

«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014—2020 годы» (соглашение № 14.576.21.0027, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57614X0027).

Литература

1. **Михуткин А. А., Васильев А. Л.** Трехмерная реконструкция поверхности по изображениям, полученным в растровом электронном микроскопе // Кристаллография. 2014. Т. 59. № 6. С. 999—1007.
2. **Goldstein J., Newbury D., Joy D.** Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. N. Y.: Kluwer Academic, Plenum Publishers, 2003. P. 212—220.
3. **Соколов В. Н., Лебедев А. А., Юрковец Д. И.** Метод трехмерной реконструкции микрорельефа поверхности твердых тел по их РЭМ-стереоизображениям // Известия РАН. Сер. физ. 1995. Т. 59. № 2. С. 28—35.
4. **Minnich B., Leeb H., Bernroider E. W. N., Lametschwandner A.** Three-dimensional morphometry in scanning electron microscopy: a technique for accurate dimensional and angular measurements of microstructures using stereopaired digitized images and digital image analysis // J. Microscopy. 1999. V. 195. N. 1. P. 23—33.
5. **Pouchou J.-L., Boivin D., Beauchêne P., Besnerais G. L., Vignon F.** 3D Reconstruction of Rough Surfaces by SEM Stereo Imaging // Microchimica Acta. 2002. V. 139. N. 1—4. P. 135—144.

6. **Schroettner H., Schmied M., Scherer S.** Comparison of 3D Surface Reconstruction Data from Certified Depth Standards Obtained by SEM and an Infinite Focus Measurement Machine (IFM) // Microchimica Acta. 2006. V. 155. N. 1—2. P. 279—284.

7. **Roy S., Meunier J., Marian A. M., Vidal F., Brunette I., Costantino S.** Automatic 3D reconstruction of quasi-planar stereo Scanning Electron Microscopy (SEM) images // 34th Annual Int. Conf. of the IEEE EMBS (Engineering in Medicine and Biology Society). San Diego (Cf, USA). 2012. P. 4361—4364.

8. **Marinello F., Bariani P., Savio E., Horsewel A., Chiffre L.** Critical factors in SEM 3D stereo microscopy // Measurement Science and Technology. 2008. V. 19. N. 6. P. 065705.1—065705.12.

9. **Carli L., Genta G., Cantatore A., Barbato G., Chiffre L., Levi R.** Uncertainty evaluation for three-dimensional scanning electron microscope reconstructions based on the stereo-pair technique // Measurement Science and Technology. 2011. V. 22. N. 3. P. 035103.1—035103.11.

10. **Соколов В. Н.** Количественный анализ микроструктуры горных пород по их изображениям в растровом электронном микроскопе // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 8. С. 72—78.

11. **Filippov M. N., Gavrilenko V. P., Kovalchuk M. V., Mityukhyayev V. B., Ozerin Yu. V., Rakov A. V., Roddatis V. V., Todua P. A., Vasiliev A. L.** Reference material for transmission electron microscope calibration // Measurement Science and Technology. 2011. V. 22. P. 094014.1—094014.5.

Дата принятия 12.11.2014 г.

62.181.1

Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями

В. А. ПЕЧЕНИН, М. А. БОЛОТОВ, Н. В. РУЗАНОВ, М. В. ЯНЮКИНА

Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева
Национальный исследовательский университет, Самара, Россия,
e-mail: maikl.bol@gmail.com

Предложена методика оптимизации измерений поверхностей сложной формы одной серии деталей контактным методом. Приведены результаты применения методики для измерений в сечениях и на поверхностях серии лопаток компрессора газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: сложная поверхность, количество и схема распределения точек, нелинейная оптимизация, лопатка компрессора газотурбинного двигателя.

A procedure for optimizing the parameters of measuring the complexform surfaces at contact measurement method ensuring the measurement accuracy for series of one type components is suggested. The results of procedure application for cross-sections and surfaces of gas-turbine engine compressor blades are presented.

Key words: complex surface, number and distribution pattern of points, curvature, equidistant surface, nonlinear optimization, gas-turbine engine compressor blade.

