

## **Экспериментальный анализ погрешности измерения триангуляционного метода в задачах технологического контроля профиля поверхности сложной формы**

© Н.В. Барышников<sup>1</sup>, Д.Г. Денисов<sup>1</sup>,  
И.В. Животовский<sup>1</sup>, В.Я. Менделеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup> ОИВТ РАН, Москва, 125412, Россия

*Рассмотрены экспериментальные исследования точностных характеристик триангуляционного метода при измерении топографии поверхности технологических изделий сложной формы, в частности лопаток газотурбинных двигателей. Проанализированы выбор и влияние конструктивных характеристик системы, углов падения и отражения лазерного излучения, формы и среднеквадратического отклонения параметра шероховатости поверхности. Исследовано влияние ориентации канавок микроструктуры профиля эталонного образца на экспериментальную системную погрешность измерения на длине волны лазерного излучения 0,633 мкм. Предложен метод цифровой обработки зарегистрированного изображения профиля поверхности, позволяющий минимизировать погрешности измерения координат энергетического центра тяжести лазерного пятна подсвета и выделять четкие контуры детали на фоне спекл-шумов и шумов электронного тракта. Приведены результаты экспериментальных исследований разработанного лабораторного стенда, а также точностные границы его применения в задачах технологического контроля.*

**Ключевые слова:** лазер, измерительная система, триангуляционный метод, форма поверхности, шероховатость поверхности, погрешность измерения, алгоритм, цифровая обработка, изображение, лопатка, газотурбинный двигатель.

Для современных отраслей машиностроения характерна интенсивная разработка и производство деталей сложной формы с повышенными эксплуатационными показателями. Надежность и долговечность таких технологических изделий определяются их функциональными параметрами, к числу которых относятся качество формы и микрогеометрия профилей поверхностей. Например, особые требования предъявляются к форме профиля и шероховатости поверхности газотурбинных лопаток авиационных двигателей, раскатных дисков несущих конструкций двигателей, компрессоров авиадвигателей, подшипников механических станков, винтов двигателей подводных лодок.

В авиационном двигателестроении особое внимание уделяется высокой технологичности и эксплуатационной надежности изделий.

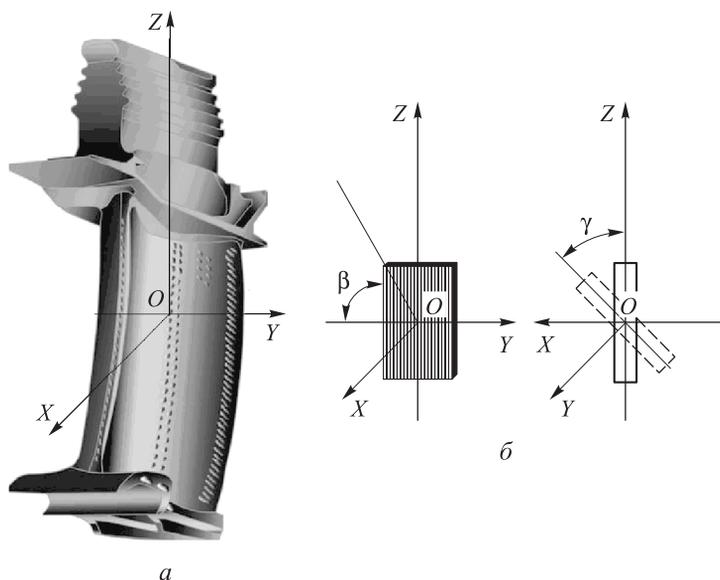
К таким изделиям относятся диски и лопатки турбин. Изготовление дисков осуществляется методом изотермической раскатки титановых сплавов при температурах до 1100 °С [1]. Серьезной проблемой при изготовлении дисков турбин является получение равномерности профиля и толщины диска с точностью до 0,1...0,3 мм в процессе раскатки. Если точность изготовления лопаток газотурбинных двигателей IV поколения составляет приблизительно 0,1 мм, то для двигателей V поколения она должна быть не ниже 0,03 мм [2]. Это, в свою очередь, предъявляет требование к методам контроля формы лопаток с точностью не ниже 0,01 мм. Важным фактором, определяющим эксплуатационные характеристики лопаток, является шероховатость поверхности в диапазоне значений параметра  $Ra \approx 0,1...0,5$  мкм. Контроль такой шероховатости непосредственно в процессе изготовления на роботах-станках также представляет серьезную проблему. Решение этих проблем представляется возможным с помощью оптических дистанционных и неразрушаемых методов. Исследования и разработки в этом направлении активно ведутся за рубежом [3, 4].

