

Закрывание окна осуществляется при уменьшении концентрации ниже 600 ppm. Такие пороги установлены исходя из наилучшей продуктивности деятельности находящихся в аудитории человек.

Управление электроприводами окна и жалюзи реализовано на основе микроконтроллера STM32F103 и двух H-мостов L298 и ТВ6612 (рис. 4). Первый H-мост используется для управления приводом окна и позволяет работать при напряжениях до 46В и токах до 4А. Второй H-мост предназначен для управления приводом жалюзи.



Рисунок 4 – Система управления приводами открывания окна и жалюзи

В качестве радиопередатчика использован модуль NRF24L01, который позволяет работать в двух направлениях (прием и передача), обеспечивает подтверждение принятых данных.

Адаптивный привод окна и жалюзи реализован в учебной аудитории, выполненной по экспериментальному проекту «Умный класс», на приборостроительном факультете Белорусского национального технического университета.

#### Литература

1. Микитевич Адаптивный светильник для «умной» аудитории / Ю. Д. Сороко [и др.] // Новые направления развития приборостроения: материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (20–22 апреля 2022 г.). – Минск: БНТУ, 2022. – С. 46–47.

2. Адаптивное освещение в «умной» аудитории / Ю. Д. Сороко [и др.] // Новые направления развития приборостроения: материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (20–22 апреля 2022 г.). – Минск: БНТУ, 2022. – С. 47–48.

УДК 620.179.18

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ FDM-ПЕЧАТИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕНАПОЛНЕННОГО ПОЛИАМИДА

Протасеня Т.А., Ланцман Г.А., Кутепов А.Ю.

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

**Аннотация.** По результатам исследований установлено, что увеличение температуры печати по FDM-технологии способствует увеличению динамической твердости и модуля упругости на 23 % и 11 % соответственно. Однако чрезмерное нагревание филамента приводит к искажению геометрии изделий и возникновению внутренних напряжений и неоднородности свойств материала. Отклонение скорости печати от стандартного значения в меньшую сторону (до 55 мм/с) способствует увеличению упругих и прочностных свойств материала, а увеличение скорости печати до 85 мм/с позволяет повысить его однородность в объеме образца. Доказано, что наибольшими значениями физико-механических характеристик обладают образцы, полученные при толщине слоя печати 0,1 мм.

**Ключевые слова:** твердость, модуль упругости, предел прочности, FDM-технология, индентирование.

### STUDY OF THE EFFECT OF FDM PRINTING PARAMETERS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CARBON-FILLED POLYAMIDE

Pratasenia T., Lantsman G., Kutsepau A.

*The Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** According to the results of the research, it was found that an increase in the temperature of printing using FDM technology contributes to an increase in dynamic hardness and elastic modulus by 23 % and 11 %, respectively. However, excessive heating of the filament leads to a distortion of the geometry of the products and the emergence of internal stresses and inhomogeneity of the material properties. The deviation of the printing speed from the standard value to a lower side (up to 55 mm/s) contributes to an increase in the elastic and strength properties of the material, and an increase in the printing speed to 85 mm/s makes it possible to increase its uniformity in the sample volume. It has been proven that the samples obtained with a printing layer thickness of 0.1 mm have the highest values of physical and mechanical characteristics.