В настоящее время значительно возросло количество современных трехосевых координатно-измерительных машин (КИМ), имеющих компьютерную поддержку. В них используют

координатный метод измерений геометрических параметров, основанный на косвенном сличении. Координаты точек поверхностей можно измерять контактным и бесконтактным

способами. Как показывает практика, координатный метод универсален и имеет высокую точность, что объясняет его широкое распространение в промышленности.

Точность и производительность координатных измерений сильно зависят от используемых методик. В соответствии с [1] под методикой выполнения измерений понимают совокупность конкретно описанных операций, которые обеспечивают получение результатов с установленными показателями точности. Применительно к КИМ такая методика включает действия, связанные с базированием детали и измерением отдельных координат точек ее сложной поверхности (профиля). Базирование можно осуществлять как по простым геометрическим формам, так и по сложным поверхностям с использованием методов наилучшего совмещения измеряемой детали и ее CAD-модели.

Общая погрешность измерений геометрии сложной поверхности складывается из погрешностей, допускаемых на этапе базирования и при расчете геометрии поверхности. При работе на контактных КИМ часто используют измерительный наконечник сферического типа: сначала КИМ фиксирует координаты центров наконечника, а затем рассчитывает координаты точек касания. Такая процедура называется компенсацией радиуса наконечника. Для точного измерения геометрии компенсацию осуществляют посредством построения поверхности, которая эквидистантна аппроксимирующей множество центров координат точек измерительного наконечника в момент его касания. При использовании такого метода компенсации на результирующую погрешность значительно влияет выбор количества и расположения измеряемых точек.

Обычно на практике применяют равномерное распределение контрольных точек по поверхности [2]. Такой способ далек от оптимального, так как для обеспечения необходимой точности требуется завышенное количество измеряемых точек поверхности, что увеличивает трудоемкость. Дело в том, что плотность точек, выбираемая для участков поверхности с высокой кривизной, оказывается избыточной для пологих участков.

Обзор литературы по данной проблеме выявил работы, предлагающие методики определения оптимального количества точек и схемы их расположения на поверхности. Так, в [3] рассмотрены три схемы распределения измеряемых точек: равномерное, зависящее от кривизны и смешанное, сочетающее первые два. При равномерном распределении точки находятся на одном расстоянии по сетке поверхности. По второй схеме используют понятие нормальной кривизны и контрольные точки распределяют в большей степени в местах с высокой кривизной. В третьем случае пропорцию между равномерным и зависящим от кривизны распределением определяет оператор.

В [4] для распределения предлагается использовать следующие критерии: максимальное расстояние между профилем и хордой, соединяющей две любые точки профиля; минимальную плотность точек контроля с указанием макси-

мально допустимого расстояния между любыми двумя соседними точками на поверхности; критерий, определяющий необходимое количество точек измерения таким образом, чтобы отклонение между построенной по измеренным точкам NURBS-поверхностью и CAD-поверхностью не превышало заданного значения, причем в этом случае измеряемые точки может задавать сам оператор.

В [5] изложены три эвристических алгоритма для выработки методики размещения точек при измерениях участков сложной поверхности с использованием параметров ее максимальной, средней и промежуточной кривизны. Участки формируют делением NURBS-поверхности измеряемого объекта на области путем равномерного разделения диапазона параметров, определяющих точки поверхности. Первый алгоритм начинается с выбора трех точек на каждом участке, затем размещают дополнительные точки на участках с низкой плотностью, определяемой отношением количества точек к площади участка. Второй алгоритм начинается аналогично первому, но дополнительные точки располагают в соответствии с размером участка. В третьем алгоритме положения первых точек выбирают в соответствии с отношением средней кривизны участка к средней кривизне поверхности, дополнительные точки добавляют в соответствии с размером участка.

В [6] описаны два новых метода распределения точек измерений на основе единой площади поверхности и доминирующих точек в соответствии с ее геометрической формой. Первый метод связан с расчетом площади поверхности на основе простых треугольных участков по облаку точек, затем общую площадь разбивают на одинаковые участки по числу точек измерения. Во втором методе сначала распределяют точки в местах с максимальной кривизной, а затем в участки из четырех точек размещают дополнительные точки, в первую очередь на участки с максимальной площадью до достижения требуемого количества контрольных точек. Также в [6] проведено сравнение этих методов с равномерным распределением и методами, предложенными в [5].

Авторами статьи после анализа и обобщения [2–6] принято решение о разработке нового, достаточно простого метода, учитывающего случайный характер измеряемых поверхностей (профилей).

