

УДК 621.923

РАСТРОВЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2011 В.Н. Анциферов, А.М. Ханов, К.Р. Муратов, Р.А. Муратов, А.В. Пепелышев

Пермский государственный технический университет

Поступила в редакцию 04.02.2011

Рассмотрен растровый метод финишной абразивной обработки поверхностей. Представлены теоретические основы и закономерности растрового метода обработки. Предложен способ абразивной обработки, разработано и изготовлено оборудование для финишной абразивной обработки прецизионных плоских и цилиндрических поверхностей. Проведено экспериментальное опробование процесса обработки на станках с растровой кинематикой рабочего движения инструмента.

Ключевые слова: *растровая траектория, растровый метод обработки, плоскоповодочные и хонинговальные станки с растровой кинематикой, точность геометрической формы, шероховатость поверхности*

Одним из направлений повышения эффективности абразивной обработки является усложнение траектории относительного движения инструмента и детали. Установлено, что сложное рабочее движение способствует повышению качества и производительности обработки, так как создает благоприятные условия для более полного использования режущей способности и равномерного износа инструмента. В связи с этим представляет интерес растровый способ абразивной обработки, получивший широкое применение при доводке прецизионных плоскостей [1].

Основу растрового метода финишной обработки составляет особый вид рабочего движения инструмента, имеющего усложненную траекторию с тонко регулируемыми параметрами. Термин «растр» использован здесь по аналогии с названием сложных сеток в электрооптических устройствах. Растровая траектория образуется в результате ортогональной комбинации двух синусоидальных колебаний с различными частотами ω_1 , ω_2 и амплитудами A , B . Параметрические уравнения траектории определяют декартовы координаты x , y в функциях времени t :

$$x = A \sin \omega_1 t, \quad y = B \sin (\omega_2 t + \varphi_0)$$

где φ_0 – начальный сдвиг фаз.

Движущаяся точка описывает сложную результирующую траекторию, распределенную по площади прямоугольника $x=\pm A$, $y=\pm B$ (рис. 1). Наиболее простые из таких траекторий известны как фигуры Лиссажу. Конфигурация кривой зависит от отношения частот. Когда это отношение – целое число или равно отношению малых целых чисел, то фигура имеет довольно простой вид, в противном случае рисунок кривой чрезвычайно сложен.

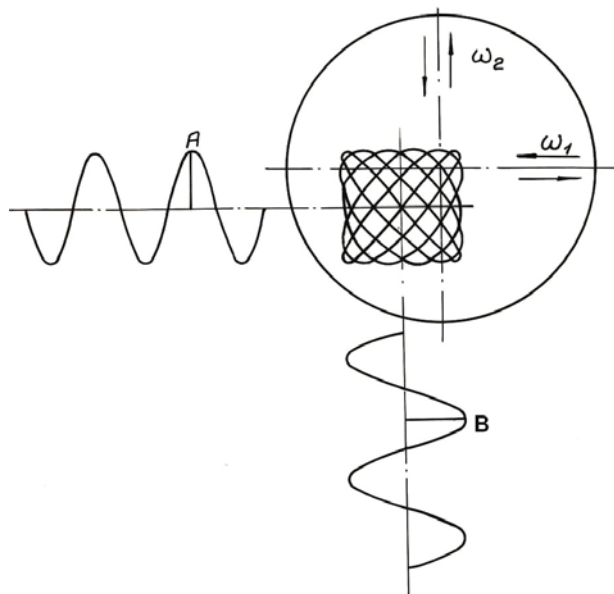


Рис. 1. Растровая траектория рабочего движения

Анциферов Владимир Никитович, академик РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Порошковое материаловедение». E-mail: unpl_mtf@pstu.ru

Ханов Алмаз Муллаянович, доктор технических наук, профессор, декан механико-технологического факультета

Муратов Карим Равилович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование машин и сопротивление материалов»

Муратов Равиль Арифович, заведующий лабораторией
Пепелышев Александр Владимирович, ассистент кафедры «Конструирование машин и сопротивление материалов»

Анализ общих для растровых траекторий закономерностей показал, что любая из них представляет собой совокупность последовательных кадров, в каждом из которых конфигурация кривой проходит определенный цикл превращений. За время образования кадра при любом соотношении частот движущая точка дважды изменяет направления движения. Это свойство растровых траекторий позволяет максимально использовать режущую способность инструмента. Важное для практики свойство кадра состоит в том, что все его параметры определяются непосредственно через ω_1 и ω_2 независимо от того, соизмеримы частоты или нет. Разность частот складываемых колебаний $\omega_2 - \omega_1$ соответствует частоте смены кадров, сумма $\omega_2 + \omega_1$ характеризует частоту строк в кадре.

