



УДК 620.179.18, 620.179.12

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА В ЗАДАЧЕ РЕГИСТРАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Е.И. Иванова<sup>а</sup>, А.В. Федоров<sup>а</sup>, Н.В. Астрединова<sup>а</sup>, А.В. Ильинский<sup>а</sup>, Д.С. Ашихин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: zhmenkax@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 10.05.17, принята к печати 19.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-620-627

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Иванова Е.И., Федоров А.В., Астрединова Н.В., Ильинский А.В., Ашихин Д.С. Оценка возможности применения оптического метода в задаче регистрации кинематических характеристик процесса динамического индентирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 620–627. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-620-627

### Аннотация

**Предмет исследования.** Предложен стереоскопический метод технического зрения для регистрации кинематических характеристик процесса динамического индентирования при определении физико-механических свойств материалов. Предложенный метод позволяет с высокой точностью определять значения скорости движения индентора. **Метод.** Метод основан на применении двух высокоскоростных видеокамер, неподвижно закрепленных на одной плоской платформе. Камеры позволяют вести синхронную запись процесса индентирования. Объективы и ориентация камер в стереосистеме обеспечивают пересечение полей зрения и требуемую глубину резкости изображаемого пространства. Измерение скорости движения производится методом триангуляции. Дистанция между сопряженными точками регистрируемого объекта на стереоизображениях обратно пропорциональна дистанции между парой камер и соответствующей точкой объекта в трехмерном пространстве. На основе анализа изображений, получаемых разнесенными в пространстве камерами, определяются координаты точки объекта. **Основные результаты.** Экспериментальная установка состояла из двух высокоскоростных монохромных видеокамер Evercam 4000-32-M, жестко закрепленных посредством стереорига. Синхронная запись велась со скоростью 4000 кадров/с с разрешением 1280×860 пикселей. Индентор был выполнен в виде стального шара массой 230 г диаметром 38 мм и падал на алюминиевый диск толщиной 10 мм с высоты 310 мм. Видеоизображения с камер переносились для обработки в персональный компьютер. Анализ полученных данных осуществлялся с помощью специально написанного программного модуля в системе MATLAB. Чувствительность предложенного метода позволила уверенно определять значения максимальной скорости полета стального шара 2,39 м/с и скорости отскока 1,2 м/с. Случайная составляющая погрешности метода не превысила 2,5%. **Практическая значимость.** Развитие данного подхода позволит создавать высокоточные датчики динамического индентирования. Результаты исследований могут представлять интерес для специалистов, занимающихся метрологическим обеспечением и неразрушающим контролем материалов и изделий в различных областях машиностроения и строительства.

### Ключевые слова

динамическое индентирование, физико-механические свойства, индентор, стереоскопическая система, триангуляционный метод, стереоизображения

## OPPORTUNITY ESTIMATION OF OPTICAL METHOD APPLICATION IN PROBLEM OF KINEMATIC CHARACTERISTICS REGISTRATION OF DYNAMIC INDENTING PROCESS

E.I. Ivanova<sup>а</sup>, A.V. Fedorov<sup>а</sup>, N.V. Astredinova<sup>а</sup>, A.V. Ilinskiy<sup>а</sup>, D.S. Ashikhin<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: zhmenkax@mail.ru

### Article info

Received 10.05.17, accepted 19.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-620-627

Article in Russian

**For citation:** Ivanova E.I., Fedorov A.V., Astredinova N.V., Ilinskiy A.V., Ashikhin D.S. Opportunity estimation of optical method application in problem of kinematic characteristics registration of dynamic indenting process. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 620–627 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-620-627

