

Верификация автоматической системы проведена при калибровке набора мер напряжения 10 В в идентичных условиях калибровки десятикратных наблюдений в течение десяти дней. Полученные результаты измерений и соответствующая оценка расширенной неопределенности сопоставлены с результатами ручной калибровки и калибровки с использованием системы supraVOLTcontrol, реализующей эффект Джозефсона. Проанализированы серии из 20 измерений, за оценку результата наблюдений (приписанное действительное значение меры напряжения) принято среднее арифметическое результатов измерений. При этом как при ручной, так и при автоматической калибровке использованы одни и те же сканер, цифровой мультиметр, соединительные кабели. В табл. 1 представлен расчет бюджета неопределенности результатов калибровки одной меры напряжения 10 В, выполненный в ручном и автоматическом режимах, где u_c – стандартная неопределенность; P – доверительная вероятность; k – коэффициент охвата.

В табл. 2 приведены полученные различными способами результаты (приписанные действительные значения с расширенной неопределенностью) калибровки набора мер напряжения 10 В (Fluke 732B), входящих в состав НЭ.

Из табл. 2 следует, что сопоставимы результаты калибровки, полученные в автоматическом и ручном режимах, а оценка расширенной неопределенности в автоматическом режиме меньше соответствующих оценок в ручном режиме. В результате достигнута совместимость и улучшена повторяемость результатов измерений в автоматическом режиме. В процессе верификации разработанной и внедренной автоматизированной системы подтверждены ее функциональные возможности и совместимость результатов измерений в автоматическом и ручном режимах, а также с использованием системы supra VOLTcontrol, реализующей эффект Джозефсона.

Заключение. Разработанный по итогам исследований проблемы автоматизации измерений программно-аппаратный комплекс позволяет проводить измерения на Национальном эталоне единицы напряжения – вольты в автоматическом режиме. Полученный массив результатов измерений подвергается дальнейшей обработке, отображается в графическом виде, хранится и передается пользователям, тем самым оптимизируются процессы воспроизведения и передачи единицы напряжения постоянного тока рабочим эталонам и СИ.

Литература

1. Катков, А. С. Сличение национальных эталонов вольты Российской Федерации и Республики Беларусь / А. С. Катков, П. А. Черняев // Измерительная техника. – 2013. – № 5. – С. 69–71.
2. Столлингс, В. Компьютерные системы передачи данных / В. Столлингс. – М.: Вильямс, 2002. – 928 с.
3. Воспроизведение вольты на основе переходов джозефсона СИС- и СНС-типа / А. С. Катков [и др.] // Измерительная техника. – 2017. – № 6. – С. 46–48.
4. Катков, А. С. Ключевые сличения эталонов вольты ВНИИМ и МБМВ / А. С. Катков, С. Солве // Измерительная техника. – 2011. – № 11. – С. 70–73.
5. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1969. – 512 с.
6. Миронов Э.Г. Метрология и технические измерения / Э. Г. Миронов, Н. П. Бессонов. – М.: КНО-РУС, 2015. – 422 с.
7. Муха, Ю. Л. Информационно-измерительные системы / Ю. Л. Муха, И. Ю. Королева. – Волгоград: Волгоградский ГТУ, 2015.
8. Behr, R. Technical Supplement / R. Behr, A. S. Katkov // Metrologia. – 2005. – Vol. 42. – P. 01005.
9. Behr R., Schulze H., Müller F., Kohlmann J., Niemeyer J. // IEEE Trans. Instrum. Meas., 1999. – Vol. 48, № 2. – P. 270–273.
10. Метод контроля ошибок в устройствах хранения и передачи информации автоматизированных систем измерительной техники / А. А. Павлов [и др.] // Измерительная техника. – 2010. – № 11. – С. 21–25.

УДК 620.179.18

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ К ИЗМЕНЕНИЮ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО SLA-ТЕХНОЛОГИИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТОЙ ОТВЕРЖДАЕМОГО СЛОЯ Протасеня Т.А., Крень А.П., Мацулевич О.В.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. На основе экспериментальных данных показана достаточная чувствительность метода динамического индентирования к изменению твердости (прочности) и модуля упругости образцов, изготовленных по SLA-технологии с высотой слоя 100, 50 и 25 мкм. В результате использования основных методик обработки регистрируемых параметров ударного нагружения установлено, что оптимальной является энергетическая расчетная модель, позволяющая получить максимально достоверные данные о свойствах исследуемых материалов и обеспечивающая наибольшую чувствительность метода динамического индентирования к изменению характеристик полимерных изделий.