Сформулируем общую задачу для определения оптимальных параметров измерений сложных поверхностей множества однородных деталей. Поверхности серии деталей — это реализации некоторой случайной функции в n -мерном пространстве $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$, где m — количество реализаций. Случайная функция содержит информацию о множестве погрешностей, допускаемых в процессе изготовления и измерения серии деталей [7]. В общем виде задача сводится к определению таких параметров измерения, при которых погрешность не будет превышать допустимое значение σ с учетом случайных, систематических характеристик функции E и точностных параметров средств измерений (СИ). Математически задачу представим в виде

$$F(S_{\text{опт}}, E, A_{\text{СИ}}) \leq \sigma,$$

где F — оператор оценки погрешности измерений в n -мерном евклидовом пространстве, представленный некоторой метрикой; $S_{\text{опт}}$ — оптимальные параметры измерений; $A_{\text{СИ}}$ — точностные показатели СИ.

Прежде чем переходить к описанию методики измерений, определимся с математическим представлением профилей и поверхностей. Стандартом для этого в CAD-системах и метрологическом обеспечении измерительного оборудования являются NURBS-сплайны [8] — кусочные сплайны, которые можно записать как параметрическое уравнение

$$P(u) = \sum_{i=1}^n h_i P_i N_{i,k}(u) / \sum_{i=1}^n h_i N_{i,k}(u),$$

где u — параметр для вычисления координат точек сплайна, изменяющийся в диапазоне $[t_{k-1}, t_{n+1}]$; h_i — однородные координаты задающих точек; P_i — координаты (x_i, y_i, z_i) i -й задающей точки в трехмерном пространстве; $N_{i,k}(u)$ — базисные функции (или сопряжения) сплайна в параметрическом направлении; t — узловые значения параметра, у которых функции $N_{i,k}(u)$ не равны нулю; k — степень кусочного сплайна в направлении параметра u .

Уравнение NURBS-поверхности запишем в виде

$$P(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{i,j} P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v),$$

где v — параметр для вычисления координат точек сплайна, изменяющийся в диапазоне $[s_{l-1}, s_{m+1}]$; s — узловые значения параметра, у которых функции $N_{j,l}(v)$ отличаются от нуля; l — степень кусочного сплайна в направлении параметра v .

Методика оптимального выбора количества и расположения измеряемых точек состоит из трех этапов. Первый этап — выбор и подготовка статистических данных по реализации поверхностей серии деталей. На втором этапе оптимизируют параметры методики измерений для каждого варианта реализации поверхностей в группе с различным количеством измеряемых точек. Третий этап — выбор оптимального, с точки зрения затрат времени, варианта параметров измерений, при котором погрешность будет меньше σ (для всех деталей). Рассмотрим эти этапы подробно.

На *первом этапе* возможны два варианта. Первый предполагает наличие статистики измерений серии поверхностей с помощью СИ, для которого решается задача оптимизации измерений. Во втором варианте априори принимают известными погрешности технологического процесса и СИ.

На *втором этапе* задают множество равномерно распределенных измеряемых точек поверхности для конкретной реализации и решают задачу корректировки параметров измеряемых точек (u_j, v_j) на $(\Delta u_j, \Delta v_j)$, при которых будет обеспечена наименьшая погрешность измерений. Предлага-

ется решать ее как задачу многопараметрической оптимизации, суть которой состоит в поиске минимума нелинейной функции с ограничениями. В качестве критерия оптимизации выбирают отклонение направляющих векторов нормалей офсетной поверхности $\mathbf{p}_p$, построенной по центрам измерительного наконечника, и соответствующих им точек на измеряемой поверхности $\mathbf{p}_{\text{ИП}i}$. Целевая функция представляет сумму разностей между направляющими векторами нормалей:

$$f(\Delta u) = \sum_{i=1}^3 \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{\text{ИП}i}\| \rightarrow \min.$$

Оптимизируемыми параметрами являются пары $(u_{i,j}, v_{i,j})$ для $i \times j$ точек поверхности. Систему ограничений для задачи представим как

$$\left. \begin{aligned} b_u^H &\leq u_{i,j} \leq b_u^B, \quad b_v^H \leq v_{i,j} \leq b_v^B; \\ u_{i,j} &\leq u_{i+1,j}; \quad v_{i,j} < v_{i,j+1}; \\ v_{1,\dots,n,j} &= \text{const}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $b_u^H, b_u^B, b_v^H, b_v^B$ — нижние и верхние ограничения соответственно параметров u и v .