Применение триангуляционной системы измерения отмечено в задачах восстановления трехмерной структуры объектов для многоканальных систем регистрации с использованием структурированной подсветки [5]. Достигнутая погрешность измерения составляет 10 мкм на дальности 0,5 м. Поэтому задачи контроля изделий, имеющих сложную конфигурацию профиля, разработка методов и систем контроля являются актуальными в различных отраслях промышленности.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование триангуляционного метода измерения профиля сложной формы поверхности технологического изделия типа лопатки газотурбинных авиационных двигателей (рис.1, а).

В основе принципа работы лазерных триангуляционных измерителей лежит метод определения расстояния между лоцируемым объектом контроля и приемником излучения канала регистрации с использованием тригонометрических соотношений в треугольнике, образованном ветвями каналов подсвета и регистрации изображения, а также расстоянием между ними — базой.

С этой целью в научно-исследовательской лаборатории спроектирован лабораторный стенд прибора и проведены предварительные измерения на эталонных образцах с параметром шероховатости  $Rq \approx 0,5$  мкм. В результате экспериментальных исследований определены точностные границы триангуляционного метода измерения, разработана лабораторная методика калибровки и юстировки системы, что позволило повысить точность измерения профиля поверхности изделия сложной формы.

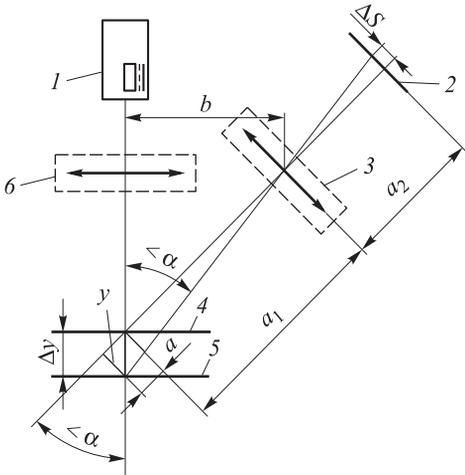


**Рис. 1.** Внешний вид (а) и модельное представление формы и ориентации поверхностных неоднородностей профиля лопатки газотурбинных двигателей для проведения экспериментальных исследований на основе эталонных образцов шероховатости (б)

Сложную форму рельефа поверхности лопатки (см. рис. 1, а) в эксперименте имитировали последовательным наклоном и смещением эталона шероховатости относительно осей системы координат (рис. 1, б). Помимо определения влияния ориентации формы лопатки на размер зондирующего пятна подсвета исследовали также влияние микроструктуры профиля поверхности за счет поворота канавок эталона шероховатости вокруг собственной оси.

Для проведения исследований и разработки макетного образца прибора для контроля формы профиля поверхности лопатки предложена структурно-функциональная схема лазерного триангуляционного измерителя (рис. 2). В состав датчика входит He-Ne-лазер ( $\lambda = 0,6328$  мкм) с формирующей оптической системой, объект измерения, фотоприемное устройство на основе ПЗС-матрицы и проекционной оптической системы. Данный прибор по измерению дальности до плоскости объекта определяет изменение его формы при смещении сфокусированной точки лазерного излучения на поверхности объекта. Вычисление смещения пятна подсвета в плоскости ПЗС-матрицы проводится с помощью тригонометрических соотношений в треугольнике, образованном плечами осветительной и измерительной ветвей, а также расстоянием (базой) между фотоприемником и источником излучения.