Формообразующие микрорельеф параметры – плотность и угол сетки – определяются соотношением частот и амплитуд складываемых колебаний и, следовательно, ими можно управлять путем изменения этих соотношений. Возможность тонкого регулирования в широких пределах параметров растровых траекторий служит предпосылкой для эффективного использования их в качестве рабочего движения инструмента при финишной абразивной обработке. Удачной утилитарной особенностью этого движения является возможность его воспроизведения. С помощью простых и надёжных механизмов, которые позволяют осуществлять управление основными параметрами траектории – плотностью и углом сетки, и тем самым воздействовать на

формирование микрорельефа обрабатываемой поверхности. В этом состоит существенное преимущество растровой абразивной обработки по сравнению с обработкой инструментом с вращательным движением, при котором траекторные параметры регулируются незначительно.

На основе анализа растрового движения предложен способ абразивной обработки и разработаны станки для его осуществления. Станки предназначены для обработки поверхностей, имеющих постоянную кривизну в главных нормальных сечениях, таких как плоскость, сфера, цилиндр, наиболее часто используемых в качестве рабочих поверхностей машиностроительных деталей. В число этих станков входят плоскододовочные станки для одно и двухсторонней обработки, сферододовочные станки для выпуклых и вогнутых сфер большого радиуса, хонинговальные станки для цилиндрических поверхностей. Степень разработки перечисленного оборудования различна: от схемного решения до опытных образцов индивидуального изготовления и промышленных образцов. Новизна всех этих разработок удостоверяется рядом авторских свидетельств и патентов на изобретения и промышленные образцы. К настоящему времени разработаны плоскододовочные станки серии «Растр» для обработки разнообразных машиностроительных деталей. Основные технические сведения о гамме однодисковых станков из этой серии представлены в таблице.

Таблица. Однодисковые плоскододовочные станки серии «Растр»

Модель станка	Диаметр диска, мм.	Размеры растра, мм	Частота колебаний, 1/мин.	Размеры обработки, мм.
Растр 220*	220	12 x 14	360	5 - 230
Растр 350*	350	20 x 20	240	10 – 360
Растр 550**	550	40 x 40	170	20 – 580
Растр 750**	750	60 x 60	120	40 – 800

Примечание: * - полная конструкторская документация и дизайнерская проработка промышленного образца, натурные образцы станков; ** - схемная и эскизная проработка конструкции станка

Базовой моделью гаммы является станок Растр 350. От традиционных плоскододовочных станков с вращающимся притиром станки с растровой кинематикой отличаются следующими признаками:

1. Притир станка движется поступательно, что создает равенство скоростей и путей трения на всех участках его рабочей поверхности. При равномерном распределении обрабатываемых деталей это обеспечивает равномерный

износ притира и высокую точность формы доведенных поверхностей. Кроме того, это даёт возможность обрабатывать на станке как мелкие, так и крупные детали, соизмеримые с диаметром притира.

2. Каждая точка притира движется по определенной в контуре прямоугольника траектории, имеющей вид сетки сложной конфигурации, причём образующие её линии не повторяются. Благодаря такой траектории движения

каждого режущего зерна интенсифицируется процесс доводки и эффективно снижается шероховатость обработанной поверхности.

3. Механизмы станка позволяют тонко регулировать параметры траектории в процессе доводки. Это даёт возможность управлять формированием микрорельефа и получать поверхность с требуемой микрогеометрической структурой для конкретных эксплуатационных свойств.