Ключевые слова: твердость, модуль упругости, прочность, SLA-технология, индентирование.

**ESTIMATION OF THE SENSITIVITY OF THE DYNAMIC INDENTATION METHOD
TO CHANGING THE PROPERTIES OF POLYMER PRODUCTS OBTAINED
BY SLA-TECHNOLOGY WITH DIFFERENT CURING LAYER HEIGHT**

Pratasenia T., Kren A., Matsulevich O.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. Based on the experimental data, the sufficient sensitivity of the dynamic indentation method to changes in the hardness (strength) and elastic modulus of samples fabricated using the SLA-technology with a layer height of 100, 50, and 25 μm is shown. As a result of the use of the main methods of processing the recorded parameters of impact loading, it was found that the energy calculation model is optimal, which allows obtaining the most reliable data on the properties of the materials under study and providing the highest sensitivity of the dynamic indentation method to changes in the characteristics of polymer products.

Key words: hardness, elastic modulus, strength, SLA-technology, indentation.

*Адрес для переписки: Протасеня Т.А., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: 5657397@gmail.com*

В настоящее время получение готовых изделий из полимерных материалов общепринятыми методами: штамповки, прессования, литья и т.д. отходит на второй план, а лидирующие позиции занимают аддитивные технологии, и в частности лазерная стереолитография (SLA-технология). В процессе SLA-печати фотополимерная смола послойно отверждается под действием лазера. Вследствие аддитивной природы SLA-технологии толщина отверждаемого слоя определяет разрешение печати (т.е. способность создавать изделия с высокой точностью). Наиболее распространенной проблемой, связанной с точностью изготовления продукции по SLA-технологии, является так называемое «скручивание», т.е. деформация, вызванная усадкой фотополимерной смолы в процессе отверждения, и приводящая к изменению физико-механических характеристик материала. Эти обстоятельства и определяют необходимость контроля данных изделий на протяжении всего их жизненного цикла.

Единственными методами, применяемыми сейчас для численной оценки физико-механических характеристик изделий аддитивного синтеза, являются стандартные разрушающие испытания [1]. Но поскольку свойства образцов-свидетелей могут отличаться от свойств готового изделия (ввиду своей геометрии, масштабного фактора и т.д.), то объективность полученной с их помощью оценки свойств материала ставится под сомнение. В тоже время надежных методов неразрушающего контроля, которые могли бы с достаточной достоверностью дать численную оценку физико-механическим характеристикам, пока не существует.

По этой причине актуальной задачей контроля качества изделий, изготовленных по SLA-технологии, является развитие методов неразрушающего контроля. Наиболее часто применяемым методом неразрушающей оценки физико-механических характеристик материалов является метод индентирования. Однако в своем

классическом представлении (статического нагружения) метод индентирования не предназначен для проведения оперативного контроля, поскольку требует создания замкнутой силовой системы нагружения. В условиях производства для этих целей более пригоден метод динамического индентирования, позволяющий проводить контроль реальных изделий и своевременно выявлять отклонения их характеристик от номинальных значений.

Ранее нами были проведены исследования, направленные на адаптацию метода динамического индентирования для контроля ряда конструкционных материалов (углеполненных полимеров, углерод-углеродных композитов и т.д.). Научные работы по данной теме посвящены в том числе вопросам моделирования процесса упругопластического деформирования и содержат аналитические уравнения связи параметров диаграммы ударного нагружения с твердостью H_{IT} и приведенным модулем упругости E_{IT}^* материала (уравнения 1 и 2) [2].

$$H_{IT} = \frac{P_{hmax}}{\pi R_i (h_{max} + h_p)}, \quad (1)$$

$$E_{IT}^* = \frac{3P_{hmax}}{4\sqrt{R_i} (h_{max} - h_p)^{3/2}}, \quad (2)$$

где R_i – радиус индентора; h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора; P_{hmax} – контактное усилие при максимальной глубине внедрения; h_p – глубина пластического отпечатка.

В настоящей же работе предлагается также использовать связь физико-механических характеристик контролируемого материала с энергетическими характеристиками ударного взаимодействия: энергией пластической и упругой деформации (уравнения 3 и 4) [3].

$$E_{ITW}^* = \frac{3\sqrt{2}}{5} \frac{P_{hmax}^2}{mv_{min}^2 \sqrt{2R_i (h_{max} + h_p)}}, \quad (3)$$

$$H_{ITW} = \frac{m(v_{max}^2 - v_{min}^2)}{\pi R_i h_p (h_{max} + h_p)}, \quad (4)$$

где m – масса индентора; v_{max} и v_{min} – предударная скорость и скорость отскока индентора.