**Abstract**

**Subject of Research.** A stereoscopic method of technical vision is proposed for recording the kinematic characteristics of the dynamic indentation process in determining the physico-mechanical properties of materials. The proposed method makes it possible to determine the values of the indenter motion speed with high accuracy. **Method.** The method is based on the use of two high-speed video cameras immovably fixed on one flat platform. Cameras allow for synchronous recording of the indentation process. The objectives and orientation of cameras in the stereo system provide intersection of the visual fields and the required depth of the image space field. Measurement of the movement speed is performed by triangulation method. The distance between the conjugate points of the recorded object on the stereo images is inversely proportional to the distance between the pair of cameras and the corresponding point of the object in the three-dimensional space. Based on the analysis of images obtained by spatially separated cameras, the coordinates of the object point are determined. **Main Results.** The experimental setup consisted of two high-speed monochrome camcorders Evercam 4000-32-M, rigidly fixed through stereo. Synchronous recording was kept at a speed of 4000 frames/s with a resolution of  $1280 \times 860$  pixels. The indenter was made in the form of a steel ball with a mass of 230 g with a diameter of 38 mm and fell onto an aluminum disk 10 mm thick from a height of 310 mm. Video images from cameras were transferred to a personal computer for processing. The analysis of the obtained data was carried out in the MATLAB system with the help of a specially written software module. The sensitivity of the proposed method made it possible to determine confidently the values of the maximum approach speed of a steel ball equal to 2.39 m/s and a rebound velocity of 1.2 m/s. The random component of the method error did not exceed 2.5%. **Practical Relevance.** The development of this approach will enable to create high-precision sensors of dynamic indentation. The research results may be of interest to specialists involved in metrological support and non-destructive testing of materials and products in various fields of engineering and construction.

**Keywords**

dynamic indentation, physical and mechanical properties, indenter, stereoscopic system, triangulation method, stereo images

**Введение**

К ответственным изделиям, применяющимся в авиа- и ракетостроении, судостроении и других областях промышленности, предъявляются высокие требования по прочности и надежности. Одним из наиболее перспективных методов определения физико-механических характеристик материалов является метод динамического индентирования (ДИ). Отличительными особенностями метода являются его простота в применении, портативность, применимость для широкого спектра материалов – от металлов до полимеров. ДИ является безобразцовым методом неразрушающего контроля, что позволяет оперативно получать информацию о физико-механических свойствах изделий, не выводя их из эксплуатации [1–8]. В целях эффективного внедрения метода ДИ в практику неразрушающего контроля необходимо решить ряд весьма актуальных и сложных научно-исследовательских задач, одна из которых заключается в разработке и применении устройств, которые позволяют максимально точно и без искажений регистрировать движение индентора в процессе его ударного взаимодействия с испытуемым материалом [9]. Анализ научно-технической литературы [1–12] показывает, что исследования в данной сфере при решении описанной задачи осуществлялись с помощью акселерометров, а также реализацией магнитоиндукционного и оптических методов в устройствах регистрации скорости движения индентора. Использование акселерометров сопряжено с влиянием присоединенной к индентору массы самого датчика, которая неизбежно будет искажать процесс контактного взаимодействия. Также данный подход не позволяет создавать портативные датчики ДИ. В настоящее время широкое применение в практике нашли магнитоиндукционные датчики, однако такой метод позволяет лишь косвенно определять скорость движения индентора. Применение магнитоиндукционных датчиков имеет ряд недостатков: каждый датчик является уникальным, это связано с тем, что коэффициент пропорциональности, поправочный для вычисления скорости движения индентора, определяется эмпирическим путем и для каждого датчика имеет свое значение; магнитоиндукционные датчики подвержены влиянию электромагнитного шума, который сказывается на точности измерений; магнитоиндукционные датчики, применяющиеся в ДИ, обладают низкой надежностью и часто выходят из строя.

Возможность применения оптических средств регистрации скорости движения индентора в настоящее время изучена слабо. Это связано с высокой стоимостью данных средств. Несмотря на это, оптический метод является одним из самых точных методов неразрушающего контроля, а развитие этой области техники делает все более доступным его применение. Преимущества стереоскопических измерений перед другими видами оптических измерений – бесконтактность, широкий выбор элементной базы, относительная простота реализации и интерпретации результатов, наличие результатов теоретических и экспериментальных исследований его метрологических возможностей [13].

Целью работы является оценка возможности определения кинематических характеристик движения индентора в процессе ударного контактного взаимодействия с материалом на основе анализа стереоизображений, полученных парой высокоскоростных видеокамер.

**Сущность метода динамического индентирования**

Сущность метода ДИ состоит в регистрации процесса ударного контактного взаимодействия индентора с поверхностью испытуемого материала. Рассмотрим подробнее процесс ДИ на примере датчика с гравитационным разгоном индентора и магнитоиндукционной системой регистрации его кинематиче-