Станок Растр 350 (рис. 2) построен по модульному принципу и состоит из пяти отдельных узлов, объединенных в эргономическую композицию. В результате сложения взаимно перпендикулярных колебаний с различными частотами станок воспроизводит распределенные траектории с регулируемой плотностью сетки и изменяемыми размерами кадра (рис. 3). В качестве инструмента на станке используются быстросменные доводочные диски из перлитного чугуна, оптического стекла, алмазосодержащего проката, релитового композита и др. Точность формы рабочей поверхности дисков достигается на станке путём их взаимной правки.



Рис. 2. Общий вид станка Растр 350

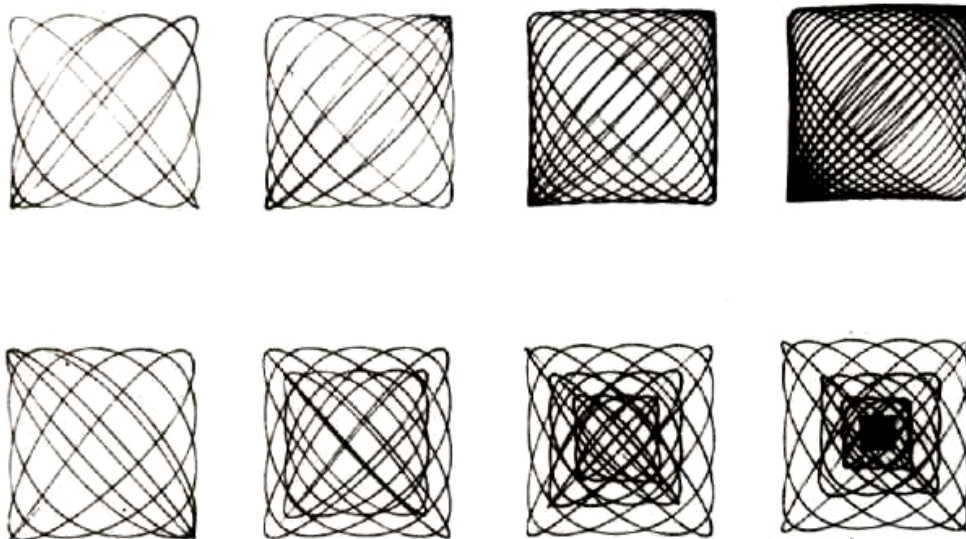


Рис. 3. Траектории притира станка Растр 350

По наибольшему размеру обработки — 360 мм Растр 350 эквивалентен однодисковому станку с вращающимся притиром диаметром 1120 мм, имеющем массу 5400 кг, в то время как масса данного станка 450 кг. Такое соотношение масс объясняется тем, что у вращающегося притира может использоваться только 1/3 его диаметра, а у притира с растровым движением — вся его поверхность. Остальные станки гаммы имеют свои конструктивные особенности и технологические возможности. По художественно-конструкторскому решению

Растр 220 (рис. 4) представляет собой станок настольного исполнения и состоит из трех узлов. Блок привода, содержащий механизмы, преобразующие вращение в сложное колебательное движение притира и управляющие его траекторией. Нажимное устройство для прижима деталей к притиру с регулируемым усилием и дополнительного перемещения их за счет сил абразивного трения. Пульт управления, который обеспечивает полуавтоматический цикл обработки по заданному времени. Являясь универсальным станком общего

назначения, он позволяет механизировать ряд доводочных операций, выполнение которых на существующих станках затруднено или невозможно. Так, на одной из его модификаций можно исправлять погрешности расположения обрабатываемых поверхностей: неперпендикулярность, непараллельность, торцевое биение.



Рис. 4. Общий вид плоскодоводочного станка Растр 220

Принципиальное отличие процесса хонингования с растровой кинематикой от традиционного и вибрационных методов заключается в том, что главное движение или движение резания есть результат комбинации двух синусоидальных колебаний с различными частотами и амплитудами во взаимно перпендикулярных направлениях – круговых 1 и осевых 2 (рис. 5). Для равномерного распределения образующей сетки по всей обрабатываемой поверхности инструменту дополнительно сообщаются возвратно-поступательное и вращательное движения с малыми скоростями, которые представляют собой соответственно осевую S_{oc} и круговую $S_{кр}$ подачи. Таким образом, при растровом хонинговании траектория 4 рабочего движения инструмента образуется в результате комбинации четырех движений и представляет собой растровую траекторию 3 растянутую в направлении винтовой линии 5. На рис. 5 представлена траектория движения режущего зерна при растровом хонинговании развернутая на плоскости. Дополнительные движения – осевая (S_{oc}) и круговая ($S_{кр}$) подачи влияют на размеры кадра результирующей траектории 4, плотность сетки и определяют направление ее формирования. При этом важные для практики свойства растровой траектории рассмотренные выше полностью сохраняются.

