

# ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 533.317.2: 536.455

## ПРИМЕНЕНИЕ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2008 г. В. Н. Чекаль; Ю. И. Чудаков; С. Е. Шевцов, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: shevtsov@niiki.ru

Представлены примеры использования координатно-измерительных машин в технологии автоматизированного формообразования прецизионных асферических оптических поверхностей, приведены обоснование методик обработки данных измерений и практические рекомендации по их применению.

Коды OCIS: 220.0220, 220.4610.

*Поступила в редакцию 11.07.2008.*

Опыт применения координатно-измерительных машин (КИМ) позволяет выделить два основных направления их использования в процессе изготовления высокоточных оптических поверхностей: технологический контроль оптических поверхностей в процессе их изготовления и аттестация геометрии детали в целом, радиусов кривизны и асферических коэффициентов поверхностей.

Производство высокоточных оптических поверхностей, особенно крупногабаритных и асферических, в настоящее время практически не обходится без применения автоматизированных методов формообразования, включая ставшие традиционными методы локальной ретуши малоразмерным инструментом, алмазного микроточения, магнитореологической полировки, ионной ретуши и ряда новых способов, появившихся в последнее время [1–5]. Большинство подобных технологий используют метод последовательных приближений, при котором циклы все более тонкой обработки чередуются с циклами контроля, пока не будет достигнута требуемая точность поверхности. Соответственно фактором успеха является использование адекватного метода контроля на каждом этапе обработки.

Рассмотрим, например, типичную технологию изготовления методом локальной ретуши малоразмерным инструментом внеосевого асферического зеркала с большой асферичностью. После изготовления заготовки и обработки ближайшей сферы традиционной шлифовкой деталь шлифуется малораз-

мерными инструментами для получения асферической поверхности, пока не будет достигнута погрешность, соизмеримая с остаточным матовым слоем. Далее обработка ведется полировкой малоразмерными инструментами до получения требуемой чистоты и точности поверхности. Применение координатно-измерительных машин на этапе шлифовки и предварительной полировки малоразмерными инструментами позволяет многократно ускорить процесс достижения точности, при которой становится целесообразным использовать интерферометрический контроль.

В некоторых случаях использование КИМ и вовсе позволяет достигнуть требуемой точности, не прибегая к дорогостоящей процедуре построения интерферометрической контрольной схемы. Наиболее целесообразен такой подход при изготовлении асферических зеркальных или линзовых оптических поверхностей для ИК диапазона спектра. Например, традиционный подход к изготовлению методом алмазного микроточения асферической оптической поверхности, описываемой уравнением высокого порядка, на германиевой линзе с точностью около  $\lambda/4$ , где  $\lambda$  – рабочая длина волны, требует разработки и изготовления дорогостоящих компенсаторов волнового фронта, используемых исключительно только для интерферометрического контроля данной асферической оптической поверхности. В случае применения КИМ, такой контроль формализуется, методически практически не отли-

чаясь от контроля других асферических поверхностей, и не требует изготовления специализированных компенсаторов или иных приспособлений. В случае обеспечения требуемой точности измерений финансовые и временные затраты на изготовление германиевой линзы с применением КИМ могут снижаться в несколько раз по сравнению со случаями использования традиционных методов контроля.

Теперь остановимся на второй отмеченной области применения КИМ – аттестации геометрии детали. Традиционно финишный контроль высокоточных оптических поверхностей проводится с использованием оптических методов, среди которых наибольшее распространение получил интерферометрический контроль. В последнее время в связи с появлением новых сенсоров также стал более активно использоваться метод Гартмана. Тем не менее, эти способы хороши для определения с высокой точностью отклонений поверхности от некоей идеальной ближайшей поверхности того же типа, но при их использовании возникают технические сложности в определении радиусов кривизны, коэффициентов асферики, косины и привязок оптических поверхностей к другим базовым поверхностям изделия. Как правило, требуется изготовление дорогостоящей механической оснастки для точного измерения отрезков в пространстве. Применение координатно-измерительных машин, дополненных специализированным программным обеспечением, позволяет существенно упростить и формализовать эту процедуру, сделав ее стандартной для различных типов и габаритов поверхностей. Например, контроль радиусов кривизны рабочих пробных стекол с помощью координатно-измерительной машины *Mistral 07 07 05* фирмы DEА занимает считанные минуты для широкого диапазона радиусов кривизны. Другая типичная задача – измерение фокусного расстояния внеосевого параболоида с легкостью решается при использовании КИМ, но трудноразрешима с приемлемой точностью другими методами без использования дополнительной специализированной механической оснастки.