ских характеристик (рис. 1, а). В процессе ДИ датчик устанавливается на поверхность испытуемого материала, плотно прижимается, и проводится измерение. Для этого нажимается пусковая кнопка и отпускается. При нажатии на пусковую кнопку механизм спуска освобождает индентор из устройства фиксации, и под действием силы тяжести индентор начинает криволинейное движение из положения I в положение II (рис. 1, а) по направлению к поверхности испытуемого материала. При этом закрепленный на инденторе постоянный магнит наводит в катушке индуктивности ЭДС, пропорциональную скорости движения индентора. Далее происходит соударение с поверхностью испытуемого материала (точка 2, рис. 1, б) – индентор имеет максимальную скорость. Под действием силы контактного взаимодействия индентор внедряется в материал, преодолевая силы сопротивления деформируемого материала (точка 3, рис. 1, б). При достижении нулевой скорости, вследствие восстановления структуры материала после упругой деформации в месте удара, индентор отскакивает (точка 4, рис. 1, б – точка отрыва индентора), при этом скорость индентора увеличивается до некоторого значения (точка 5, рис. 1, б). После отскока индентор возвращается на поверхность материала с гораздо меньшей скоростью и энергией и останавливается в точке 6 (рис. 1, б).

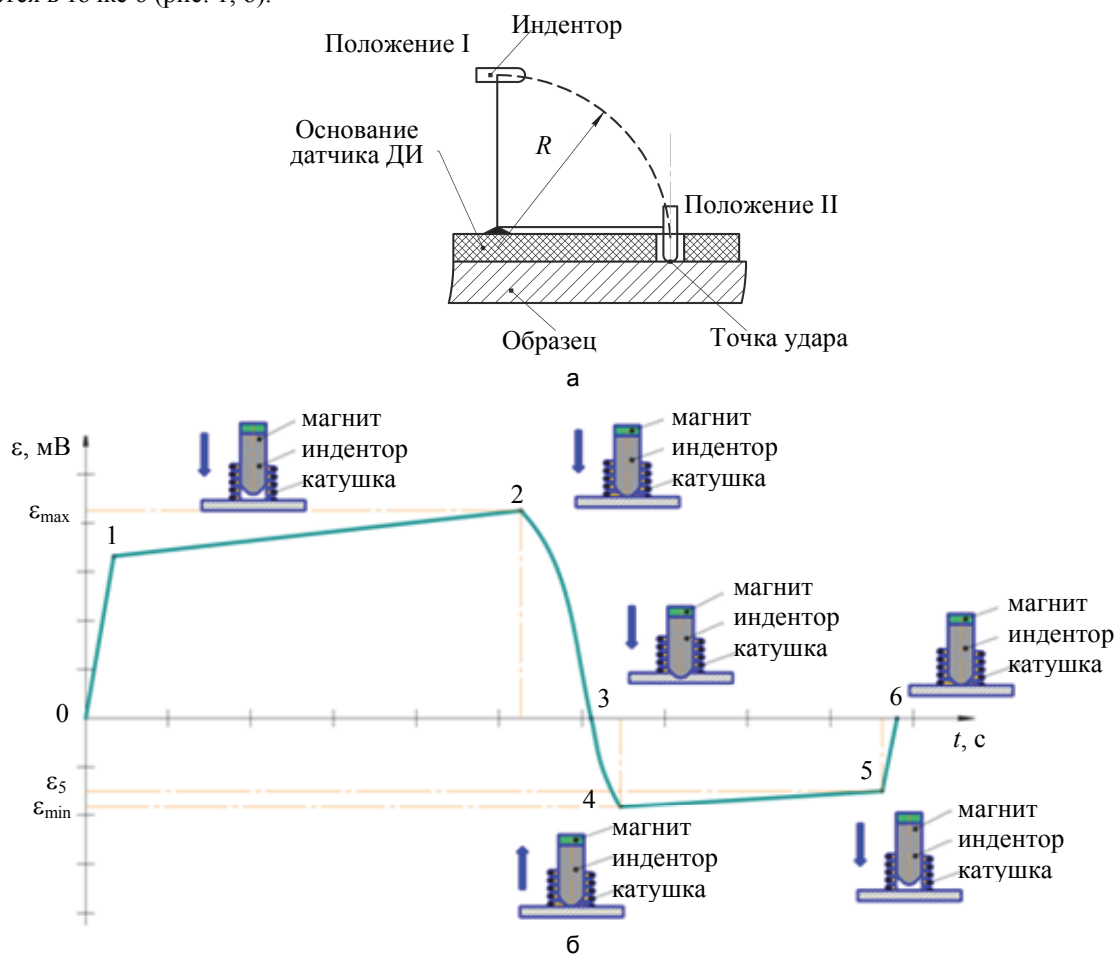


Рис. 1. Принципиальная схема работы метода динамического индентирования: схема датчика динамического индентирования с гравитационным криволинейным разгоном (а); график движения индентора (б)