Таким образом, задача условной нелинейной оптимизации состоит из одной нелинейной целевой функции и линейных ограничений ее параметров. Рассмотрим решение этой задачи для одного сплайна. В (1) обозначим ограничения для параметра u как $g(\Delta u) \leq 0$. Если при этом Δu^* является решением задачи, то найдется положительный вектор множителей Лагранжа $\lambda \in R^m$ такой, что для функции Лагранжа [9]:

$$L(\Delta u) = f(\Delta u) + \sum_{i=1}^N \lambda_i g_i(\Delta u_i) \rightarrow \min$$

выполняются условия

$$\begin{cases} \min(L(\Delta u)) = L(\Delta u^*); \\ \lambda_i g_i(\Delta u_i^*) = 0, \quad i = 1, \dots, m; \\ \lambda_i > 0, \quad i = 1, \dots, m. \end{cases}$$

Задачу оптимизации можно решать методом последовательного квадратичного программирования (SQP), который позволяет достаточно точно имитировать метод Ньютона для оптимизации при ограничениях [10]. Этот метод основан на нахождении нуля градиента целевой функции $\nabla f(\Delta u)$ и сводится к решению уравнений [11]:

$$\nabla f(\Delta u_j) + H(\Delta u_j)(\Delta u_{j+1} - \Delta u_j) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где $H(\Delta u_j)$ — гессиан функции $f(\Delta u_j)$, $H(\Delta u_j) = [\partial^2 f(\Delta u) / \partial \Delta u^2]$.

В методе SQP на каждой основной итерации осуществляется аппроксимация гессiana для функций Лагранжа с помощью квазиньютоновского модифицированного метода. Качество оптимизации оценивают с использованием показателя, характеризующего погрешность измерений, его рассчитывают как максимальное расстояние между поверхностью, представленной наибольшим количеством описывающих точек и принимаемой в качестве эталонной, и измеряемой поверхностью, которую задают по определенному набору измеряемых точек. Квадрат этого расстояния вычисляют по формуле [12]:

$$F_i^2 = (x_{mi} - x_i)^2 + (y_{mi} - y_i)^2 + (z_{mi} - z_i)^2,$$

где x_{mi} , y_{mi} , z_{mi} , x_i , y_i , z_i — координаты точек измеряемой и эталонной поверхностей, соответственно.

Объектом исследования является сложная поверхность лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД). Допуск на отклонение ее формы составляет $T = 0,1$ мм. В соответствии с рекомендациями по выбору СИ установим погрешность измерений равной 30 % от поля допуска: $\sigma = 1/3T = 0,033$ мм.

Из партии лопаток, изготовленных по единому технологическому процессу без изменения его параметров, отобрали девять штук. Профили этих лопаток по 220 точкам измеряли с помощью КИМ марки DEA Global Performance. Погрешность СИ определяли по формуле