**Key words:** hardness, modulus of elasticity, tensile strength, FDM technology, indentation.

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

Существующие методы контроля качества изделий аддитивного производства в основном базируются на оценке физико-механических характеристик материала в ходе стандартных разрушающих испытаний [1, 2]. При этом, как правило, стандартные контрольные образцы изготавливают по тем же режимам и технологиям 3D-печати, что и основное изделие. Однако нельзя гарантировать, что упругие и прочностные характеристики специально выращенного образца будут соответствовать свойствам материала готовой продукции. Особенно это критично для аддитивных технологий послойного наплавления, например, FDM-технологии, особенностью которой является анизотропия свойств получаемого материала, являющаяся не только следствием различной ориентации слоев печати, но и вариативности таких параметров как скорость подачи и температура наносимого материала, толщина слоя печати и т. д. Все эти факторы так или иначе сказываются на процессах формирования межслоевой связи материала, зарождению внутренних напряжений в детали и, как следствие, возникновению неоднородности физико-механических характеристик в объеме материала. При этом даже если пренебречь материальными и временными затратами и рассмотреть возможность изготовления стандартного образца из экземпляра готового изделия, то полученные таким образом результаты разрушающих испытаний позволят установить некое среднее значение свойств конкретного объема материала. Единственным решением данной проблемы является развитие неразрушающих методов оценки свойств изделий аддитивного производства, обеспечивающих достаточную локальность контроля и возможность получения данных о распределении свойств материала в пределах всего объема изделия. Кроме того применимостью такого метода определяется его чувствительностью к изменению параметров FDM-печати, т.е. способности регистрировать изменение упругих и прочностных характеристик в зависимости от скорости, температуры подачи материала и толщины его слоя. С этой целью нами предложено использовать метод динамического индентирования, который уже себя хорошо зарекомендовал при контроле полимерных изделий аддитивного производства, однако для комплексной оценки его чувствительности к изменению нескольких параметров 3D-печати потребовалось проведение дополнительных исследований.

С этой целью из угленаполненного полиамида Nylforce Carbon (FiberForce, Италия) диаметром 2,85 мм нами было изготовлено 35 образцов (7 партий по 5 образцов) с различными параметрами печати: скорость печати  $v$  (55; 70 и 85 мм/с), толщина слоя  $h$  (0,1; 0,2 и 0,3 мм) и температура печати  $T$  (240; 255 и 270 °C).

Все образцы предварительно были испытаны на растяжение согласно [1] на универсальной испытательной машине MTS Criterion 43 с непрерывной скоростью нагружения 10 мм/мин.

Результаты контроля позволили установить, что основной вклад в отклик материала на растягивающую нагрузку вносят силы межслоевой сцепления исследуемого полимера. Поэтому с ростом температуры печати растет и связь между нитями расплава, что приводит к увеличению предела прочности и модуля упругости аддитивного полимерного материала. В результате эксперимента установлено, что при увеличении температуры печати от 240 до 255 °C предел прочности при растяжении увеличивается в среднем на 9 %, а модуль упругости, измеренный в ходе стандартных испытаний, на 60 %. Однако повышение температуры печати до 270 °C приводит к искажению геометрии изделия из исследуемого угленаполненного полиамида и возникновению внутренних напряжений, приводящих к неоднородности свойств материал. В свою очередь увеличение скорости печати позволяет нивелировать пористость материала за счет снижения времени наложения последовательных слоев и, соответственно, сокращения времени остывания предыдущего и последующего слоя, что напротив уменьшает внутренние деформации и напряжения в образце. Поэтому образцы, изготовленные со скоростью печати 85 мм/с обладают более однородными свойствами. Уменьшение же толщины слоя до 0,1 мм ведет к росту прочностных и упругих характеристик материала, что является следствием увеличения числа слоев материала в изделии и, соответственно, увеличению площадей межслоевой связи. Экспериментально установлено, что уменьшение толщины слоя печати от 0,3 до 0,1 мм приводит к увеличению прочности при растяжении примерно на 15 %, а модуля упругости на 39 %. Однако несмотря на то, что печать изделий с большей толщиной слоя (0,3 мм) позволяет получить материал с более низкими значениями физико-механических характеристик, полученные изделия характеризуются большей стабильностью свойств.