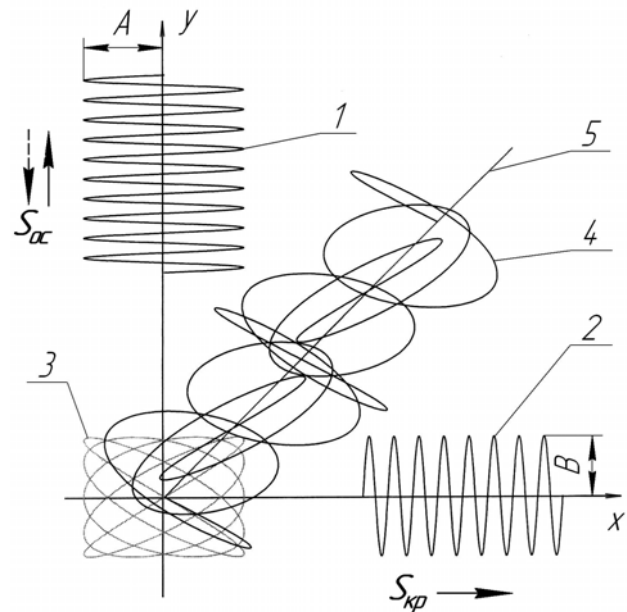


Рис. 5. Траектория рабочего движения и её составляющие при растровом хонинговании

Для реализации растрового метода абразивной обработки цилиндрических поверхностей разработаны опытные образцы хонинговальных станков РХ 70 и Растр Ц20, отличающиеся по конструкции и размерам обрабатываемых деталей. По компоновке станки выполнены с вертикальным расположением шпинделя, весь комплекс движений сообщается инструменту. Хонинговальный станок РХ 70 предназначен для обработки цилиндрических поверхностей диаметром до 70 мм и длиной до 250 мм. Привод хонинговального станка содержит отдельные кинематические цепи круговых и осевых колебаний инструмента и кинематические цепи круговых и осевых подач. Положительным свойством данного хонинговального станка является возможность независимого регулирования параметров колебательных движений и движений подач. Хонинговальный станок Растр Ц20 (рис. 6) предназначен для обработки точных цилиндрических поверхностей диаметром до 20 мм и длиной до 150 мм. Станок [2] реализует два метода хонингования – традиционный с осевой осцилляцией и растровый. Первый метод целесообразно использовать для предварительной обработки, так как при данном методе можно обеспечить более высокую скорость резания. Растровый метод хонингования, который отличается сложной и абсолютно неповторяющейся траекторией рабочего движения с возможностью тонкой регулировкой ее параметром целесообразно применять при окончательной обработке. Хонингование осуществляется с активным контролем размера обрабатываемого отверстия в автоматическом цикле. Станок

опробован при обработке прецизионных отверстий в деталях топливной аппаратуры. Точность геометрической формы достигается в пределах 0,5-1 мкм, шероховатость по параметру R_a до 0,01 мкм. Рассмотренные станки выбраны как примеры реализации растрового метода абразивной обработки точных поверхностей постоянной кривизны. Сравнительные эксперименты, проведенные на станках показали явное преимущество хонингования с растровой траекторией: при меньшей шероховатости обработанной поверхности, производительность процесса в 1,5-2 раза выше, чем при традиционном методе хонингования. При этом относительный износ брусом практически одинаков.



