумерованных zip-lock пакетах и картонной таре. Порядковый номер образца соотносится с номером экспериментального исследования и заносится в протокол измерений.

6-й этап. Измерение параметров, характеризующих геометрическую точность образцов после выполнения доводочной операции. Для измерений повторно используются профилограф-профилометр и координатно-измерительная машина. Измерения выполняются при одинаковых условиях и настройках оборудования. При измерении шероховатости поверхности определяются амплитудные и шаговые параметры шероховатости, формируются профилограммы контролируемой поверхности с присвоением номера, а также выполняются графические изображения плотностей распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля [9—12, 14]. Для последующей оценки стационарности необходимо выполнить измерение шероховатости на трех различных участках контролируемой поверхности.

7-й этап. Анализ параметров, характеризующих геометрическую точность образцов, и определение закономерностей, а также степени влияния каждого режима на конкретную характеристику шероховатости поверхности с помощью метода Тагути.

1. Выполняется расчет отношения сигнал/шум с последующим занесением в протокол измерений согласно формуле

$$\eta = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right),$$

где η — обобщенные отклики ОСШ; Y_i — параметр i -го эксперимента; n — количество экспериментов.

2. Выполняется расчет средних значений обобщенного отклика для различных уровней факторов с последующим занесением в протокол согласно формулам

$$\eta_{Kj} = m_{Kj} - m; \quad m_{Kj} = \frac{1}{n_{Kj}} \sum_{i=1}^{n_{Kj}} \eta_i; \quad m = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \eta_i,$$

где η_{Kj} — ОСШ для j -го уровня некоторого фактора K ; m_{Kj} — среднее значение ОСШ для j -го уровня фактора K ; m — общее среднее значение ОСШ для экспериментальной области; n_{Kj} — число опытов для j -го уровня фактора K ; η_i — ОСШ для i -го опыта.

3. Выполняется дисперсионный анализ (критерий Фишера, ANOVA), результаты которого заносятся в протокол согласно формуле

$$F = \frac{D_{\phi}}{D_{\text{ост}}},$$

где D_{ϕ} — факторная дисперсия, $D_{\text{ост}}$ — остаточная дисперсия.

4. Определяются приоритеты факторов с наибольшей степенью влияния на значения шероховатости с последующим занесением в протокол.

8-й этап. Измерение отклонения от плоскостности и параллельности обработанных методом доводки плоских параллельных поверхностей деталей пьезоэлектрического датчика вибрации с использованием поверенной координатно-измерительной машины. Измерения

проводятся в 10 точках (не менее). Результаты измерений заносятся в соответствующий протокол с указанием номера экспериментального образца.

9-й этап. Формирование рекомендаций по выбору технологических режимов операции доводки для исследуемого материала поверхности, обеспечивающих требуемые значения шероховатости, которые регламентируются профильными параметрическими и графическими критериями оценки с использованием метода анализа иерархий.

Изготовление опытных образцов. Согласно разработанной методике были изготовлены опытные образцы — 44 штуки, представляющие собой шайбы из стали марки 12X18H10T (рис. 4).

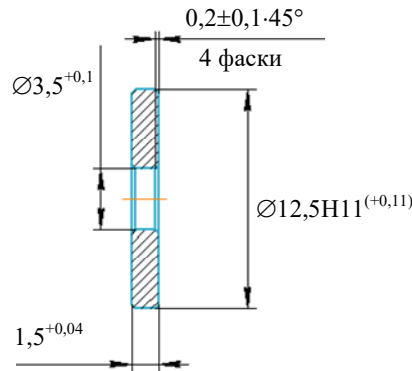


Рис. 4

Заготовка для изготовления для опытных образцов длиной 500 мм была отрезана от горячекатаного круга диаметром 14 мм из нержавеющей стали 12X18H10T (ГОСТ 5632–72), выполненного согласно ГОСТ 2590–88 на ленточно-отрезном станке ARG-240 ленточным полотном M42 (ECO EM4227096104200) с применением СОЖ. Далее было выполнено точение образцов на токарном обрабатывающем центре с ЧПУ HAAS SL-10 за два установка длительностью в 240 и 30 с соответственно. Обработка образцов выполнялась с применением СОЖ проходным резцом с твердосплавной пластиной DCGT11T302 с ромбом 55° и радиусом скругления кромки 0,2 мм при режимах резания $f=0,05$ мм/об, $V=60$ м/мин, $t=0,15$ мм. После была выполнена очистка образцов с помощью ультразвукового обезжиривания в линии стационарных ванн „FinnSonic Versa 120 +“ в растворе составом „Деталан Ф-10“ 0,5 л на 10 л воды и „Биолюкс ПС“ 0,1 л на 10 л воды при температуре воды от 50 до 60 °С в течение 15 мин.