На основе предложенной функционально-оптической схемы получено расчетное соотношение, описывающее смещение энергетиче-



**Рис. 2.** Функционально-оптическая схема лазерного триангуляционно-го измерителя профиля поверхности:

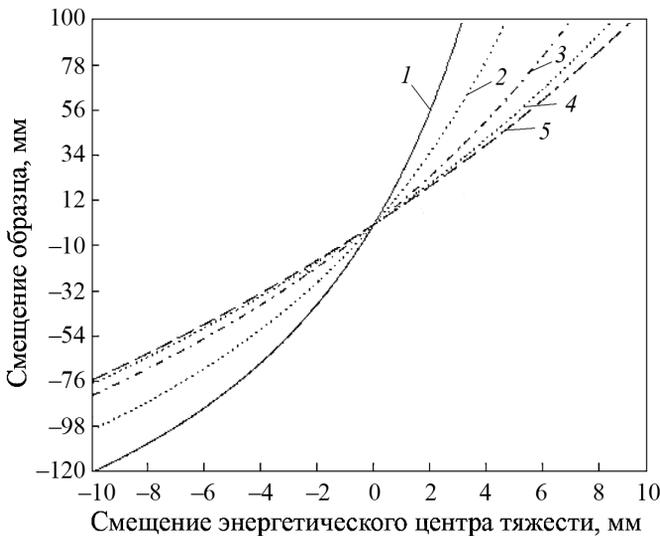
1 — He-Ne-лазер; 2 — плоскость регистрации изображения; 3 — проекционный объектив; 4, 5 — положения плоскостей объекта; 6 — формирующая оптическая система

ского центра зондирующего пятна подсвета в плоскости ПЗС-камеры ( $\Delta S$ ), обусловленное смещением эталонного образца сравнения ( $\Delta y$ ):

$$\Delta y = \frac{\Delta S a_1}{a_2 \sin \alpha - \Delta S \cos \alpha}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол триангуляции между оптическими осями приемного и передающего каналов;  $a_1$ ,  $a_2$  — расстояния от источника излучения до линзы и от линзы до плоскости регистрации изображения.

Анализ выражения (1) позволяет определить степень влияния конструктивных параметров (база, угол триангуляции, габариты системы, определяемые линейными отрезками  $a_1$  и  $a_2$ ) на точностные характеристики системы (рис. 3).



**Рис. 3.** Функциональная зависимость смещения образца от смещения энергетического центра тяжести:

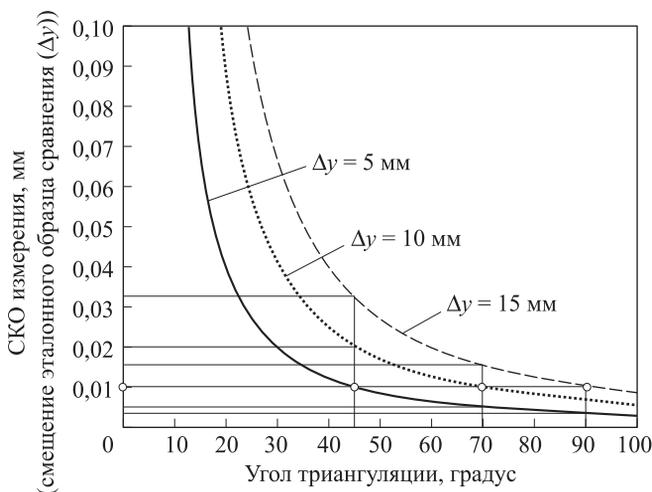
1–5 —  $\alpha$  равно 20, 30, 35, 45 и 50° соответственно

