

Введение углеродных наполнителей в состав PLA при биопринтинге перспективно для создания остеоимплантатов с высокой биохимической инертностью и хорошей пролиферацией клеточного материала.

Литература

1. Carbon fiber-reinforced bone cement in orthopedic surgery / R. M. Pilliar, R. Blackwell, I. Macnab, H. U. Cameron // Biomed. Mater. Res. – 1976. – Vol. 10. – P. 893–906.
2. A new volar plate made of carbon-fiber-reinforced polyetheretherketon for distal radius fracture: Analysis of 40 cases / L. Tarallo, R. Mugnai, R. Adani [et al.] // Orthop. Traumatol. – 2014. – July 15 (4). – P. 277–283.

УДК 617.55-007.43-089.844

**ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ СОЗДАНИЯ  
ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ СТЕЛЕК**

**С. А. Филатов<sup>1</sup>, М. Н. Долгих<sup>1</sup>, Э. А. Пас Эстевес<sup>2</sup>, О. С. Филатова<sup>1</sup>,  
Н. А. Гавриленко<sup>1</sup>, Е. В. Батырев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение «Институт  
тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной  
академии наук Беларуси», г. Минск

<sup>2</sup>Центр изучения передового и устойчивого производства,  
Университет Матансаса «Камило Сьенфуэгос», Республика Куба

*Рассмотрены особенности создания персонализированной обуви по цифровым моделям с помощью аддитивных технологий 3D-печати. Показано, что использование аддитивных подходов к производству обуви позволяет ускорить процесс производства индивидуальных корректирующих и ортопедических изделий.*

**Ключевые слова:** 3D-печать, аддитивное производство, персонализированные технологии.

**3D-PRINTING TECHNOLOGIES FOR CREATING  
PERSONALIZED INSOLES**

**S. A. Filatov<sup>1</sup>, M. N. Dolgikh<sup>1</sup>, E. A. Paz Esteves<sup>2</sup>, O. S. Filatova<sup>1</sup>,  
N. A. Gavrilenko<sup>1</sup>, E. V. Batyrev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk

<sup>2</sup>Center for the Study of Advanced and Sustainable Manufacturing,  
University of Matanzas, the Republic of Cuba

*The article examines the features of creating personalized footwear based on digital models using additive 3D-printing technologies. The use of additive approaches to the production of footwear allows us to speed up the process of producing customized corrective and orthopedic products.*

**Keywords:** 3D-printing, additive manufacturing, personalized technologies.

Современное производство обуви в мире достигает 20 млрд пар обуви в год (стоимость глобального рынка обуви – 400 млрд долл.). Для ее прототипирования широко используется 3D-печать. В последние годы развитие аддитивного производства позволило перейти к массовому производству так называемых межподошв (3D-printed midsoles) – сэндвич-структур на основе материала, зажатого между внешней и внутренней стороной обуви. Уровень использования 3D-печати в произ-

### 30 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

водстве обуви составляет до 0,3 % [1] и, как ожидается, составит 1,5 % от общей мировой выручки от продажи обуви к 2029 г. Ведущие мировые обувные компании используют технологию аддитивного производства для улучшения характеристик конечного продукта и создания локализованных и персонализированных продуктов. Большинство промежуточных подошв изготавливаются из пены этиленвинилацетата (EVA) и менее прочны, чем полиуретановые полимерные материалы, напечатанные на 3D-принтере. Кроме того, 3D-печать позволяет производителям оптимизировать структуру межподошвы, чтобы удовлетворить более широкий спектр индивидуальных предпочтений [2–4].

Процесс производства персонализированной обуви включает операции сканирования стопы, исследование динамики нагружения стоп при ходьбе или беге, информацию о походке и корректирующие операции, зависящие от функционального назначения обуви.

Современные специализированные 3D-сканеры ног по конструкции близки к планшетным сканерам и плантографам и обеспечивают регистрацию контура подошвы даже у самых полых стоп, регистрацию медиального контура, включая верхушку медиальной лодыжки, боковых контуров и задней части пятки (рис. 1). Это дает возможность точного формирования индивидуального трехмерного профиля стопы, описывающего подробные размеры стопы, включая длину, ширину, высоту и обхват – персональный 3D-паспорт стопы.