После изготовления образцов были выполнены предварительные измерения отклонения от плоскостности и параллельности с помощью поверенной координатно-измерительной машины DEA Global Performance щупом Renishaw диаметром 5 мм и длиной 50 мм в интервале от 9 до 13 точек при нулевом положении щупа. На рис. 5 представлена схема анализа расположения точек при измерении: *a* — поверхность 1, *б* — поверхность 2.

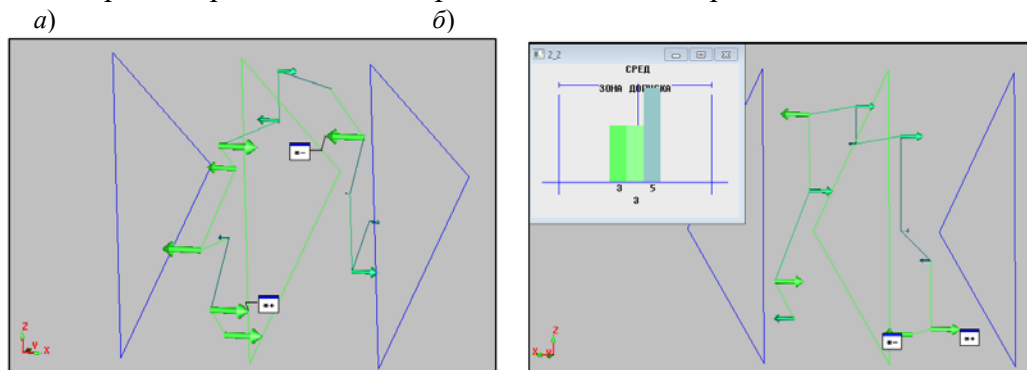


Рис. 5

Согласно протоколу измерений отклонения от плоскостности и параллельности, опытный образец, изготовленный методом точения, соответствует начальным требованиям к технологической операции доводки по этим параметрам.

Далее было выполнено измерение шероховатости поверхности с использованием профилографа-профилометра Hommel Tester T8000. Базовая длина была определена равной 1,5 мм. Управление профилографом-профилометром, анализ измерений шероховатости, а также формирование протокола измерений выполнялись помощью программного обеспечения Turbo Wave. Измерение шероховатости выполнялось с обеих сторон образца. На рис. 6 (скриншот) представлены результаты измерений параметров шероховатости поверхности образца 44, приведена профилограмма измеряемой поверхности, а также основные параметры, характеризующие микрогеометрию контролируемого фрагмента поверхности. В табл. 3 представлен фрагмент протокола измерений для одной из поверхностей для всех 44 контролируемых образцов.

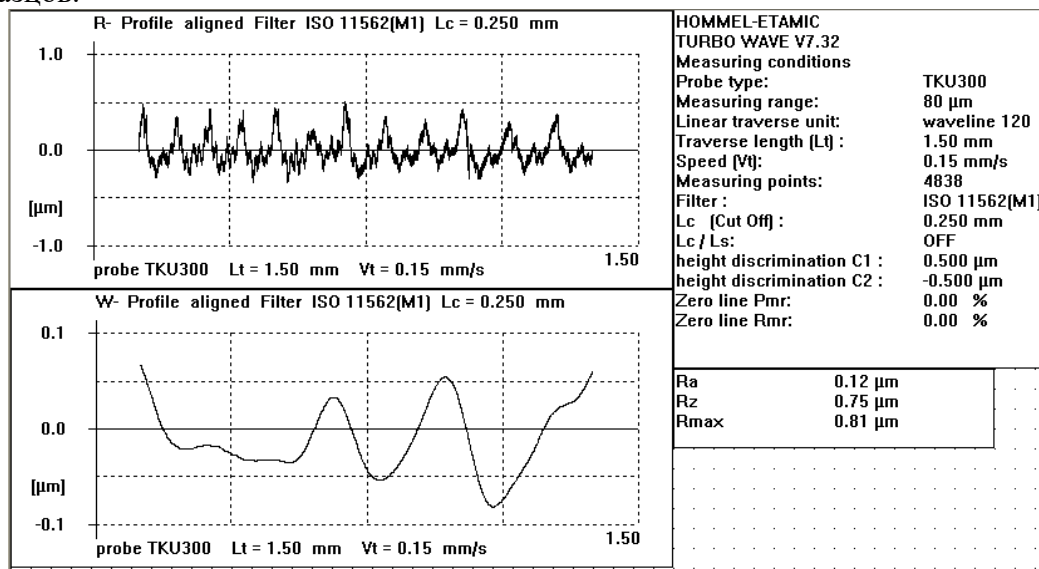


Рис. 6

Таблица 3

Номер образца	Ra	Rz	R _{max}	Номер протокола
1	0,12	0,75	0,81	1
2	0,11	0,60	0,69	2
3	0,15	0,76	0,84	3
...	—	—	—	—
43	0,13	0,75	0,89	43
44	0,11	0,75	0,78	44