Рассмотрим характерные особенности, связанные с применением КИМ для контроля оптических поверхностей.

На первый взгляд, задача контроля оптических поверхностей фактически совпадает с типичной для КИМ задачей сканирования поверхности с последующим построением модели (*reverse engineering*).

Первая особенность проявляется в способе использования результатов контроля. Для оптических поверхностей характерны высокие требования совпадения поверхности с некоей идеальной сферической, параболической или какой-либо иной поверхностью

при относительно свободных допусках на расположение этой поверхности относительно баз и на такие параметры поверхности, как радиус кривизны и асферические коэффициенты. Поэтому для расчета припуска желательнее провести оптимизацию в пределах поля допуска упомянутых коэффициентов для минимизации времени последующей обработки.

Другой характерной особенностью является требование получить топограмму с высоким разрешением и при этом с максимальной точностью в каждой измеренной точке. Актуальной становится задача фильтрации сбойных точек без потери пространственного разрешения.

Рассмотрим в качестве примера типичную задачу технологического контроля внеосевого параболоида. Как правило, чертеж или спецификация содержит допуски на погрешность формы, фокусное расстояние и положение центра апертуры (внеосевое смещение). В процессе контроля деталь помещается на стол КИМ, производится совмещение координатных осей КИМ и детали, и далее путем сканирования или ощупывания поверхности получается набор точек. В результате обработки полученных данных требуется определить фокусное расстояние, внеосевое смещение и топограмму остаточных ошибок поверхности. Поскольку при этом поверхность может быть заклонена и смещена, задача может быть решена путем поиска пяти параметров, характеризующих ее положение в пространстве и 1 параметр самой поверхности:

$X_S, Y_S$  – смещение центра апертуры,

$Z_S$  – смещение по координате  $Z$  (направление  $OZ$  соответствует оптической оси),

$\alpha_X$  – заклон (разворот поверхности) по отношению к оси  $OX$ ,

$\alpha_Y$  – заклон по отношению к оси  $OY$ ,

$p$  – кривизна при вершине поверхности.

Отклонение поверхности (невязка) для каждой измеренной  $\{x_i, y_i, z_i\}$  точки параболоида может быть вычислено как

$$e_i = z_i'' - (x_i'^2 + y_i'^2) / (2p),$$

где  $x', y', z''$  – координаты измеренной точки в смещенной и развернутой системе

$$x' = X_S + (x - X_S)\cos(\alpha_X) - (z - Z_S)\sin(\alpha_X),$$

$$z' = Z_S + (z - Z_S)\cos(\alpha_X) + (x - X_S)\sin(\alpha_X),$$

$$y' = Y_S + (y - Y_S)\cos(\alpha_Y) + (z' - Z_S)\sin(\alpha_Y),$$

$$z'' = Z_S + (z' - Z_S)\cos(\alpha_Y) - (y - Y_S)\sin(\alpha_X).$$

Традиционный подход к решению этой задачи методом наименьших квадратов наталкивается на значительные сложности. С другой стороны, мож-

но заметить, что она перекликается с типичной оптической задачей юстировки схемы, содержащей внеосевой параболоид. Задача эта состоит в нахождении положения оптической оси относительно входящего пучка, при котором аберрации будут минимальны. Из практики известно, что основной аберрацией, возникающей при юстировке внеосевого параболоида, является астигматизм. Если охарактеризовать кажущуюся деформацию поверхности, соответствующую такому астигматизму, например, с помощью полиномов Цернике [6, С. 384], то затем несложно также подобрать эмпирическую формулу, характеризующую связь величины астигматизма с наклоном

$$PV_A \approx 0,24\alpha ZRd^2/p^2, \quad (1)$$

где  $PV_A$  – размах кажущейся астигматической деформации поверхности,  $ZR$  – расстояние от оптической оси до центра апертуры,  $\alpha$  – угол наклона оси параболоида по отношению к оптической оси в радианах,  $d$  – диаметр апертуры параболоида. Все линейные величины выражаются в одинаковых единицах.