В процессе индентирования в катушке регистрируется ЭДС индукции, наводимая магнитом, закрепленным на инденторе. Значение ЭДС  $\varepsilon$  пропорционально скорости движения индентора и вычисляется по формуле [9]

$$V(t) = \frac{\varepsilon(t)}{k}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Согласно ГОСТ Р 56474-2015<sup>1</sup>, результатом индентирования является диаграмма вдавливания – зависимость контактного усилия  $P$  от глубины вдавливания индентора  $h$ . Точность определения данных

<sup>1</sup>ГОСТ Р 56474-2015 «Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования». Введ.01.01.2016. М.: Стандартинформ, 2015. 22 с.

параметров зависит от точности измерения скорости движения индентора, а согласно формуле (1) – от точности определения коэффициента пропорциональности  $k$ , который подбирается эмпирическим путем, а его численное значение является индивидуальным для каждого датчика. Также модель расчета коэффициента  $k$  непосредственно определяется схемой разгона индентора.

Повышение точности и достоверности рассмотренного метода оценки физико-механических свойств может быть достигнуто несколькими путями: программным, за счет доработки алгоритмов фильтрации и обработки первичной измерительной информации; конструктивным, за счет разработки новых конструкций датчиков, позволяющих нивелировать недостатки метода; методическим, за счет применения других методов и средств регистрации процесса контактного взаимодействия.

### Оптический метод определения скорости индентора

Для стереоскопических измерений требуется использование двух камер, работающих синхронно, с помощью которых получают два изображения одного и того же объекта под двумя различными ракурсами. Измерения производятся при помощи метода триангуляции. Дистанция между сопряженными точками регистрируемого объекта на стереоизображениях обратно пропорциональна дистанции между парой камер и соответствующей точкой объекта в трехмерном пространстве. Таким образом, на основе анализа изображений, полученных разнесенными в пространстве камерами, можно вычислить координаты точки объекта в трехмерном пространстве [13–18].

В ходе работы изготовлена экспериментальная установка из двух высокоскоростных монохромных видеокамер Evercam 4000-32-M, жестко закрепленных посредством стереорига на штативе и позволяющих вести синхронную запись со скоростью 4000 кадров/с при разрешении 1280×860 пикселей (рис. 2). В работе использованы объективы с фиксированным фокусным расстоянием 50 мм.

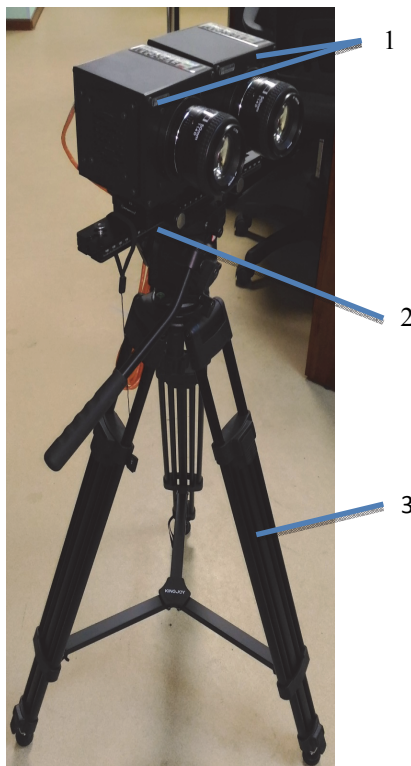


Рис. 2. Стереоскопическая система: 1 – скоростные видеокамеры (Evercam); 2 – стереориг для съемки 3D-видео; 3 – штатив

Для оценивания трехмерных координат некоторой точки по стереопаре необходимо знать внутренние параметры камер, параметры взаимного расположения камер, а также найти и определить на изображениях координаты соответствующих данной точке сопряженных точек. Задачей калибровки стереосистемы является вычисление значений внутренних параметров камер – фокусного расстояния и координат центра проекции, а также значений внешних параметров – матрицы поворота и вектора трансляции, которые определяют их относительное положение в пространстве. Для нахождения сопряженных точек на паре снимков их поиск выполняется по эпиполярным линиям [13]. Мерой сходства областей, лежащих в окрестностях сопряженных точек, является корреляционная функция. Важными требованиями скоростной видеосъемки являются синхронизация камер в целях обеспечения одновременной записи видеопотоков и стабильность установки.