Сравнение этих двух подходов к расчету основных физико-механических характеристик позволит выявить наиболее точную и информативную методику определения твердости и модуля упругости материалов полимерных изделий и оценить чувствительность метода динамического индентирования к изменению свойств аддитивного полимера в зависимости от толщины его отверждаемого слоя.

Для проведения исследования влияния толщины отверждаемого слоя при SLA-технологии аддитивного производства на физико-механические характеристики полимерных изделий были изготовлены образцы – лопатки типа A1 [4] из фотополимерной смолы Formlabs Black V4. Печать образцов осуществлялась на 3D-принтере Form2 (Formlabs Inc., США) при температуре смолы 31 °С, мощности лазера 250 кВт с пятном 140 мкм. Доотверждение материала образцов проводилось в сушильной камере Form Cure (Formlabs Inc., США) под действием УФ-излучения мощностью 39 Вт и температуры 60 °С. Для исследования было изготовлено 3 вида образцов с различной высотой отверждаемого слоя при печати: 100, 50 и 25 мкм (по 5 образцов каждого вида). Все образцы были предварительно испытаны на растяжение [4]. В результате разрушающих испытаний было установлено, что оптимальная высота отверждаемого слоя при указанных геометрических параметрах выращиваемого изделия составляет 50 мкм. При заданных параметрах SLA-печати модуль упругости увеличивается в среднем на 10 %, а предел прочности примерно на 9 %.

Индентирование образцов осуществлялось с предударной скоростью 3,0 м/с твердосплавным индентором массой 6,8 г с радиусом сферическо-

го наконечника 2,5 мм. Анализ данных ударного нагружения показал, что метод динамического индентирования на качественном уровне подтверждает результаты стандартных испытаний на растяжение. При этом наибольшее изменение динамической твердости и динамического модуля упругости наблюдается между образцами с высотой отверждаемого слоя в 100 и 50 мкм. При уменьшении высоты отверждаемого слоя фотополимерной смолы твердость H_{IT} увеличивается в среднем на 6%, а модуль упругости E_{IT}^* – на 5 %. На ряду с этим наибольшую чувствительность к изменению свойств исследуемых полимерных изделий метод динамического индентирования показал при использовании энергетического подхода анализа регистрируемых данных нагружения материала.

В данном случае изменение динамической твердости H_{ITW} составило порядка 10 %, а модуль упругости E_{ITW}^* – 11 %.

Благодарность. Работа выполнена в рамках Национальной программы стипендий для молодых ученых при финансовой поддержке Всемирной федерации ученых (World Federation of Scientists National Scholarship Programme).

Литература

1. Mechanical characterization of 3D-printed polymers / John Ryan C. Dizon [et al.] // Additive Manufacturing. – 2017. – Vol. 20. – P. 44–67.
2. Complex of devices for determining the physical and mechanical properties of the carbon materials used in the rocket and space technology by the impact indentation method / A. P. Kren [et al.] // Mechanics of Composite Materials. – 2015. – Vol. 51, № 2. – P. 323–328.
3. Контроль неразрушающий. Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов методами индентирования : СТБ 2495-2017. – Введ. 01.09.2017. – Минск : Госстандарт, 2017. – 40 с.
4. Пластмассы. Метод испытания на растяжение : ГОСТ 11262 (ISO 527-2:2012). – Введ. 01.09.2019. – М. : Стандартинформ, 2019. – 24 с.

УДК 53.089

О НОВОЙ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ (ТЕОРИЯ РЕЙТИНГОВ)

Романчук В.М.¹, Лаппо П.М.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Анализ литературы показывает, что актуальной является проблема количественного измерения качества продукции. Проблема измерения возникает и в теории принятия решений. Предлагается использовать метод рейтинга для измерения предпочтений в теории полезности и в теории принятия решений. Излагается аксиоматический подход к проблеме измерения. Сформулировано аксиоматическое и классическое определение рейтинга. Из аксиоматического определения следует классическое определение для специального множестве объектов. Классическое определение является конструктивным. Для проверки адекватности результатов измерений достаточно сопоставить рейтинги, полученные разными способами измерения (метод альтернатив). Метод рейтинга можно использовать при построении модели оценки качества продукции и в теории принятия решений.

Ключевые слова: теория измерений, рейтинг, функция полезности, квалиметрия.