Аналогичная кажущаяся астигматическая деформация возникает и при неоптимальном выборе положения и направления оси параболоида при механическом контроле. Используя в качестве критерия минимум  $PV_A$ , можно применить стандартные поисковые методы для определения оптимального положения центра апертуры относительно оптической оси, при котором устранение наклонов поверхности будет соответствовать нулевому значению астигматизма.

Таким образом, задача может быть сведена к оптимизации по ряду критериев:  $C$  – смещение вершины по оси  $OZ$ ,  $L_X$  – заклон ближайшей плоскости к оси  $OX$ ,  $L_Y$  – заклон ближайшей плоскости к оси  $OY$ ,  $A_0$  – астигматизм в направлении  $0^\circ$ ,  $A_{45}$  – астигматизм в направлении  $45^\circ$ ,  $D$  – “расфокусировка”. Каждый из них характеризуется коэффициентом при соответствующем полиноме Цернике, сильно зависит только от одного из искомых параметров и может быть легко определен известными способами [6].

В общих чертах, процедура оптимизации может выглядеть следующим образом:

в каждой измеренной точке вычисляется значение невязки  $e_i$  с заданной параболической поверхностью,

производится аппроксимация полученного набора  $\{x_i, y_i, e_i\}$  полиномами Цернике 2-го порядка,

устраняются наклоны разворотом поверхности на углы

$$\Delta\alpha_X = L_X/R_{\max}, \quad \Delta\alpha_Y = L_Y/R_{\max},$$

где  $R_{\max}$  – значение радиуса, используемое для нормировки полярной координаты  $\rho$  при расчете полиномов,

производится повторный расчет невязок и аппроксимация полиномами Цернике для определения изменения в значении астигматизма,

рассчитываются новые значения положения центра апертуры и разворотов с учетом скорости изменения астигматизма

$$X'_0 = X_0 + L_X p/R_{\max}, \quad \alpha_{X'} = \alpha_X + \Delta\alpha_X A_0/\Delta A_0,$$

$$Y'_0 = Y_0 + L_Y p/R_{\max}, \quad \alpha_{Y'} = \alpha_Y + \Delta\alpha_Y A_{45}/\Delta A_{45},$$

где  $\Delta A_0$  и  $\Delta A_{45}$  – изменения соответствующего астигматизма на последней итерации,

рассчитывается новое значение радиуса кривизны

$$p' = p + 4D(p/R_{\max})^2.$$

Процедура оптимизации повторяется, пока не будет достигнуто одновременное уменьшение  $L_X$ ,  $L_Y$ ,  $D$ ,  $A_0$ ,  $A_{45}$  ниже заданного допуска или прекратится сходимость поиска.

Практическая реализация такого алгоритма показывает его хорошую сходимость, однако, очевидным недостатком подхода является его ограниченность случаем контроля внеосевой параболической поверхности. Поэтому требуется некоторая модификация, чтобы обеспечить применимость метода как для случая осесимметричной и внеосевой асферики 2-го порядка, так и для асферики более высоких порядков.

Во-первых, для асферических поверхностей, апертура которых расположена в области оптической оси (как осевых, так и “слегка внеосевых”), основной аберрацией децентрировки является уже не астигматизм, а кома 3-го порядка, поэтому ее применение в качестве соответствующего критерия улучшает сходимость поиска. С некоторой степенью приближения для оценки размаха комы  $PV_C$  можно применить эмпирическую формулу

$$PV_C \approx 0,04\alpha d^3/p^2 e^2, \quad (2)$$

где  $e^2$  – квадрат эксцентриситета.

Из сравнения формул (1) и (2) можно прийти к выводу, что при  $ZR < 0,17d$  главной аберрацией децентрировки будет кома, при дальнейшем увеличении  $ZR$  начнет превалировать астигматизм.

Во-вторых, желательно включить в процедуру поиск значения эксцентриситета как для учета его оптимального значения при технологическом контроле, так и для его оценки при аттестации. Опираясь на опыт решения оптических юстировочных

задач, в качестве критерия можно выбрать коэффициент  $Z3$  при полиноме Цернике, характеризующем зональную ошибку 3-го порядка [6, С. 387].