Специальный датчик давления в таком сканере позволяет измерить распределение давления по поверхности стоп при статической и динамической нагрузке (рис. 2). Сенсоры передают в программу информацию о походке: изменения положения ноги, давления на разных участках ступни при ходьбе. Анализ этой информации выявляет особенности и патологии опорно-двигательного аппарата, формирует требования к индивидуальным стелькам и межподошвам.

Дополнительная информация может быть получена при анализе походки с помощью компьютеризированной видеокамеры и анализа движения в замедленном темпе, применяя такие программы, как Kinovea.



Рис. 1. 3D-сканер стоп. Сканирование геометрии стопы 3D-сканером RSscan Tiger

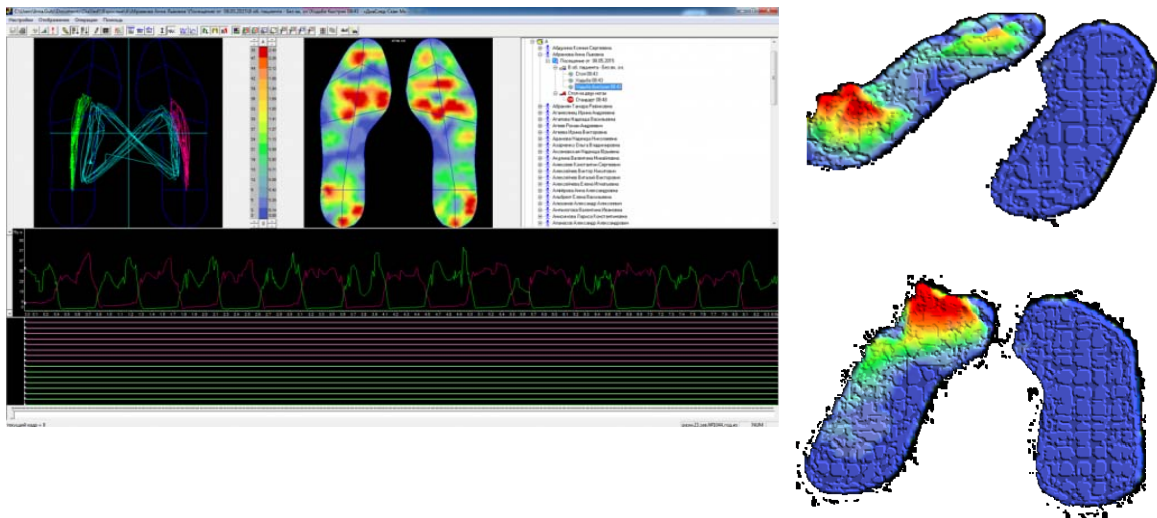


Рис. 2. Компьютерная диагностика динамической нагрузки на стопы с отображением нагрузки на разных отделах стопы при стоянии и ходьбе в комплексе «Диа-След»

Полученная информация используется для создания индивидуальных анатомических стелек или межподошв при помощи FDM или SLA 3D-принтера и специализированного программного обеспечения. В то время как традиционные ортопедические методы основаны на статических отпечатках стопы, цифровые модели для 3D-печати используют динамические данные объемного сканирования и анализа походки, учитывая уникальные модели движения стопы.

В наших экспериментах для регистрации распределения давления на поверхности стоп применялся сканер Medilogic (T&T Medizintechnik GmbH, Германия) с программным обеспечением FootScan ver. 4.4. Характерное распределение давления по поверхности стопы приведено на рис. 3.

Для создания цифровой модели стопы информация о распределении давления по поверхности стопы совмещалась с подоскопическим изображением стопы (рис. 4). Полученное изображение разделялось на области с фиксированным уровнем жесткости (упругости) в соответствии с решаемой терапевтической задачей и используемыми материалами (рис. 5).