Калибровка стереоскопической системы необходима для обеспечения требуемой точности измерений. Камеры располагались на расстоянии  $\Delta = 100$  мм (см. рис. 4), угол между оптическими осями объективов камер составил  $\alpha = 15^\circ$ . Калибровка стереопары проводилась для набора опорных точек тест-объекта в виде шахматной доски с квадратной клеткой размером 28 мм. В результате калибровки была получена серия из 60 снимков для разных положений тест-объекта в пространстве. Результат восстановления этих положений после цифровой обработки всей серии представлен на рис. 3.

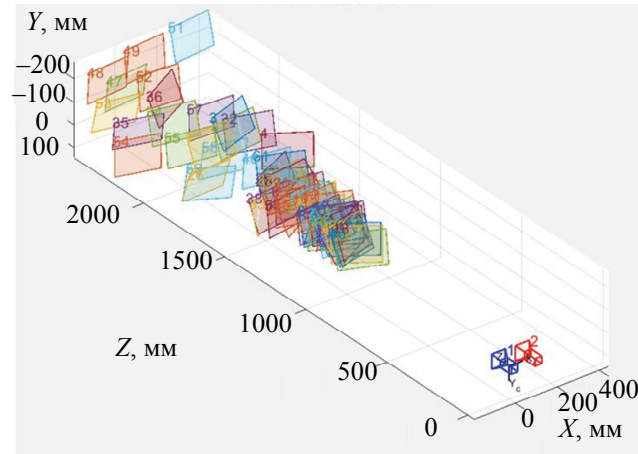


Рис. 3. Восстановленные положения тест-объектов и систем регистрации при калибровке

Качество проведенной калибровки стереосистемы оценивалось посредством съемки ряда объектов со структурированной поверхностью.

При восстановлении объектов оценивались следующие параметры:

- соответствие реального расположения камер относительно друг друга с их расположением в данных восстановления (расстояние между камерами и угол, под которым расположены камеры стереосистемы в пространстве);
- соответствие величины реального расстояния от стереосистемы до объекта величине этого расстояния в данных восстановления;
- соответствие реальных геометрических параметров объекта геометрическим параметрам, полученным стереосистемой;
- качество трехмерной структуры восстановленного объекта.

Многочисленные эксперименты показали, что остаточные ошибки калибровки, выраженные в погрешности восстановления положения объекта со структурированной поверхностью, не превышают 0,5%. Таким образом, стереосистема была откалибрована корректно и готова к проведению измерений.

#### Экспериментальное исследование

Для оценки возможности определения кинематических характеристик движения индентора в процессе ударного контактного взаимодействия с материалом на основе анализа его стереоизображений, полученных парой высокоскоростных видеокамер, проведена серия экспериментов. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.

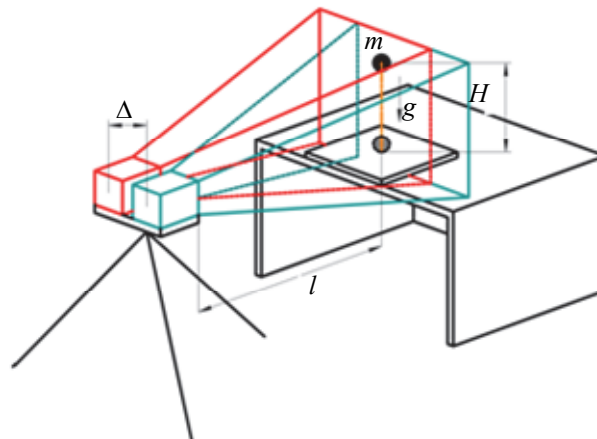


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Закаленный стальной шар массой  $m = 230$  г, диаметром  $d = 38$  мм роняли с высоты  $H = 310$  мм на алюминиевый диск (ускорение свободного падения принято  $g = 9,81$ ), весь процесс фиксировался стереосистемой на расстоянии  $L = 1000$  мм. При регистрации движения шара были получены изображения ректификации, т.е. выпрямления пары изображений, и соответствующая карта диспаратности или несоответствий, которая позволяет настроиться на интервал глубины положения объекта в кадре (рис. 5).