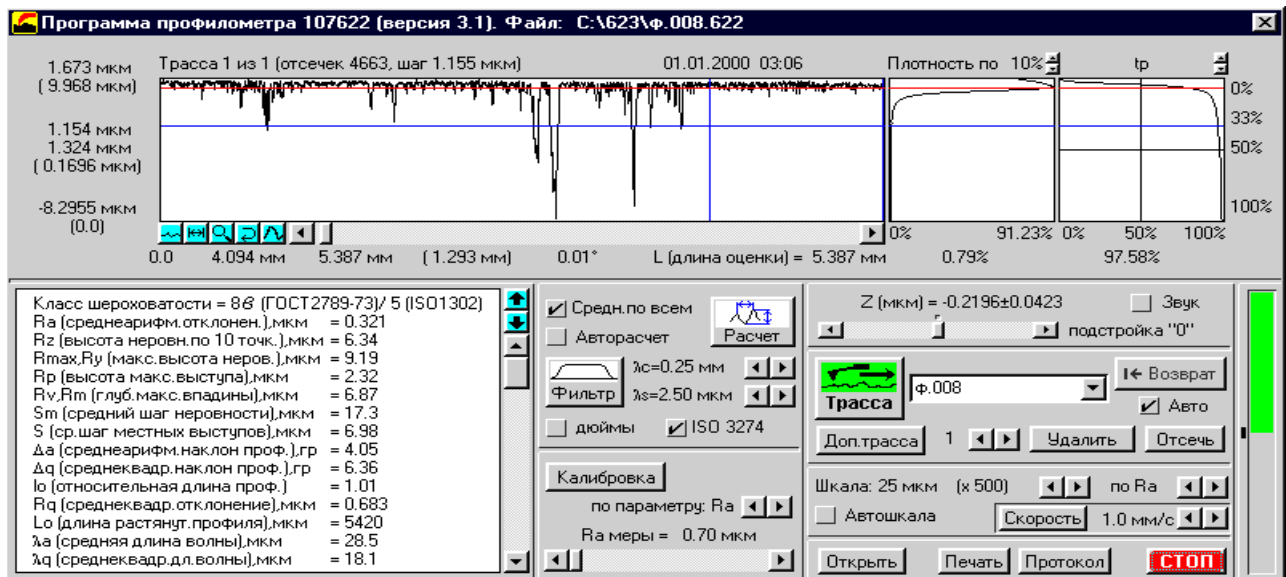
Рис. 6. Общий вид станка Растр Ц20

Плоскодоводочные станки модели «Растр» применяются в индивидуальном и серийном производствах, характеризующихся частой сменой небольших партий деталей и их широкой номенклатурой. Возможность целенаправленного выбора формы и плотности траектории рабочего движения инструмента позволяет формировать микрорельеф обработанной поверхности с оптимальными статистическими параметрами для конкретных эксплуатационных свойств. При этом величина шероховатости по параметру R_a может достигаться в