С целью исследования свойств полимерных изделий аддитивного производства МДИ, нагружение образцов проводилось твердосплавным индентором сферической формы диаметром 5 мм, массой 6,8 г с предударной скоростью 2 и 3 м/с. Такие параметры нагружения позволили получить стабильный информационный сигнал и обеспечивали достаточный объем деформации слоистого полимерного материала для интегральной оценки его свойств. При этом в случае нагружения образцов с предударной скоростью 2 м/с максимальное внедрение составило порядка 170 мкм, что превосходит минимальную толщину слоя  $h = 0,1$  мм отдельных образцов и позволяет полу-

чить оценку свойств в объеме материала, а не поверхностного слоя. Аналогичным образом внедрение бойка со скоростью 3 м/с обеспечивает максимальное проникновение индентора на глубину порядка 250–300 мкм, что соизмеримо с максимальной толщиной слоя исследуемых образцов. По результатам индентирования показано, что увеличение температуры печати за счет улучшения межслоевого сцепления способствует увеличению динамической твердости и модуля упругости на 23 % и 11 % соответственно. Вместе с тем чрезмерное нагревание филамента (до 270 °С) приводит к искажению геометрии изделий аддитивного производства и возникновению внутренних напряжений и неоднородности физико-механических характеристик в пределах одного образца. Также установлено, что отклонение скорости печати от стандартного значения (70 мм/с) как в меньшую (55 мм/с), так и в большую сторону (85 мм/с) способствует увеличению упругих и прочностных свойств исследуемого полимерного материала. При этом увеличение скорости печати до 85 мм/с позволяет снизить коэффициент вариации результатов контроля динамического модуля упругости и твердости примерно в

1,5 и 3 раза соответственно. Доказано, что наибольшими значениями модуля упругости, предела прочности и динамической твердости обладают образцы, полученные по FDM-технологии с толщиной слоя печати 0,1 мм, что объясняется наличием большей площади межслоевой связи, размер и качество которой является определяющим фактором в формировании свойств исследуемого полимерного материала.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: проект № Т22М-004 «Развитие метода локального контактного деформирования для неразрушающего контроля полимерных изделий, полученных путем аддитивного синтеза».

#### Литература

1. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 1 Общие принципы: ГОСТ 34370-2017. – Введ. 01.10.2018. – М.: Стандартинформ, 2018. – 26 с.
2. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб: ГОСТ 4648-201 – Введ. 01.03.2015. – М.: Стандартинформ, 2016. – 25 с.

УДК 543.7, 347.771

### ФОРМИРОВАНИЕ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО РЫНКА ПРИБОРОВ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ НУКЛЕИНОВЫХ КИСЛОТ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАТЕНТНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Белов Д.А., Белов Ю.В.

*Институт аналитического приборостроения Российской академии наук  
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

**Аннотация.** В работе представлен подход к анализу рынка приборов для высокопроизводительного секвенирования нуклеиновых кислот. Как качественный показатель развития рынка, демонстрирующий основные инновационные направления, рассматриваются патентные документы, зарегистрированные американской компанией Illumina в Российской Федерации. Определены наиболее перспективные технические решения и тенденции развития технологий высокопроизводительного секвенирования.

**Ключевые слова:** высокопроизводительное секвенирование, патентные исследования.

### A STRATEGY FOR THE DEVELOPMENT OF THE NEW GENERATION SEQUENCING MARKET IN RUSSIA BASED ON THE PATENT DOCUMENTS ANALYSIS

Belov D., Belov Yu.

*Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences  
St. Petersburg, Russian Federation*

**Abstract.** The paper presents an approach to the market analysis of high-throughput DNA sequencers. Patent documents registered by the American company Illumina in the Russian Federation are considered as a qualitative indicator of market development, demonstrating the main innovative directions. The most promising technical solutions and trends in the development of high-throughput sequencing technologies have been identified.

**Key words:** next generation sequencing, patent research.

*Адрес для переписки: Белов Д.А., Санкт-Петербург 190103, а/я 207, Российская Федерация  
e-mail: belov.da@list.ru*

Годовой объем мирового рынка секвенирования нуклеиновых кислот (НК) – метода, позволяющего определять нуклеотидную последователь-

ность для получения формального описания первичной структуры молекул НК, в 2021 году превысил 10 млрд долл. США [1]. Более половины