В соответствии с выражением (1) теоретическая оценка среднеквадратической ошибки (СКО) измерения в зависимости от распределенных ошибок, входящих в данное выражение, определяющих конструктивные характеристики триангуляционного измерителя, имеет вид

$$\sigma_{\Delta y} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta y}{\partial \alpha}\right)_{\alpha}^2 (\partial \alpha)^2 + \left(\frac{\partial \Delta y}{\partial a_1}\right)_{a_1}^2 (\partial a_1)^2 + \left(\frac{\partial \Delta y}{\partial a_2}\right)_{a_2}^2 (\partial a_2)^2}, \quad (2)$$

где  $\frac{\partial \Delta y}{\partial \alpha}$ ,  $\frac{\partial \Delta y}{\partial a_1}$ ,  $\frac{\partial \Delta y}{\partial a_2}$  — частные производные;  $\partial \alpha$ ,  $\partial a_1$ ,  $\partial a_2$  — распределенные погрешности измерения конструктивных параметров системы.

На рис. 4 представлены графические зависимости СКО измерения от угла триангуляции.



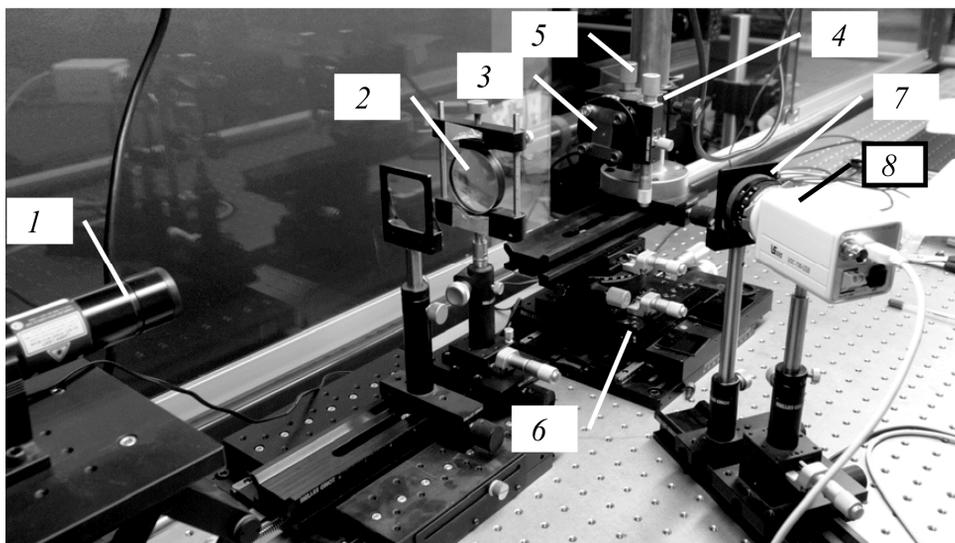
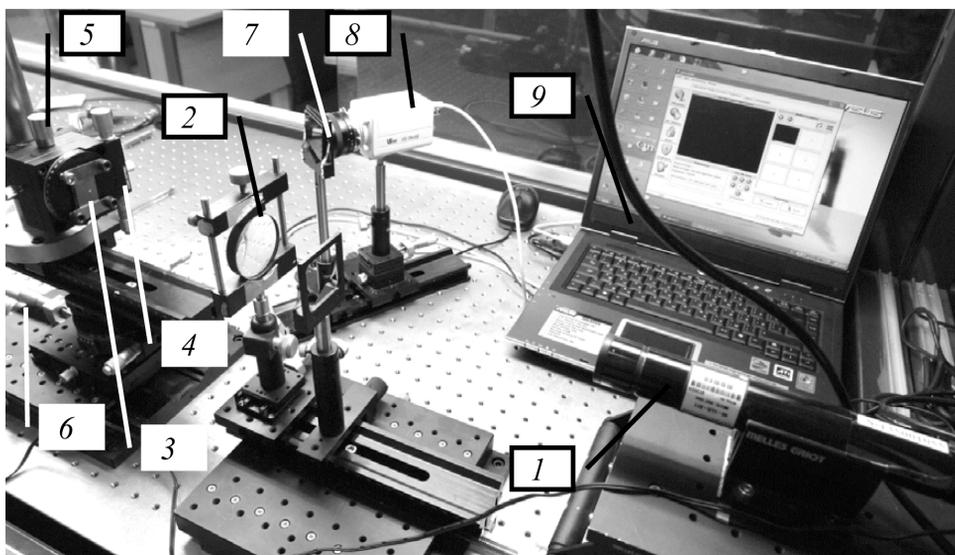
**Рис. 4.** Теоретическая зависимость СКО измерения от угла триангуляции (точками выделены значения СКО, соответствующие требованиям для лопаток газотурбинных двигателей V поколения)