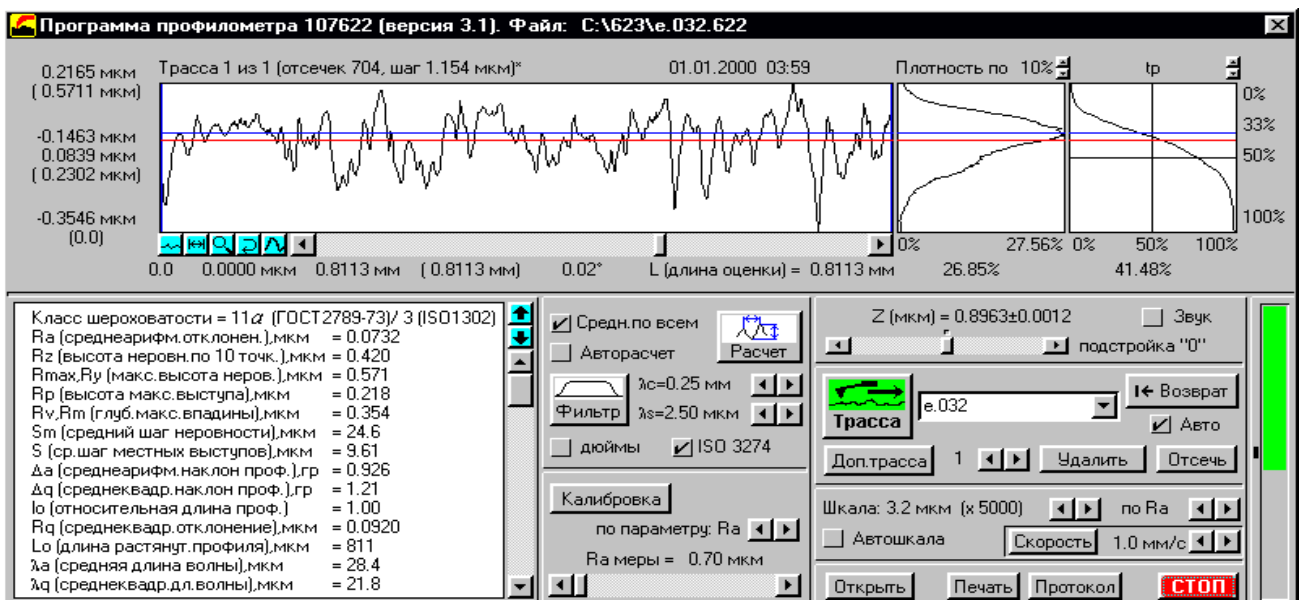
нанометровом диапазоне. Экспериментальное опробование процесса плоской абразивной доводки осуществлялось на плоскодоводочном станке «Растр 220». В качестве обрабатываемых материалов были выбраны реальные детали торцовые уплотнения, широко используемые в нефтяной и химической промышленности. Детали изготовлены из композиционных материалов, отличающихся высокой твердостью и износостойкостью, таких, как силицированный графит, твердый сплав (релит). Требования к рабочим плоскостям деталей – $R_a = 0,1$ мкм, отклонение от плоскостности не более 0,6-0,9 мкм. Такие требования на финишной стадии обработки могут быть обеспечены лишь путем абразивной доводки.

Сравнительные эксперименты показали, что обычные абразивные материалы электрокорунд белый и карбид кремния зеленый не пригодны для доводки деталей из силицированного графита (марки ГАКК 55/40) и твердого сплава (релит) в виду весьма низкой их стойкости. Удовлетворительные и практически одинаковые результаты как по производительности съема, так и по шероховатости обработанной поверхности получены при доводке этих же деталей порошками и пастами из синтетического алмаза АСМ и кубического нитрида бора (КНБ). С целью обеспечения производительности процесса и требуемого качества обработанной поверхности целесообразно осуществлять доводку в два, три перехода с уменьшением зернистости абразивного материала. При доводке деталей из композиционных материалов наибольшие трудности связаны с определением действительной шероховатости обработанной поверхности после окончательных переходов. Трудности обусловлены, прежде всего, пористостью данных материалов. Наличие пор вносит большую погрешность при оценке действительной шероховатости обработанной поверхности особенно после окончательной доводки мелкозернистыми абразивами.

Для объективной оценки шероховатости доведенной поверхности был использован компьютерный профилометр модели 107622, который позволяет измерить как общую шероховатость, так и шероховатость без учета пор. Измерения осуществляется в два этапа. На первом этапе производится профилографирование большого участка обработанной поверхности и автоматический расчет параметров общей шероховатости (рис. 7а).



а)



б)

Рис. 7. Пример оценки шероховатости доведенной поверхности на профилометре модели 107622: а) общая шероховатость обработанной поверхности; б) шероховатость без учета пор

На втором этапе осуществляется автоматический расчет параметров шероховатости на участках, не содержащих глубокие поры, то есть без учета пор. Пример измерения шероховатости доведенной поверхности детали из силицированного графита (ГАЗ 55/40) пастой АСМ 5/3 представлен на рис. 7б. Такая методика оценки шероховатости позволила быстро определить рациональную технологию окончательной доводки деталей. Также был экспериментально опробован процесс растровой доводки кремневых подложек широко используемых в микроэлектронике. Односторонняя доводка кремневых подложек осуществлялась

на станке Растр 350 в две операции. Обрабатывались пластины следующих размеров: 30×45 мм, 40×75 мм, толщиной 0,7 мм. Крепление образцов осуществлялось методом приклеивания. Параметры исходной шероховатости образцов представлены на рис. 8.