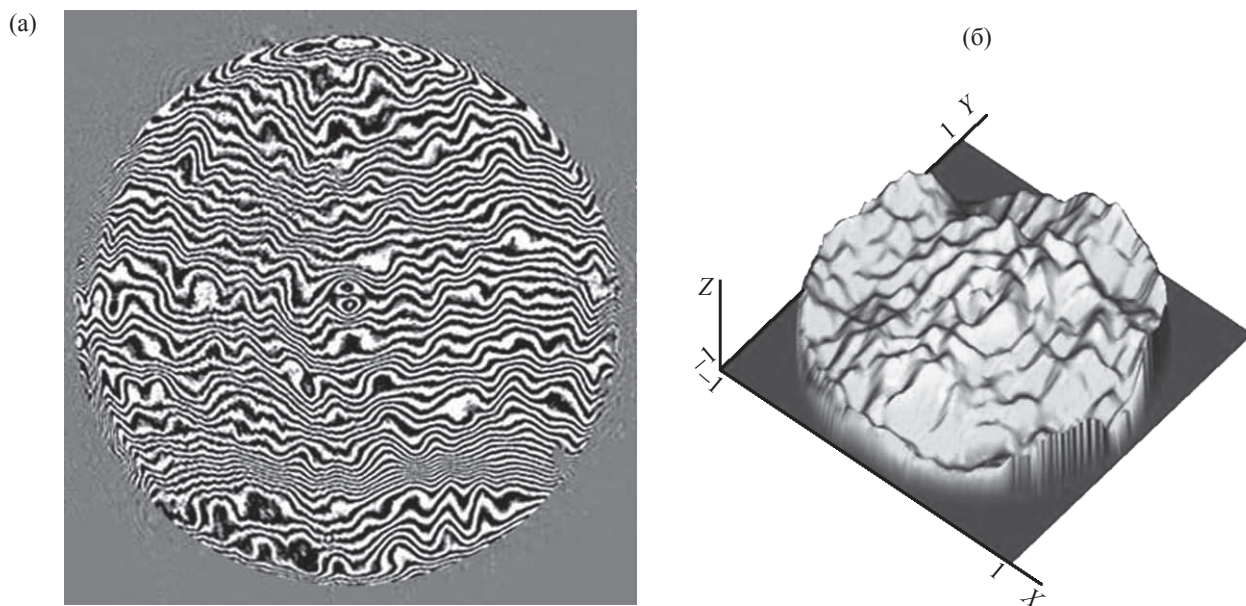
В итоге предлагается алгоритм, обеспечивающий нахождение оптимальных с точки зрения остаточных aberrаций положения и параметров  $p, q$  асферической поверхности вращения 2-го порядка, описываемой уравнением

$$qz^2 - 2pz + x^2 + y^2 = 0.$$

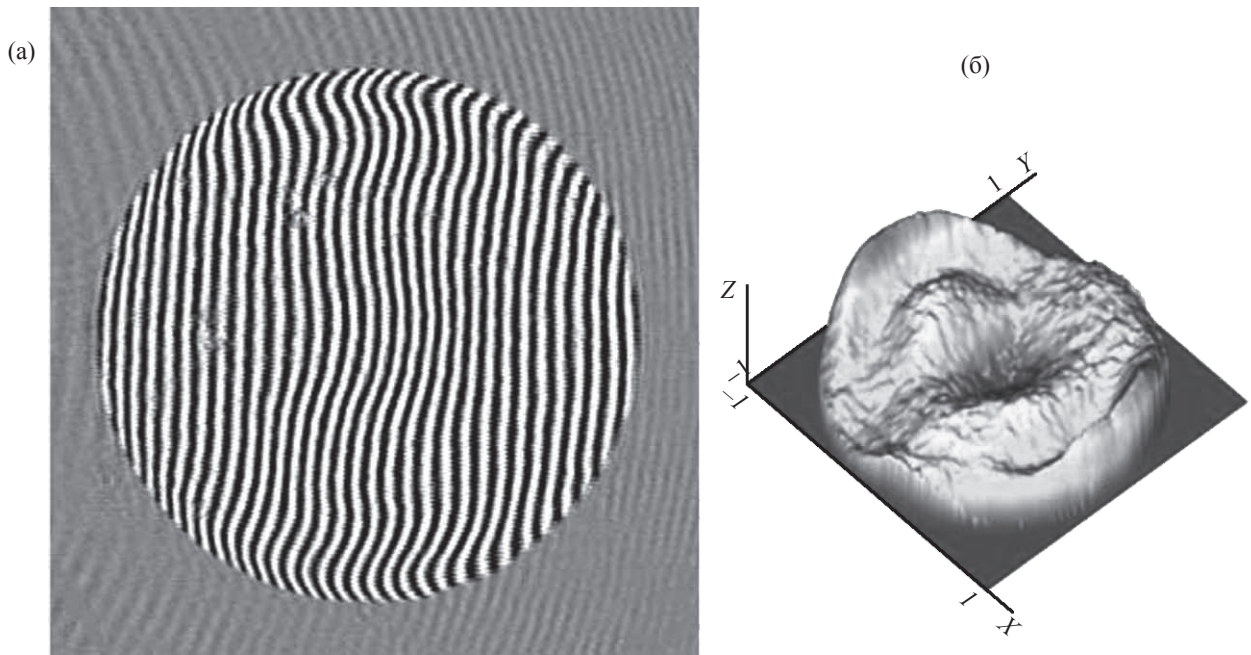
На основе метода разработано и с успехом применено в практике производства оптических деталей программное обеспечение, включенное в состав комплекса автоматизированного формообразования оптических поверхностей малоразмерным инструментом. В процессе его эксплуатации было произведено множество циклов технологического и аттестационного контроля, в том числе и асферических поверхностей с коэффициентами высших порядков, хотя в последнем случае оптимизация ограничивалась поиском оптимального расположения и радиуса кривизны поверхности. Особую практическую ценность метод приобретает при достижении точности контроля, близкой к точности интерферометрии светового диапазона. Применяемая авторами КИМ *Mistral 07 07 05* с измерительной головкой РНБА и щупом повышенной точности TP200 имеет паспортную погрешность в пределах  $2,5 \text{ мкм} + L/400 \text{ мкм}$ . Однако опыт ее использования для контроля асферических оптических по-