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что минимальная погрешность измерения может быть достигнута при угле триангуляции  $90^\circ$ , что практически не реализуемо в реальной системе измерения. Однако требуемая теоретическая погрешность измерения  $0,01$  мм может быть достигнута при смещении образца на  $5$  мм при угле триангуляции  $45^\circ$ .

Экспериментальная часть исследования посвящена анализу погрешностей измерения триангуляционного метода в случаях различной угловой ориентации  $\beta$  профилей канавок образца шероховатой поверхности, различной угловой ориентации  $\gamma$  поверхности образца

относительно плоскости падения освещающего пучка и в зависимости от величины истинного смещения  $\Delta u_{\text{ист}}$  образца для разных углов триангуляции  $\alpha$  (см. рис. 1 и 2).

Внешний вид экспериментального стенда приведен на рис. 5. Излучение лазерного источника 1 фокусируется формирующей оптической системой 2 на номинальном расстоянии 160 мм на поверхности



**Рис. 5.** Внешний вид экспериментального стенда:

1 — источник излучения — He-Ne-лазер; 2 — формирующая оптическая система; 3 — образец поверхности с направленной шероховатостью; 4 — ротатор для имитации различных углов наклона профиля  $\beta$  направленной шероховатости; 5 — угловая каретка для имитации углов наклона образца  $\gamma$ ; 6 — каретка для высокоточного линейного перемещения  $\Delta u$  образца; 7 — набор нейтральных светофильтров; 8 — ПЗС-камера с проекционным объективом; 9 — ноутбук

образца 3, имеющем однонаправленное направление профиля канавок шероховатости. Образец 3 закреплен в ротаторе 4, позволяющем поворачивать образец на требуемый угол  $\beta$  и тем самым менять ориентацию канавок направленного профиля шероховатой поверхности. Угловая каретка 5, обеспечивающая последовательный наклон образца на угол  $\gamma$ , предназначена для имитации сложной формы контролируемой поверхности. Высокоточная линейная каретка 6 задает требуемое известное смещение образца, используемое при анализе погрешности триангуляционного метода. Приемный канал, состоящий из набора нейтральных светофильтров 7 и ПЗС-камеры с проекционным объективом 8, регистрирует изображение лазерного пятна на образце шероховатой поверхности. Зарегистрированное видеоизображение в цифровом виде передается на ноутбук 9.

По серии изображений при различных точно заданных смещениях  $\Delta y$  вычисляются линейные смещения спроецированных на ПЗС-матрицу изображений лазерных пятен. Координаты положения пятна вычисляются с помощью алгоритма определения энергетического центра тяжести изображения с погрешностью 0,1 от размера фоточувствительного элемента [6], что составляет в плоскости ПЗС-матрицы 0,0008 мм. По смещению  $\Delta S_i$  центров пятен на ПЗС-матрице для различных заданных с помощью высокоточной каретки истинных смещений  $\Delta y_{ист\ i}$  по выражению (1), определяемому триангуляционным методом, вычисляется измеренное значение смещения  $\Delta y_{изм\ i}$ . Погрешность  $\delta y_i$  измеренного  $i$ -го смещения образца определяется разностью измеренного и истинного смещений:

$$\delta y_i = \Delta y_{изм\ i} - \Delta y_{ист\ i}. \quad (3)$$

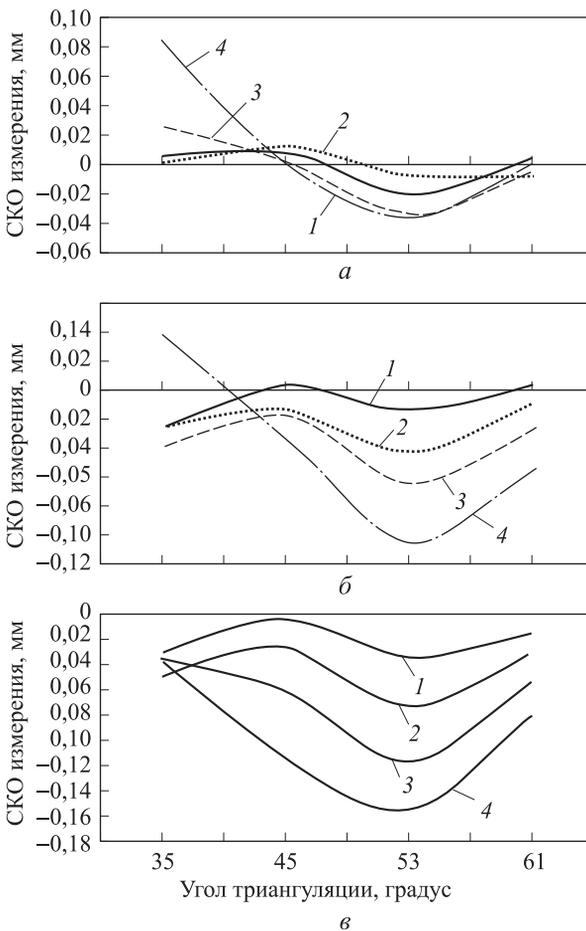
Для уменьшения погрешности измеренного смещения  $\Delta y_{изм}$  образца проводилась калибровка измерительного стенда в целях точного определения параметров триангуляционной схемы измерений (см. рис. 2 и выражение (1)), т. е. определялся угол триангуляции  $\alpha$  и параметры  $a_1$  и  $a_2$  проекционной системы. Для этого проводился ряд измерений смещений  $\Delta S_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) пятна в плоскости ПЗС при точно известных смещениях  $\Delta y_{ист\ i}$  образца с изотропной поверхностью. Полученная система уравнений

$$\begin{aligned} \Delta y_{ист1} &= a_1 \Delta S_1 / (a_2 \sin \alpha - \Delta S_1 \cos \alpha); \\ \Delta y_{ист2} &= a_1 \Delta S_2 / (a_2 \sin \alpha - \Delta S_2 \cos \alpha); \\ \Delta y_{ист3} &= a_1 \Delta S_3 / (a_2 \sin \alpha - \Delta S_3 \cos \alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

решена численно с помощью метода минимизации квадрата ошибок, определенные параметры  $a_1$ ,  $a_2$  и  $\alpha$  использовались в рабочем выражении (1) триангуляционного метода измерений.

В качестве высокоточной линейной каретки использовалась каретка Melles Griot с погрешность перемещения 0,005 мм. Проекционный объектив имеет фокусное расстояние  $f' = 25$  мм. Черно-белая телевизионная ПЗС-камера высокого разрешения VSC-756-USB фирмы «ЭВС» с размерами элемента 0,0086×0,0083 мм имеет разрешение 582×752 элементов.