Анализ полученных результатов измерений показывает, что выполненные методом точения опытные образцы подходят, согласно начальным требованиям к качеству поверхности, для выполнения операции доводки, что соответствует шероховатости поверхности не более Ra 0,8.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование токарного станка с числовым программным управлением позволяет исключить из технологического процесса операцию шлифования.

Заключение. Предложены алгоритм и методика, предназначенные для определения рациональных режимов технологической операции доводки, а также определения влияния различных значений давления, времени обработки, скорости вращения и зернистости притиров на производительность процесса доводки, на получаемую шероховатость поверхности и отклонения от плоскостности и параллельности для выявления зависимостей между ними. Представленная методика применима к определению рациональных режимов операции доводки для всего оборудования схожей конфигурации и для всех марок материалов.

Перспективные исследования заключаются в проведении работ по определению зависимости между технологическими режимами доводки и получаемым качеством поверхности с использованием разработанной методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев Ю. В., Киселев Д. Ю., Тиц С. Н. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники. Самара: СГАУ, 2012. 207 с.
2. Шаратов В. М., Мусиенко М. П., Шаратова Е. В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
3. Янчин В. В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения: Учеб. пособие. Ростов н/Д: ЮФУ, 2008. 77 с.
4. Юдин С. А., Ашарчук А. В. Технологические особенности серийного производства вибропреобразователей датчиков вибрации // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2021. Т. 2. С. 249—252.
5. Исаев Р. М. Влияние качества поверхностей функциональных деталей пьезоэлектрических датчиков вибрации на их эксплуатационные характеристики: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2017 [Электронный ресурс]: http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=86&number_file=E023BAE9C97B17E23B203506C0E74B33.
6. 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(106). С. 1103—1110.
7. Andreev Y. S., Demkovich N. A., Isaev R. M., Tselishev A. A., Vasilkov S. D. Effect of method for treatment of the functional surface of a piezoelectric vibration sensor on its sensitivity // Procedia Engineering. Elsevier. 2017. Vol. 176. P. 96—106.
8. Юдин С. А., Исаев Р. М. Технологические особенности обработки поверхностей деталей пьезоэлектрического датчика вибрации // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 66—73.
9. Валетов В. А., Юльметова О. Ю. Микрогеометрия поверхности и ее функциональные свойства // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 48. С. 140—142.
10. Валетов В. А. О практической пригодности некоторых критериев для оценки шероховатости поверхности // Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении: Сб. Л.: ЛКИ, 1978. С. 62—65.
11. Валетов В. А., Андреев Ю. С., Цимбал И. Р. Исследование микрогеометрии трущихся поверхностей // Трибология и надежность: Сб. науч. тр. X Междунар. конф. СПб, 2010. № 10. С. 85—92.
12. Валетов В. А., Филимонова Е. А. Применение непараметрических критериев для оценки микрогеометрии при импульсном фрезеровании // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 52—54.
13. Медунецкий В. М., Васильков С. Д. Методы оценивания микрогеометрии поверхностей деталей изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 231—236.
14. Гибадуллин И. Н., Валетов В. А. Изображение профиля поверхности как графический критерий оценки шероховатости // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 1. С. 86—92.
15. Юльметова О. С. Разработка технологических методов управления функциональными характеристиками узлов гиросприборов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011.
16. Косилова А. Г., Мещеряков Р. П. Справочник технолога-машиностроителя. М.: Машиностроение, 1986. Т. 1. 656 с.
17. Гашев Е. А. Повышение эффективности доводки и полирования пластин интегральной оптики: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2018.
18. 72047.919.00.000 РЭ Руководство по эксплуатации полуавтомата доводочного двухдискового ПД2С-902М. Саратов, 2007.
19. Корнева М. И. Проведение экспериментов по методу Тагути для определения условий протягивания шестигранной латунной гайки // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2011. № 6—2.

20. Das P., Samanta S. K., Das R., Dutta P. Optimization of degree of sphericity of primary phase during cooling slope casting of A356 Al alloy: Taguchi method and regression analysis // Measurement. Elsevier. 2014. Vol. 55. P. 605—615.