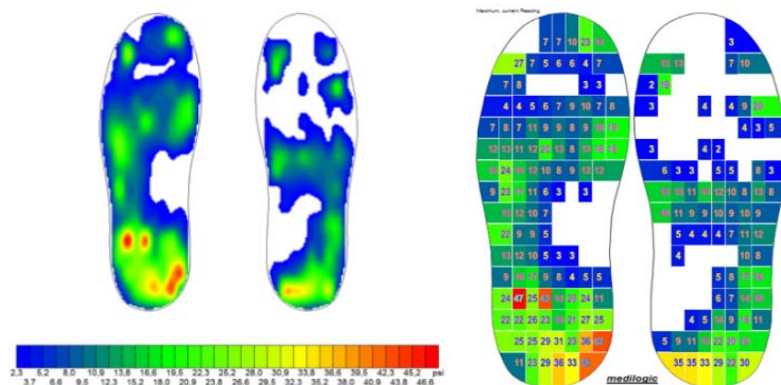


Рис. 3. Характерное распределение давления по поверхности стопы при использовании сканера Medilogic

## 32 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

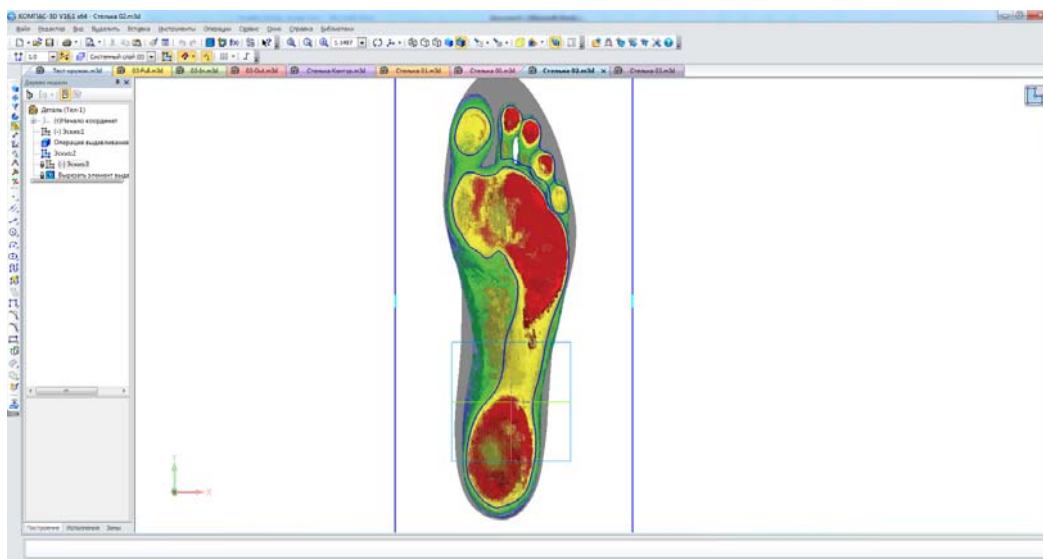


Рис. 4. Совмещение подоскопического изображения и распределения давления по поверхности стопы в КОМПАС 3D