На первом этапе осуществлялась доводка (шлифование) на стеклянном притире с использованием порошка из синтетических алмазов АСМ 3/2 с добавлением специальной СОЖ. Давление устанавливалось в диапазоне 10-20 кПа. Время обработки 1,5-2 мин. В соответствии с разработанными рекомендациями [3] доводку осуществляли при редкой сетке

обеспечивающей повышенную производительность процесса. При этом обеспечивалась изотропная шероховатость по параметру R_z 0,25-0,32 (R_a 0,05-0,06). На втором этапе (полирование) использовался композиционный притир на целлюлозной основе. Полирование осуществлялось с применением алмазной пасты ACM 1/0 с добавлением небольшого количества специальной СОЖ. Режимы обработки

(давление и время) не менялись. При полировании устанавливалась более плотная сетка, соответствующая расстройке частот исходных колебаний инструмента 0,5-1%. Результаты измерения параметров шероховатости поверхности после полировки представлены на рис. 9. Величина шероховатости по параметру R_z не превышает 25 нм.

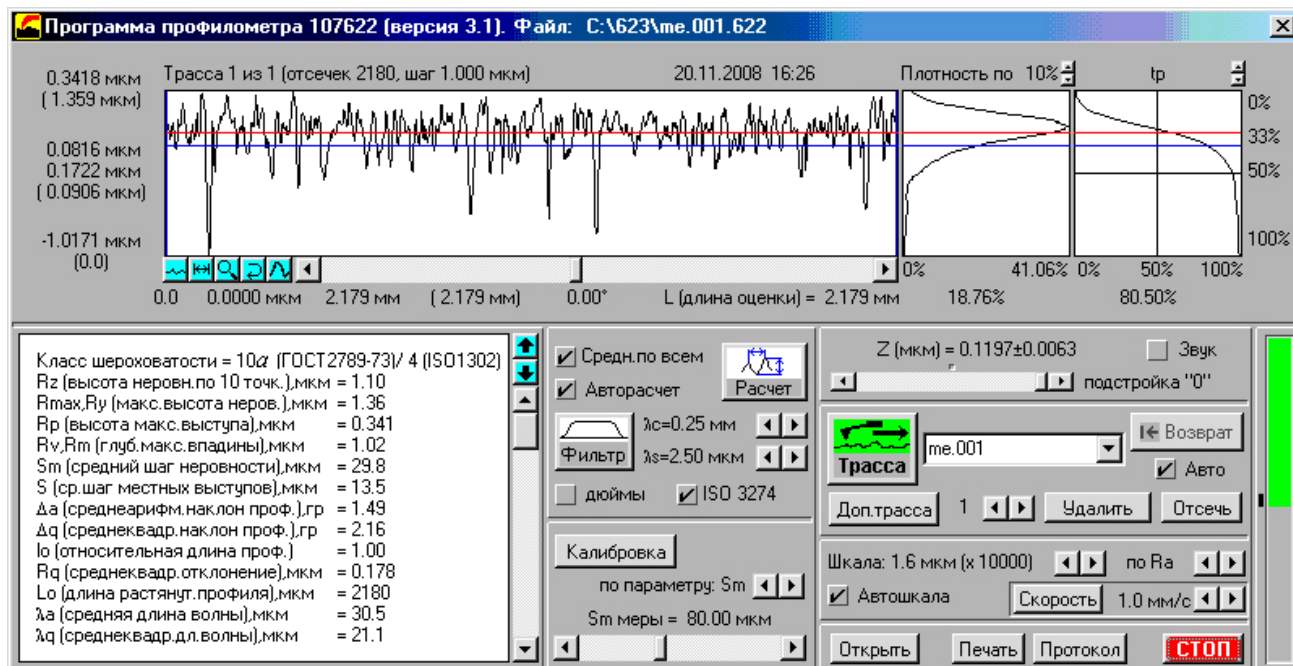


Рис. 8. Исходная шероховатость поверхности

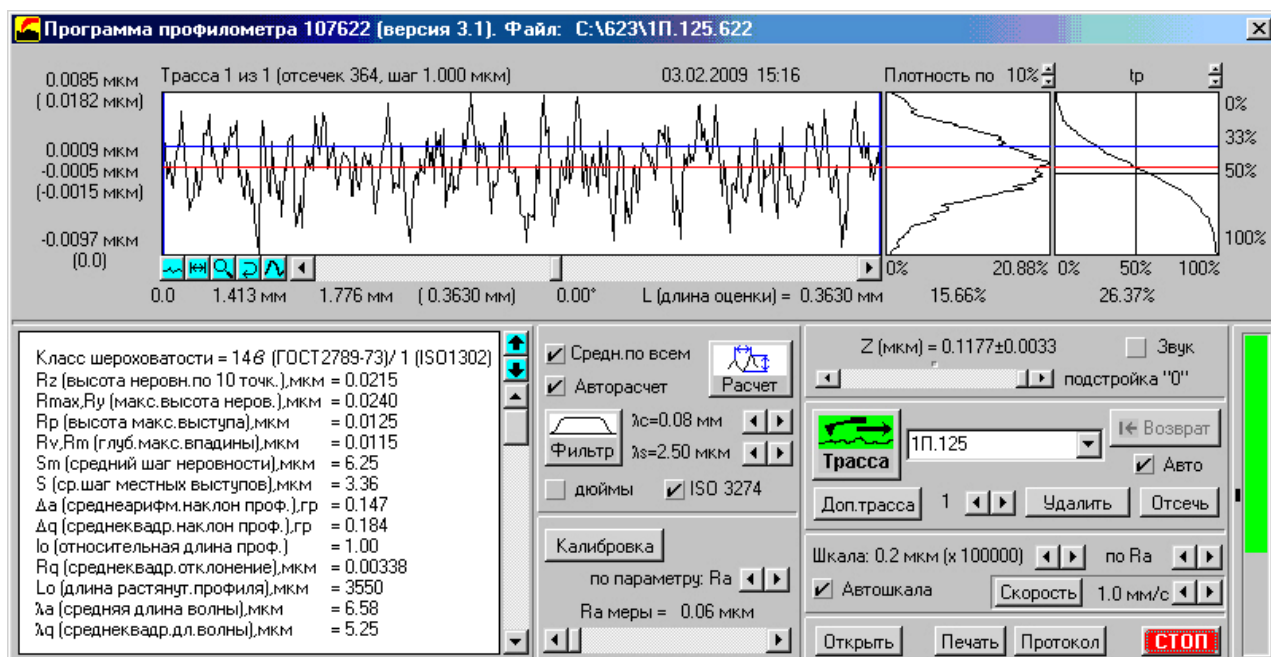


Рис. 9. Результаты измерения шероховатости после полирования на станке РАСТР 350

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Некрасов, В.П. Прецизионные плоскодоводочные станки с растровым движением инструмента // Машиностроитель. 2000. № 9. С. 7-8.