верхностей показал, что остаточная ошибка поверхности, обработанной малоразмерным инструментом, по результатам контроля КИМ в большинстве случаев не превышала 2 мкм, зачастую оказываясь ниже 1 мкм (рис. 1, 2). На рис. 1 приведены интерферограмма и топограмма поверхности внеосевого параболического зеркала диаметром 463 мм с асферичностью 200 мкм. После асферизации и доводки по данным контроля *Mistral 07 07 05* остаточный размах ошибки составил 2 мкм. На рис. 2 приведены интерферограмма и топограмма поверхности внеосевого параболического зеркала диаметром 101 мм с асферичностью 10 мкм, в этом случае остаточный размах ошибки составил всего 0,3 мкм. Чтобы добиться такой точности необходимо предпринять ряд мер, снижающих степень брака при контроле, обусловленного систематической и случайной погрешностью.

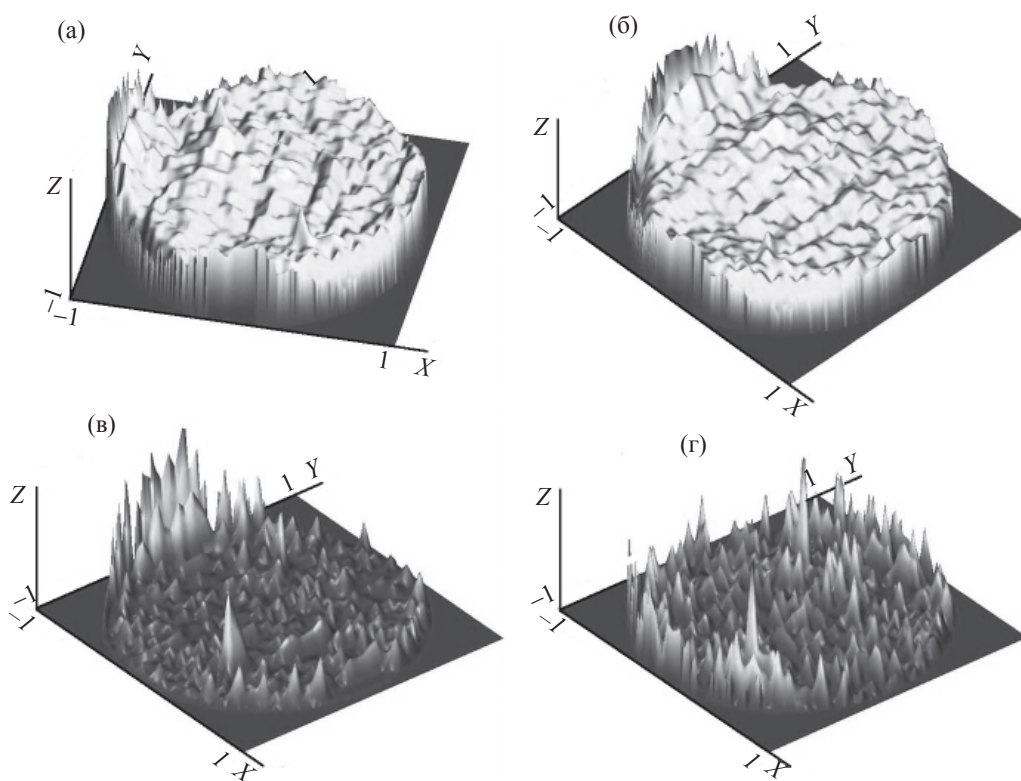
Главным источником несистематической погрешности являются выбросы в результатах контроля, обусловленные прилипшими к поверхности частичками пыли и грязи (рис. 3). Тщательная очистка поверхности перед контролем, использование обеспыленных рабочих зон и “чистых” комнат существенно улучшают ситуацию, но гарантированно исключить выбросы не могут. Ручной поиск и устранение сбойных точек в наборе данных, содержащих иногда тысячи точек, является трудоемкой задачей, поэтому предпринят поиск подходящей автоматической процедуры фильтрации. Метод сгла-