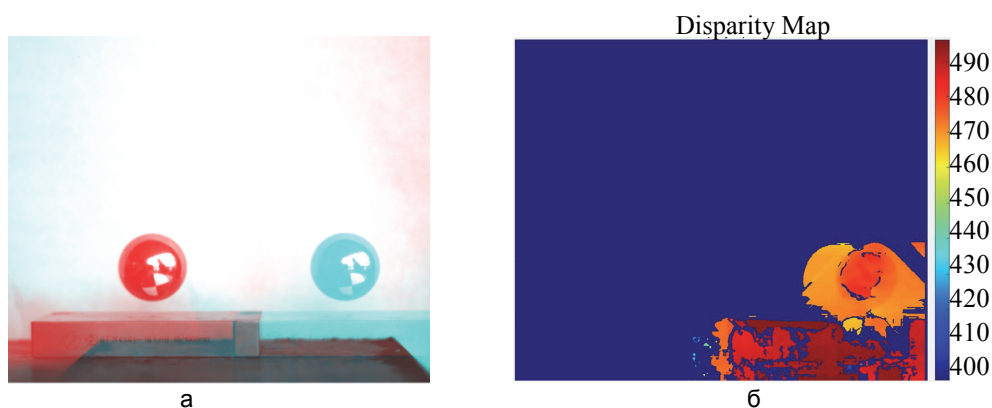


Рис. 5. Результаты регистрации процесса падения шара: ректифицированное изображение (а); карта диспаратности (б)

На основании полученных стереоизображений производился расчет трехмерных координат объекта в пространстве. Видеоизображения с камер переносились для обработки в персональный компьютер. Анализ полученных данных осуществлялся с помощью специально написанного программного модуля в системе MATLAB (рис. 6).

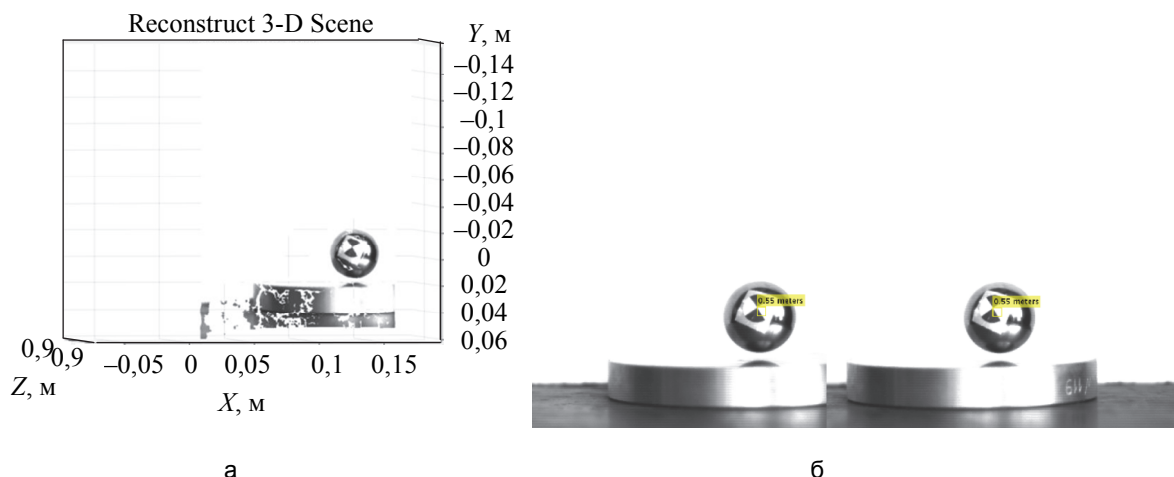


Рис. 6. Результаты обработки полученных изображений: результаты восстановления структуры объекта (а); результаты расчета расстояния от камеры до объекта (б)

Наложение последующих изображений (кадров) позволило определять по значениям координат скорость движения объекта. На рис. 7 представлен график изменения скорости падения стального шара при взаимодействии с алюминиевым диском.

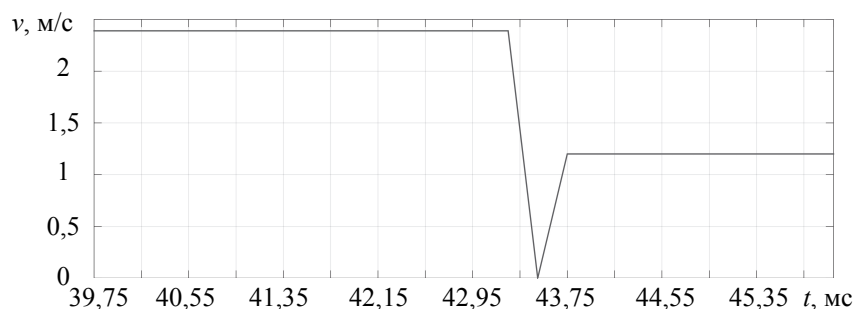


Рис. 7. График изменения скорости падения ( $v$ ) стального шара при взаимодействии с алюминиевым диском