2. А.с. 1509235 СССР, МКИ В24в 33/02 хонинговально-доводочный станок / Р.А. Муратов. Оpubл. 23.09.89, Бюл. № 35.
3. Некрасов, В.П. Растровый способ абразивной доводки // Машиностроитель. 1977. №5. С. 15.

RASTER METHOD OF PROCESSING THE PRECISION SURFACES

© 2011 V.N. Antsiferov, A.M. Khanov, K.R. Muratov, R.A. Muratov, A.V. Pepelyshev

Perm State Technical University

The raster method of finishing abrasive processing of surfaces is considered. Theoretical bases and laws of raster method of processing are presented. The way of abrasive processing is offered, the equipment for finishing abrasive processing of precision flat and cylindrical surfaces is developed and made. Experimental approbation of processing on machines with raster kinematics of working-class movement of the tool is spent.

Key words: *raster trajectory, raster method of processing, flat-finishing and honing machines with raster kinematics, accuracy of geometrical form, surface roughness*

Vladimir Antsiferov, Academician of RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the "Powder Materials Technology" Department. E-mail: unpl_mtf@pstu.ru

Almaz Khanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Mechanics and Technologies Faculty

Karim Muratov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of "Machines Construction and Resistance of Materials"

Ravil Muratov, Chief of the Laboratory

Alexander Pepelyshev, Assistant at the Department of "Machines Construction and Resistance of Materials"