Угол ориентации  $\beta$  канавок профиля шероховатости задавали равным 0, 45 и 90°. Угол  $\beta = 0$  соответствовал вертикальной ориентации однонаправленного профиля канавок шероховатой поверхности. Угловой наклон образца шероховатой поверхности в вертикальной плоскости задавался последовательностью углов наклона  $\gamma_i$ : 0, 5, 10 и 15°. Линейное смещение  $\Delta u$  образца вдоль оптической оси пучка



**Рис. 6.** Ошибки измерения смещения при горизонтальной ориентации профиля канавок шероховатой поверхности ( $\beta = 0$ ) и различных углах наклона образца в вертикальной плоскости:

$a$  —  $\gamma = 0$ ,  $б$  —  $\gamma = 10^\circ$ ,  $в$  —  $\gamma = 15^\circ$ ; 1–4 —  $\Delta S$  равно 5, 10, 15 и 20 мм соответственно

подсвета задавалось дискретным рядом «истинных» значений  $\Delta u_{\text{ист } i}$ : 0, 5, 10, 15 и 20 мм.

Результаты экспериментальных измерений погрешности триангуляционного метода при различных вариациях параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  схемы (см. рис. 1 и 2) приведены на рис. 6.

Из приведенных данных следует зависимость СКО измерения от взаимной ориентации направления профиля канавок шероховатой поверхности и плоскости падения луча. Видно, что при углах наклона образца  $\gamma = 0$  и  $10^\circ$  при горизонтальной ориентации профиля шероховатой поверхности ( $\beta = 0$ ) максимальная погрешность измерения меньше, чем при вертикальной ориентации профиля ( $\beta = 90^\circ$ ).

Увеличение погрешности измерения в случае вертикальной ориентации профиля обусловлено эффектом рассеяния излучения на ориентированной структуре поверхности. Ориентированный профиль шероховатой поверхности можно представить как дифракционную решетку, и в этом случае плоскость дифракции будет лежать в плоскости падения луча. Наличие данного эффекта приводит к перераспределению энергии в пятне, регистрируемом ПЗС-матрицей, и тем самым к увеличению погрешности измерений. Таким образом, можно сделать вывод, что триангуляционный метод наиболее эффективен при ориентации профиля шероховатой поверхности параллельно плоскости падения луча.

Анализ данных на рис. 6 показывает, что относительно низкие и постоянные значения погрешностей  $\delta \Delta u < 0,02$  мм при углах наклона  $\gamma$  образца 0 и  $10^\circ$  для смещений  $\Delta S = 5, 10, 15$  и 20 мм лежат в диапазоне значений углов триангуляции  $\alpha = 38 \dots 45^\circ$ .

В результате анализа экспериментальных данных установлена зависимость роста погрешности измерения при увеличении угла наклона  $\gamma$  образца. Так, при увеличении углов наклона  $\gamma$  образца от 0 до  $15^\circ$  погрешность измерения увеличивается более чем в 3 раза для углов триангуляции  $\alpha = 38 \dots 45^\circ$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бердин В.К. *Вестник УГАТУ*, 2011, т. 15, № 4, с.175–180.
- [2] Каблов Е.Н. *Вестник Российской Академии наук*, 2012, т. 82, № 5, с. 520–530.
- [3] D'Apuzzo N. *Proceedings of SPIE*, 2006, vol. 6056–605605
- [4] Junhui H., Zhao W., Jianmin G., Yu Y. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7656, p. 76560L.
- [5] Горевой А.В., Колочкин В.Я. Методы восстановления трехмерной структуры объектов для многоканальных систем регистрации с использованием структурированной подсветки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, вып. 12(2012), с. 185–201.
- [6] Соломатин В.А., Якушенков Ю.Г. *Известия вузов*, 1986, № 9. С. 62–69.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Животовский И.В., Менделеев В.Я. Экспериментальный анализ погрешности измерения триангуляционного метода в задачах технологического контроля профиля поверхности сложной формы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/912.html>

**Барышников Николай Васильевич** — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э.Баумана. e-mail: baryshnikov@bmstu.ru

**Денисов Дмитрий Геннадьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э.Баумана. e-mail: denisov\_dg@mail.ru

**Животовский Илья Вадимович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э.Баумана. e-mail: ivj@bmstu.ru

**Менделеев Владимир Яковлевич** — канд. техн. наук, заведующий лабораторией Объединенного института высоких температур РАН (ОИВТ РАН). e-mail: v\_mendeleyev@list.ru