Представленный график демонстрирует, что процесс собственно контактного взаимодействия стального шара с алюминиевым диском не регистрируется стереосистемой. Чувствительность стереосистемы в данном случае не позволяет осуществить измерение кинематических характеристик самого процесса контактного взаимодействия стального шара с материалом. Это связано с тем, что процесс контактного взаимодействия быстротечен и для разных групп материалов имеет свой диапазон (для данного эксперимента составляет порядка 60 мкс). Стоит отметить, что чувствительность стереосистемы в данном эксперименте позволяет уверенно определять значения скорости подлета (2,39 м/с) и скорости отскока (1,2 м/с) стального шара. Полученные значения можно использовать для определения твердости материала по методу Либа.

Решение проблемы чувствительности стереосистемы возможно за счет уменьшения базового расстояния между камерами, что может быть достигнуто использованием камер гораздо меньшего размера, либо за счет применения более совершенных оптических систем и ПЗС-матриц с большим разрешением.

### Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что оптический триангуляционный метод применим к задаче измерения кинематических характеристик процесса динамического индентирования. Однако решение данной задачи требует применения улучшенных оптических систем. Показано, что стереоскопический метод обладает высокой точностью. В рамках исследований проведена серия идентичных экспериментов и произведен расчет случайной составляющей погрешности стереосистемы, значение которой не превысило 2,5%.

### Литература

1. Saxena A., Rai A., Kumaraswamy A. A numerical approach to investigate the effect of temperature on constraint factor of Ti alloy under static indentation conditions // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2017. V. 70. N 6. P. 1549–1553. doi: 10.1007/s12666-016-0952-2
2. Koepfel B.J., Subhash G. Dynamic indentation hardness of metals // *Solid Mechanics and its Applications*. 2002. V. 62. P. 447–456. doi: 10.1007/0-306-46936-7\_43
3. Subhash G., Zhang H. Shear band patterns in metallic glasses under static indentation, dynamic indentation, and scratch processes // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2007. V. 38. N 12. P. 2936–2942. doi: 10.1007/s11661-007-9315-2
4. Kren A.P., Protasenyа T.A. Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2014. V. 50. N 7. P. 419–425. doi: 10.1134/S1061830914070079
5. Rudnitsky V.A., Djakovitch V.V. Material testing by the method of dynamic indentation // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2007. V. 12. N 4. P. 253–261. doi: 10.1080/10589759608952849
6. Cao Y.P., Ji X.Y., Feng X.Q. On determination of the damping factor of linear viscoelastic materials using dynamic indentation: a theoretical study // *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. 2011. V. 54. N 4. P. 598–605. doi: 10.1007/s11433-011-4279-z
7. Fei X., Grummon D.S., Ye C., Cheng G.J., Cheng Y.-T. Surface form memory in NiTi shape memory alloys by laser shock indentation // *Journal of Materials Science*. 2012. V. 47. N 5. P. 2088–2094. doi: 10.1007/s10853-011-6007-5
8. Мацулевич О.В., Рудницкий В.А., Литвиновский Д.А. Определение модуля упругости бетона методом динамического индентирования // *Не разрушающий контроль и диагностика*. 2012. № 4. С. 46–56.
9. Крень А.П. Контроль физико-механических свойств и трещиностойкости неметаллических конструкционных материалов методами индентирования: дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2010. 344 с.
10. Федоров А.В., Крень А.П. Прибор динамического индентирования для контроля механических характеристик композиционных материалов // VI Международная конференция "Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества". Суздаль, 2016.
11. Марусин М.П., Протасеня Т.А. Разработка первичного преобразователя прибора динамического индентирования для измерения механических свойств материалов // *Известия вузов. Приборостроение*. 2014. Т. 57. № 10. С. 85–87.