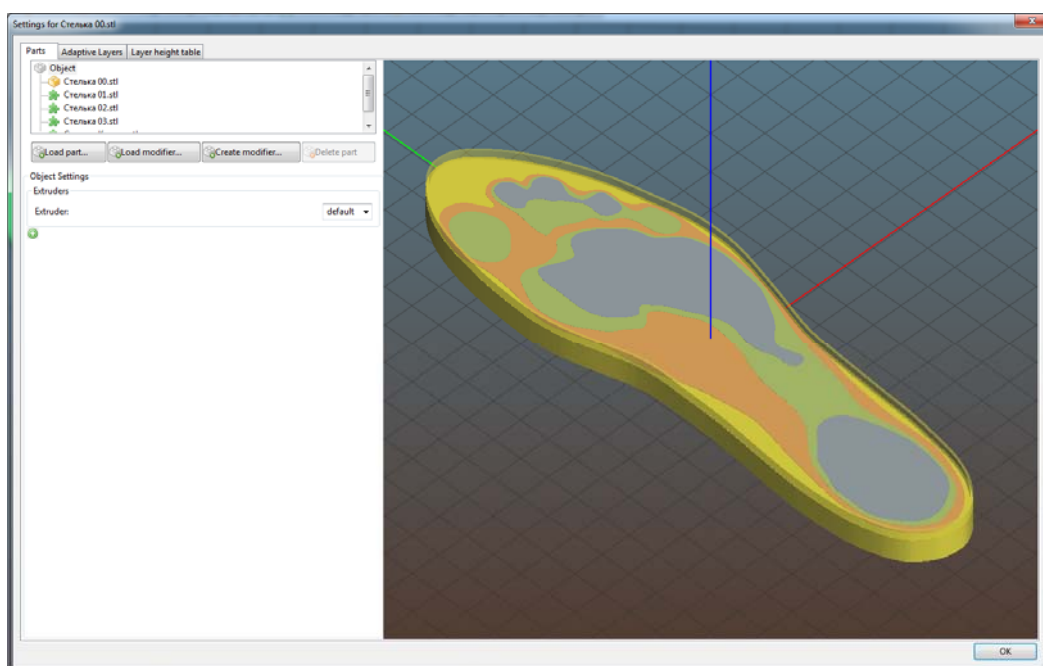


Рис. 5. Области равного давления на поверхности стопы при создании цифрового двойника персонализированной межподошвы (стельки)

После разделения и корректировки контуров областей равного давления задается различный тип заполнения областей (рис. 6, 7) и выполняется подготовка G-кода для печати в программе Slic3r. 3D-печать персонализированной стельки на 3D-принтере была выполнена с применением термопластичного полиуретана Sharebot TPUaz batchJW1377 с соплом 0,4 мм.

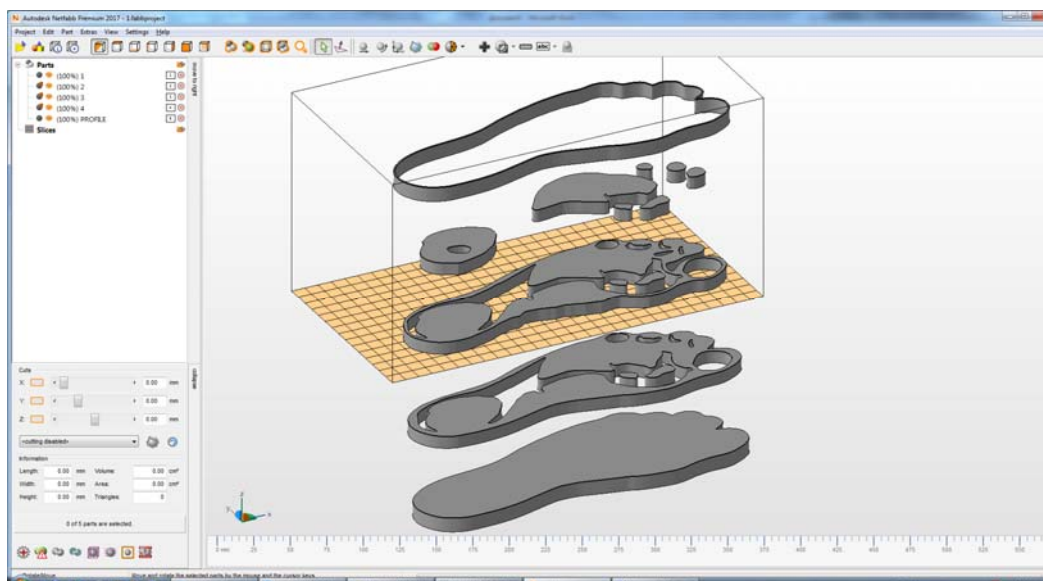


Рис. 6. Разделение 3D-модели персонализированной стельки на области различной жесткости