Сведения об авторах

- Семен Алексеевич Юдин** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: YudinYudin7@gmail.com
- Юрий Сергеевич Андреев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: ysandreev@itmo.ru
- Александр Вячеславович Осташков** — ПАО „Техприбор“, служба главного технолога; инженер-технолог; E-mail: aleksandrost98@gmail.com

Поступила в редакцию 20.03.2023; одобрена после рецензирования 30.03.2023; принята к публикации 31.05.2023.

REFERENCES

1. Kiselev Yu.V., Kiselev D.Yu., Tits S.N. *Vibratsionnaya diagnostika sistem i konstruksiy aviatsionnoy tekhniki* (Vibration Diagnostics of Systems and Structures of Aviation Equipment), Samara, 2012, 207 p. (in Russ.)
2. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *P'yezoelektricheskiye datchiki* (Piezoelectric Sensors), Moscow, 2006, 632 p. (in Russ.)
3. Yanchin V.V. *P'yezoelektricheskiye datchiki vibratsionnogo i udarnogo uskoreniya* (Piezoelectric Vibration and Shock Acceleration Sensors), Rostov-on-Don, 2008, 77 p. (in Russ.)
4. Yudin S.A., Asharchuk A.V. *Almanac of Scientific Works of Young Scientists at ITMO University*, 2021, vol. 2, pp. 249–252. (in Russ.)
5. Isaev R.M. *Vliyaniye kachestva poverkhnostey funktsional'nykh detaley p'yezoelektricheskikh datchikov vibratsii na ikh ekspluatatsionnyye kharakteristiki* (Influence of Surface Quality of Functional Parts of Piezoelectric Vibration Sensors on Their Operational Characteristics), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2017, http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=86&number_file=E023BAE9C97B17E23B203506C0E74B33. (in Russ.)
6. Andreev Yu.S., Demkovich N.A., Isaev R.M., Tselishchev A.A., Vasilkov S.D. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, no. 6(16), pp. 1103–1110. (in Russ.)
7. Andreev Y.S., Demkovich N.A., Isaev R.M., Tselischev A.A., Vasilkov S.D. *Procedia Engineering*, Elsevier, 2017, vol. 176, pp. 96–106.
8. Yudin S.A., Isaev R.M. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, vol. 66 no. 1, pp. 66–73. (in Russ.)
9. Valetov V.A., Yulmetova O.Yu. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2008, no. 48, pp. 140–142. (in Russ.)
10. Valetov V.A. *Technology of hull building, ship engineering and welding in shipbuilding*, 1978, pp. 62–65. (in Russ.)
11. Valetov V.A., Andreev Yu.S., Tsimbal I.R. *Tribology and reliability*, St. Petersburg, 2010, pp. 85–92. (in Russ.)
12. Valetov V.A., Filimonova E.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, vol. 57, no. 8, pp. 52–54. (in Russ.)
13. Medunetsky V.M., Vasilkov S.D. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 231–236. (in Russ.)
14. Gibadullin I.N., Valetov V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 86–92. (in Russ.)
15. Yulmetova O.S. *Razrabotka tekhnologicheskikh metodov upravleniya funktsional'nymi kharakteristikami uzlov giropriborov* (Development of Technological Methods for Controlling the Functional Characteristics of Gyro Devices), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2011, 120 p. (in Russ.)
16. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.P. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* (Handbook of a Mechanical Engineering Technologist), vol. 1, Moscow, 1986, 656 p. (in Russ.)
17. Gashev E.A. *Povysheniye effektivnosti dovodki i polirovaniya plastin integral'noy optiki* (Increasing the Efficiency of Finishing and Polishing Integrated Optics Wafers), Candidate's thesis, Rybinsk, 2018. (in Russ.)
18. 72047.919.00.000 RE «Rukovodstvo po ekspluatatsii poluavtomata dovodchnogo dvukhdiskovogo PD2S-902M» (72047.919.00.000 RE "Operation manual for semi-automatic finishing double-disk PD2S-902M"), Saratov, 2007. (in Russ.)
19. Korneva M.I. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2011, no. 6-2. (in Russ.)
20. Das P., Samanta S.K., Das R., Dutta P. *Measurement*, Elsevier, 2014, vol. 55, pp. 605–615.

Data on authors

- Semyon A. Yudin** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: YudinYudin7@gmail.com
- Yuriy S. Andreev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: ysandreev@itmo.ru
- Alexander V. Ostashkov** — PJSC Tehpribor, Chief Service; Engineer-Technologist; E-mail: aleksandrost98@gmail.com

Received 20.03.2023; approved after reviewing 30.03.2023; accepted for publication 31.05.2023.