### References

1. Saxena A., Rai A., Kumaraswamy A. A numerical approach to investigate the effect of temperature on constraint factor of Ti alloy under static indentation conditions. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, vol. 70, no. 6, pp. 1549–1553. doi: 10.1007/s12666-016-0952-2
2. Koepfel B.J., Subhash G. Dynamic indentation hardness of metals. *Solid Mechanics and its Applications*, 2002, vol. 62, pp. 447–456. doi: 10.1007/0-306-46936-7\_43
3. Subhash G., Zhang H. Shear band patterns in metallic glasses under static indentation, dynamic indentation, and scratch processes. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, vol. 38, no. 12, pp. 2936–2942. doi: 10.1007/s11661-007-9315-2
4. Kren A.P., Protasenyа T.A. Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 7, pp. 419–425. doi: 10.1134/S1061830914070079
5. Rudnitsky V.A., Djakovitch V.V. Material testing by the method of dynamic indentation. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2007, vol. 12, no. 4, pp. 253–261. doi: 10.1080/10589759608952849
6. Cao Y.P., Ji X.Y., Feng X.Q. On determination of the damping factor of linear viscoelastic materials using dynamic indentation: a theoretical study. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, vol. 54, no. 4, pp. 598–605. doi: 10.1007/s11433-011-4279-z
7. Fei X., Grummon D.S., Ye C., Cheng G.J., Cheng Y.-T. Surface form memory in NiTi shape memory alloys by laser shock indentation. *Journal of Materials Science*, 2012, vol. 47, no. 5, pp. 2088–2094. doi: 10.1007/s10853-011-6007-5
8. Matsulevich O.V., Rudnitskii V.A., Litvinovskii D.A. Determination of the concrete elasticity modulus by dynamic indentation. *Nerazrushayushchii Kontrol' i Diagnostika*, 2012, no. 4, pp. 46–56. (In Russian)
9. Kren A.P. *Control of Physical and Mechanical Properties and Crack-Resistance of Nonmetallic Structural Materials by Indentation Methods*. Dis. Dr. Eng. Sci. Minsk, 2010, 344 p.
10. Fedorov A.V., Kren A.P. Dynamic indentation device for control of mechanical characteristics of composite materials *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Functional Nanomaterials and High-Purity Substances*. Suzdal', Russia, 2016. (In Russian)
11. Marusin M.P., Protasenyа T.A. Development of primary transducer for comparable measurement of mechanical properties of materials. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, vol. 57, no. 10, pp. 85–87. (In Russian)
12. Kren A.P., Protasenyа T.A. Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by

12. Крень А.П., Протасеня Т.А. Определение физико-механических характеристик изотропного пирографита по параметрам динамического индентирования // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 51–59.
13. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск: НГТУ, 2002. 352 с.
14. Форсайт Д.А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
15. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
16. Мачихин А.С. Современные технологии визуально-измерительного контроля авиационных двигателей // Двигатель. 2009. № 1. С. 26–28.
17. Мачихин А.С., Колочкин В.Я., Тимашова Л.Н. Однокамерная сканирующая стереоскопическая система для реконструкции трехмерной структуры объектов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2007. № 38. С. 142–146.
18. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
- dynamic indentation method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 7, pp. 419–425. (In Russian)
13. Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Peretyagin G.I., Spektor A.A. *Digital Image Processing in Information Systems*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002, 352 p. (In Russian)
14. Forsyth D.A., Ponce J. *Computer Vision: A Modern Approach*. Upper Saddle River, 2003.
15. Gonzales R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. 2<sup>nd</sup> ed. Upper Saddle River, Prentice Hall, 2002, 793 p.
16. Machikhin A.S. Modern technologies of visual and measuring control of aircraft engines. *Dvigatel'*, 2009, no. 1, pp. 26–28. (In Russian)
17. Machikhin A.S., Kolyuchkin V.Ya., Timashova L.N. Single-chamber scanning stereoscopic system for reconstruction of three-dimensional structure of objects. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2007, no. 38, pp. 142–146. (In Russian)
18. Gonsales R.C., Woods R.E., Eddins S.L. *Digital Image Processing Using MATLAB*. Prentice Hall, 2004, 344 p.

### Авторы

**Иванова Евгения Игоревна** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, zhmenkax@mail.ru

**Федоров Алексей Владимирович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, afedor62@yandex.ru

**Астрединова Надежда Витальевна** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, astranadezhda@ya.ru

**Ильинский Александр Вячеславович** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, allill003@mail.ru

**Ашихин Денис Сергеевич** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ashikhinds@mail.ru

### Authors

**Evgeniya I. Ivanova** – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, zhmenkax@mail.ru

**Alexey V. Fedorov** – D.Sc., Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, afedor62@yandex.ru

**Nadezhda V. Astredinova** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, astranadezhda@ya.ru

**Alexander V. Ilinsky** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, allill003@mail.ru

**Denis S. Ashikhin** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ashikhinds@mail.ru