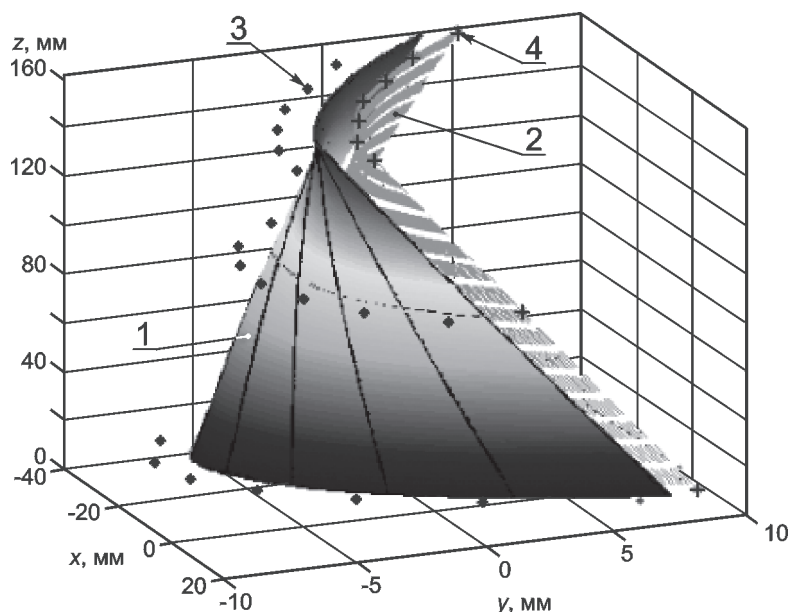


Рис. 1. Модель измерения спинки лопатки компрессора ГТД:
1, 2 — измеряемая и эталонная поверхности; 3 — центры измерительного наконечника; 4 — номинальные точки

$MPE_L = 1,7 + L/333$ в микрометрах, где L — длина измеряемого объекта, мм. Для каждой измеренной сложной поверхности осуществляли процедуру оптимизации.

Рассмотрим использование разработанной методики на примере измерений отдельных профилей. В табл. 1 приведены погрешности измерений профиля до и после ($F_{\text{опт}}$) применения алгоритма оптимизации при равномерном распределении точек контроля по длине профиля одного сечения корыта для девяти лопаток компрессора ГТД, S_N — число точек контроля.

Как следует из табл. 1, при равномерном распределении точек для обеспечения требуемой точности измерений необходимы 30 контрольных точек. Оптимизация позволила уменьшить число измеряемых точек до 20. Использование оптимальных параметров измерений при контроле профиля снижает объем хранимой информации и трудоемкость работы.

Применим разработанную методику для измерений поверхностей спинки и корыта лопатки компрессора ГТД. В соответствии с техническими требованиями лопатки компрессора измеряют по ряду сечений. При выборе оптимального расположения необходимо учесть одинаковое положение точек в сечении по одной координате. Оптимизируемыми параметрами являются положения сечений по оси Z и измеряемых точек в них. Графическое представление поверхности с учетом компенсации радиуса измерительного наконечника для спинки лопатки изображено на рис. 1.

Таблица 1

Абсолютные значения погрешностей измерений для девяти лопаток

S_N	Абсолютная погрешность, мкм, лопаток								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
До оптимизации									
10	52,1	43,5	62,3	49,2	49,5	37,6	31,8	64,4	48,9
20	36,9	26,2	69,8	33,0	35,3	28,3	26,3	42,3	21,4
30	25,8	17,4	31,4	16,5	24,5	20,3	17,5	30,3	12,4
40	17,0	12,2	21,1	11,5	17,5	12,9	12,0	20,8	7,8
50	12,0	7,6	26,9	7,6	12,6	8,8	8,0	15,2	5,1
60	8,8	5,9	9,5	5,2	9,7	5,5	5,4	11,0	4,0
70	6,7	4,5	6,4	4,1	7,6	3,3	3,4	7,6	3,2
После применения алгоритма оптимизации									
10	53,1	43,3	61,5	49,1	38,4	38,0	32,0	50,9	48,6
20	24,3	10,1	5,6	29,9	17,8	21,3	11,5	13,6	18,4
30	11,3	5,0	8,2	7,2	5,9	7,9	7,6	7,6	3,4
40	12,5	5,4	3,7	8,5	6,8	5,3	5,7	2,7	2,6
50	5,5	3,3	3,2	2,2	2,6	1,9	2,2	1,7	2,8
60	1,8	4,1	4,0	1,6	2,5	1,9	2,3	1,9	2,4
70	1,6	4,3	3,6	2,5	1,9	2,5	2,4	1,9	2,5

Таблица 2

Абсолютные значения погрешностей компенсации с использованием методики равномерного распределения точек для девяти лопаток

S_N	Абсолютная погрешность компенсации, мкм, лопаток								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Для корыта									
10	67,2	41,2	43,4	46,2	57,5	40,7	56,7	61,2	69,1
20	43,5	24,9	30,6	33,2	37,4	27,9	39,3	45,9	40,8
30	26,7	17,2	20,0	23,7	26,2	20,2	27,7	33,1	24,9
40	16,1	11,5	13,5	16,2	18,0	14,7	19,4	23,4	15,3
Для спинки									
10	175,2	193,9	137,2	131,0	139,9	146,5	111,9	128,7	222,3
20	67,7	71,0	49,4	49,0	44,9	57,1	42,0	58,3	78,2
30	34,1	34,6	24,7	27,7	21,6	28,8	23,0	33,1	35,4
40	27,8	18,8	15,8	18,0	12,3	18,3	14,1	20,3	20,9