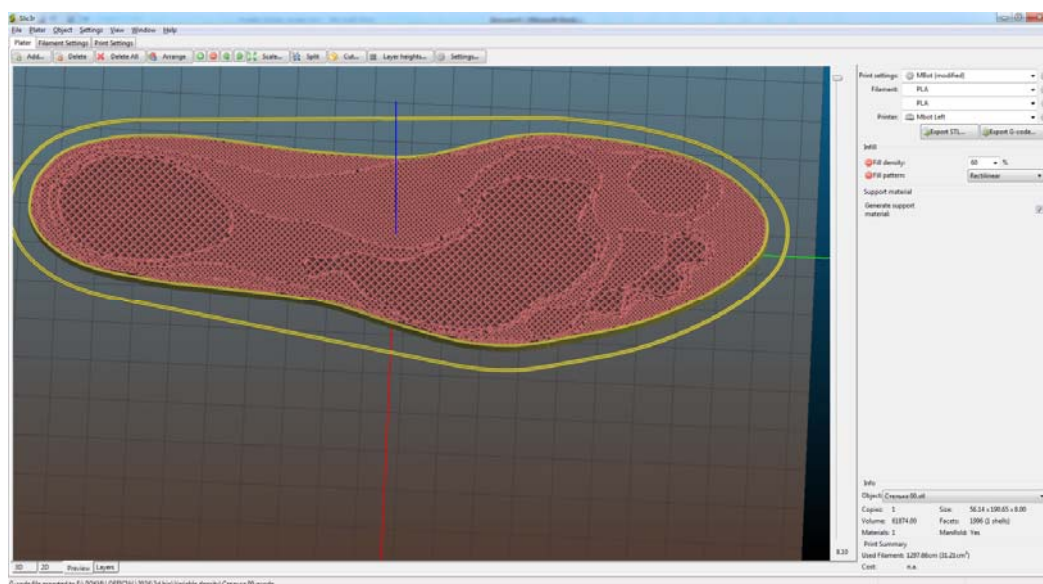


Рис. 7. 3D-модель персонализированной стельки с выделенными областями различной жесткости в слайсере Slic3r

Измерение физико-механических свойств характеристик полученных образцов персонализированной стельки было выполнено с использованием твердомера ИПМ-1К (Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь № РБ 03 03 425815). При измерениях контролировалась твердость (по Шору и в международных единицах IRHD), оценивалась эластичность, вязкость, динамический модуль упругости и релаксационные характеристики как исходного TPU, так и участков стельки с различным типом заполнения.

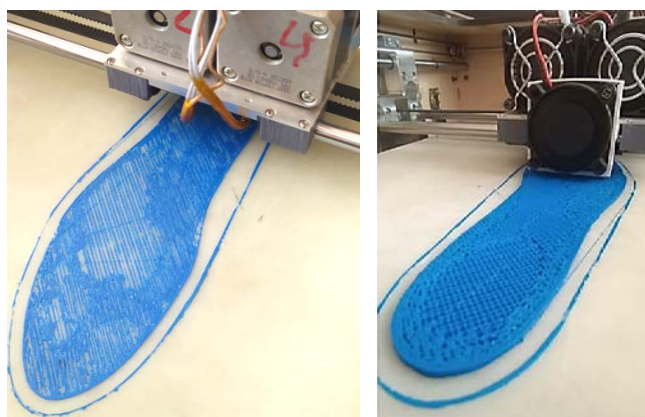


Рис. 8. 3D-печать персонализированной стельки на 3D-принтере с использованием термопластичного полиуретана Sharebot TPUaz batchJW1377



Рис. 9. Тестирование персонализированной стельки

Применение аддитивных подходов к производству обуви позволяет ускорить процесс производства индивидуальных корректирующих и ортопедических изделий, исключая длительные периоды ожидания, связанные с традиционными методами. Кроме того, эффективность процесса 3D-печати дает возможность клиникам обслуживать больше пациентов за меньшее время, увеличивая рентабельность и качество лечения и коррекции заболеваний стопы.

*Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T23КУБ-007).*

#### Литература

1. 3D-Printed Footwear 2019–2029, an Analysis of the Market Potential of 3D-Printing in the Footwear Industry. – URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20190415005378/en/3D-Printed-Footwear-2019-2029-An-Analysis-of-the-Market-Potential-of-3D-Printing-in-the-Footwear-Industry-ResearchAndMarkets.com>.
2. Jandova, S. Benefits of 3D-Printed and Customized Anatomical Footwear Insoles for Plantar Pressure Distribution / S. Jandova, R. Mendricky // 3D Print Addit Manuf. – 2022. – Dec. 1. – N 9 (6). – P. 547–556. – DOI 10.1089/3dp.2021.0002
3. Shadpour Mallakpour. Advanced application of additive manufacturing in the footwear industry: from customized insoles to fully 3D-printed shoes / Shadpour Mallakpour, Zeinab Radfar, Chaudhery Mustansar Hussain // Medical Additive Manufacturing / editor(s): Shadpour Mallakpour, Chaudhery Mustansar Hussain. – In Additive Manufacturing Materials and Technologies. – Elsevier, 2024. – P. 153–178.
4. Коновалова, О. Б. Особенности создания обуви с использованием 3D-технологий и 3D-печати / О. Б. Коновалова, В. В. Костылева, Е. В. Федосеева // Костюмология. – 2022. – Т. 7, № 1. – С. 1–15.