**Рис. 1.** Интерферограмма (а) и топограмма (б) поверхности внеосевого параболического зеркала диаметром 463 мм с асферичностью 200 мкм.



**Рис. 2.** Интерферограмма (а) и топограмма (б) поверхности внеосевого параболического зеркала диаметром 101 мм с асферичностью 10 мкм.



**Рис. 3.** Карты отклонений формы: а – до фильтрации, б – после фильтрации. Карты градиентов: в – в направлении  $OX$ , г – в направлении  $OY$ .

живающей полиномиальной аппроксимации в большинстве случаев не применим как заглубляющий результаты контроля, метод повторных измерений и усреднение также показали свою неэффективность. Далее были опробованы некоторые другие известные методики, и в конце концов авторы остановились на следующем способе. На основе полученной по результатам обработки измеренных данных карты невязок строятся карты градиентов в двух ортогональных направлениях, фильтрации подвергаются точки, положительное значение градиента в которых превышает граничный уровень, определяемый по критерию “3 сигма”. На рис. 3 показаны исходные данные контроля, карта градиентов ошибок и топограмма поверхности после фильтрации сбойных точек данным способом. На топограммах видно, как были отфильтрованы два выброса высотой приблизительно 1 мкм и при этом сохранена достоверная информация о резких перегибах на других участках поверхности.

В целом, можно сказать, что введение КИМ в технологии автоматизированного формообразования оптических поверхностей позволяет перевести производственный процесс на качественно новый уровень. С использованием цифрового обмена между КИМ и обрабатывающим оборудованием образуется замкнутый высокоэффективный технологический комплекс, позволяющий на одном рабочем месте осуществлять обработку оптической поверхности от операций предварительной шлифовки до финишного полирования. В ряде случаев такой технологический комплекс становится также самодостаточным для технологического и аттестационно-

го контроля оптических деталей. На фоне низких производственных затрат при работе комплекса повышение точности измерений КИМ и развитие программно-методического обеспечения по применению КИМ для контроля оптических деталей открывают широкие перспективы для создания и применения технологических комплексов в составе КИМ и станков по формообразованию оптической поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Walker D., Brooks D., Freeman R., King A.M., McCavana G., Morton R., Riley D., Simms J. First aspheric form and texture results from a production machine embodying the Precessions process // Proc. SPIE. Optical manufacturing and Testing IV. 2000. V. 4451. P. 267–276.
2. Jacobs Stephen D. Innovations in Polishing of Precision Optics. Part 2 // Convergence V. 11. № 2. Second Quarter 2003.
3. Fess E. MRF Polishing of Microground Surfaces. Part I – Deterministic Micro Grinding // Convergence V. 10. № 2. March/April 2002.
4. Шевцов С.Е. Алмазное микроточение в производстве современных высокоточных элементов инфракрасных оптических систем // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 12. С. 20–23.
5. Föhnle O.W., Brug H.V., Frankena H.J. Fluid Jet Polishing of Optical Surfaces // Appl. Opt. V. 37. 1998. P. 6771–6773.
6. Малакара Д. Оптический производственный контроль. Пер. с англ. / Под ред. Соснова А.Н. М.: Машиностроение, 1985.