Таблица 3

Абсолютные значения погрешностей компенсации с использованием методики оптимизации точек для девяти лопаток

S_N	Абсолютная погрешность компенсации, мкм, лопаток								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Для корыта									
10	66,7	37,4	43,5	43,9	56,7	40,0	55,6	59,0	68,7
20	39,4	24,5	27,3	24,3	33,8	25,9	34,4	38,8	38,2
30	24,5	11,4	20,0	20,9	21,6	20,2	23,3	29,6	16,1
40	10,8	6,3	10,1	13,8	14,5	14,0	19,4	21,2	13,5
Для спинки									
10	110,3	57,2	118,0	117,3	69,7	79,1	100,0	63,2	27,9
20	52,8	8,6	24,0	22,7	36,2	14,0	13,9	8,6	61,3
30	7,3	2,25	24,7	15,9	14,8	22,0	17,5	21,7	22,8
40	7,1	1,45	11,5	14,7	10,9	14,8	12,7	4,6	18,3

Таблица 4

Погрешности компенсации для девяти лопаток при двух оптимальных вариантах параметров измерений

Вариант распределения; S_N	Погрешность компенсации, мкм, лопаток								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Для корыта									
$S_{\text{опт1}}$; 30	15,8	11,4	12,4	16,7	16,6	13,0	18,0	23,4	14,8
$S_{\text{опт2}}$; 30	22,9	15,5	17,5	20,9	23,0	18,4	24,4	29,7	21,1
Для спинки									
$S_{\text{опт1}}$; 20	21,0	8,6	11,0	14,7	18,1	6,9	7,8	23,8	25,5
$S_{\text{опт1}}$; 30	7,3	5,0	4,7	7,7	5,4	7,3	6,7	4,1	6,2
$S_{\text{опт2}}$; 30	13,2	15,2	17,1	17,1	13,6	20,7	16,0	6,8	11,7

Далее приведены результаты расчета компенсации радиуса измерительного наконечника. В табл. 2 представлены погрешности компенсации измерений поверхностей спинки и корыта лопатки компрессора ГТД при равномерном распределении точек.

Из табл. 2 следует, что погрешности измерений спинки существенно выше, чем корыта лопатки при 20—30 точках контроля в сечениях, однако погрешности становятся близкими при 30 и более контролируемых точках.

В табл. 3 приведены результаты погрешностей измерений тех же лопаток, но с использованием методики оптимизации.

Таким образом можно заключить, что при измерении корыта лопатки предложенный метод дает более точные (на 6—40 %) результаты, снижая погрешность при 20—40 точках контроля. На спинке, где кривизна выше, благодаря предложенному методу можно сократить количество точек измерения с 40 (равномерное распределение) до 30 при использовании полученной схемы расстановки точек. На рис. 2 изображены зависимости средних значений погрешностей измерений от общего количества точек для равномерного и предлагаемого оптимального распределений измеряемых точек по поверхностям лопаток.

Из S полученных вариантов измерений параметров для серии реализаций профилей E нужно выбрать такой, который обеспечит точность контроля для всех лопаток: например, вариант $S_{\text{опт1}}$ с наименьшей погрешностью F или вариант $S_{\text{опт2}}$ со средними значениями координат расположения точек оптимизации. Результаты вычислений при этих вариантах приведены в табл. 4.

Выводы. Предложена методика оптимизации измерений поверхностей сложной формы серии деталей одного наименования. Методика была применена для оптимизации измерений отдельных профилей и сложных поверхностей спинки и корыта лопатки компрессора ГТД. Результаты показали, что использование оптимизации повышает до 30 % точность измерений при уменьшении количества измеряемых точек по сравнению с равномерным распределением.

Методику предпочтительно использовать при измерениях параметров сложных поверхностей, имеющих значительную кривизну.

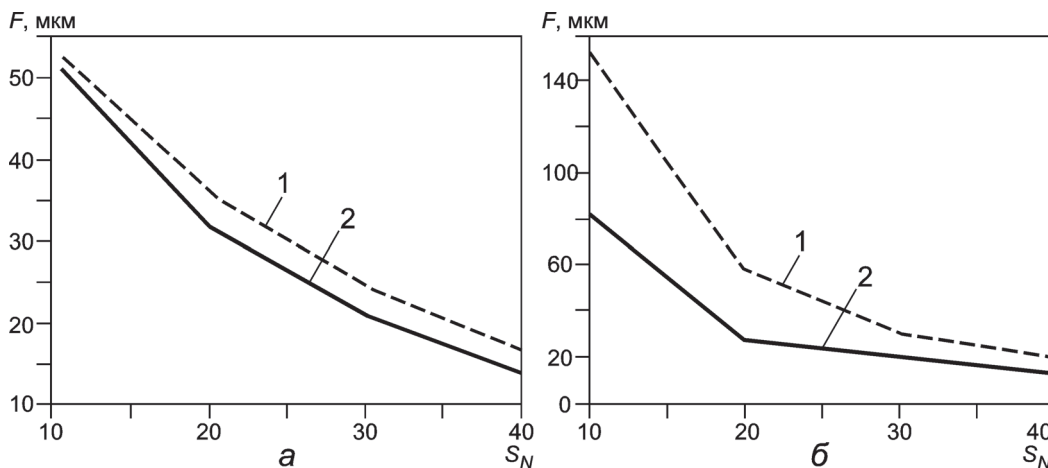


Рис. 2. Погрешности измерений поверхности корыта (а) и спинки (б) пера лопатки: линии 1, 2 соответствуют равномерному распределению и по предложенной методике; S_N — количество измеряемых точек

Литература

1. ГОСТ Р 8.563—2009. ГСИ. Методики (методы) измерений.
2. Li Y., Gu P. Freeform surface inspection techniques — state of the art review // Computer Aided Design. 2004. N. 36(13). P. 1395—1417.
3. Pakh H. Je. a. Integrated precision inspection system for manufacturing of moulds having CAD defined features // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 1995. N. 10. P. 198—207.
4. Ainsworth I., Ristic M., Brujic D. CAD-based measurement path planning for freeform shapes using contact probes // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 2000. N. 16. P. 23—31.

5. Obeidat S. M., Raman S. An intelligent sampling method for inspecting freeform surfaces // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 2009. N. 40. P. 1125—1136.
6. Rajamohan G., Shungam M. S., Samuel G. L. Practical measurement strategies for verification of freeform surfaces using coordinate measuring machines // Metrology and Measurement Systems. 2011. N. 2. P. 209—222.
7. Бородачев Н. А. и др. Точность производства в машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1973.
8. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб: Питер, 2004.
9. Gill P., Murray W., Wright M. Practical optimization. San Francisco: Academic Press, 1981.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Пер. с англ. под ред. И. Г. Арамановича. М.: Изд-во «Наука», 1970.
11. Powell M. J. D. A fast algorithm for nonlinearly constrained optimization calculations, numerical analysis // Lecture Notes in Mathematics [Электрон. ресурс] www.springer.com (дата обращения 01.03.2014 г.).
12. Menq C. H., Yau H. T., Lai G. Y. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection // IEEE Trans. Robotics Automation. 1992. N. 8(2). P. 268—78.

Дата принятия 26.11.2014 г.

004.932.2

Метод оценки составляющих погрешности измерения линейных размеров объектов в автоматизированных системах компьютерной микроскопии

А. Н. ПРОНИЧЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия, e-mail.ru: apronichev@bk.ru

Предложен метод оценки составляющих погрешности измерений линейных размеров объектов в автоматизированных системах компьютерной микроскопии с применением объект-микрометра и автоматизированной обработки изображений.

Ключевые слова: компьютерная микроскопия, обработка изображений.

A method for estimating the components of linear dimensions of object measurement error in automated systems of computer microscopy using the object-micrometer and automated image processing has been suggested.

Key words: computer microscopy, image processing.

В настоящее время широкое применение при измерениях характеристик объектов в материаловедении, биологии и медицине находят автоматизированные системы ком-

пьютерной микроскопии (АСКМ) [1—3]. Автоматизированное распознавание объектов в информационно-измерительной системе строится на измерении ряда их признаков [4, 5],