

АГЕЙКИН А. В.

**3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ И 3D-ПРИНТИНГ КАК НОВЫЙ ЭТАП
В РАЗВИТИИ СОСУДИСТОГО ПРОТЕЗИРОВАНИЯ¹**

Аннотация. В статье рассмотрены основные проблемы сосудистого протезирования, показана возможность и необходимость использования 3D-моделирования, 3D-принтинга и новых полимерных материалов для изготовления сосудистых протезов. Указаны требования, предъявляемые к данным материалам и самому протезу. Представлен новый образец сосудистого протеза.

Ключевые слова: атеросклероз, сосудистые протезы, 3D-моделирование, полимерные материалы, 3D-принтинг.

AGEYKIN A. V.

**3D MODELING AND 3D PRINTING AS A NEW STAGE IN
THE DEVELOPMENT OF VASCULAR PROSTHETICS**

Abstract. The article deals with the major problems of vascular prosthetics. The author the considers the potential and the necessity of 3D modeling, 3D printing, and new polymeric materials for the production of vascular prostheses. The requirements to these materials and the prosthesis are provided. A new model of the vascular prosthesis is presented.

Keywords: atherosclerosis, vascular grafts, 3D modeling, polymeric materials, 3D printing.

За последние 60 лет значительный прогресс достигнут в различных отраслях современной медицины [1; 2]. Хирургические процедуры, а именно сосудистые вмешательства, стали проводиться практически на всех участках сосудистого русла, включая внедрение совершенно новых реконструктивных операций. Незадолго до этого любые тромботические окклюзии пытались устранить лишь введением гепарина, который до сих пор активно используется в клинической хирургии [3; 4]. Но гепарин не является панацеей от огромного количества сосудистых заболеваний.

На реконструктивные операции в сосудистой хирургии сейчас направлено не только большинство медицинских центров, но и биоинженерных предприятий, основным профилем работы которых является изготовление для этих целей изделий медицинского назначения, а

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы «Стипендия Президента РФ для обучения за рубежом» на базе отдела нанотехнологии Лазерного центра г. Ганновер (Германия) под руководством д.ф.-м.н., проф. Б. Н. Чичкова.

именно протезов. Но данные протезы имеют множество недостатков, главным из которых является их преждевременное тромбирование. Именно поэтому пациентам пожизненно назначаются антикоагулянты, антиагреганты и другие виды лекарственных препаратов, блокирующие этот механизм. Кроме этого разработанные и имеющиеся на рынке протезы имеют свои диаметральные размеры ≥ 6 мм, что резко ограничивает их применение в сосудистой микрохирургии. Аутооттрансплантаты в виде большой и малой подкожных вен также полностью не соответствуют требованиям сосудистых протезов из-за своего преждевременного тромбирования и слабости венозной стенки. Следовательно, существует необходимость в создании малокалиберных протезов, лишенных этих недостатков и отвечающих всем требованиям современных сосудистых протезов.

Цель исследования – создание малокалиберного сосудистого протеза, удовлетворяющего требованиям высококачественных современных сосудистых протезов в целях последующего их использования в сосудистой микрохирургии для лечения больных васкулярными заболеваниями. Задачи исследования: 1. моделирование геометрической конфигурации внутренней стенки сосудистого протеза; 2. подбор оптимального биосинтетического материала, его синтезирование с определением способности к биодegradации; 3. поиск методов и способов предотвращения бесконтрольной адгезии тромбоцитов на сосудистый протез без применения лекарственных препаратов.

Материалы и методы. В качестве материалов для исследования были выбраны различные по степени полимеризации PLA-пластики, обладающие свойствами биодegradации и биосовместимости.

В качестве методов для исследования были выбраны следующие:

1. 3D-моделирование с использованием программы Creo Elements Pro 5.0.
2. 3D-принтинг (в качестве устройств использовались установка 2PP (Two Photon Polymerization) при поддержке Лазерного центра г. Ганновер (Германия) и 3D-принтер Picaso Designer PRO 250 [5].

Результаты исследования. Был проанализирован ряд сосудистых протезов, наиболее часто применяемых в сосудистой хирургии. Были выявлены недостатки их прочности, которые могут привести к разрыву сосудистого протеза (см. рис. 1 и рис. 2), а также недостаточное совершенство их внутренней геометрии, что вызывает смену ламинарного кровотока в данном участке сосудистого русла на турбулентный.

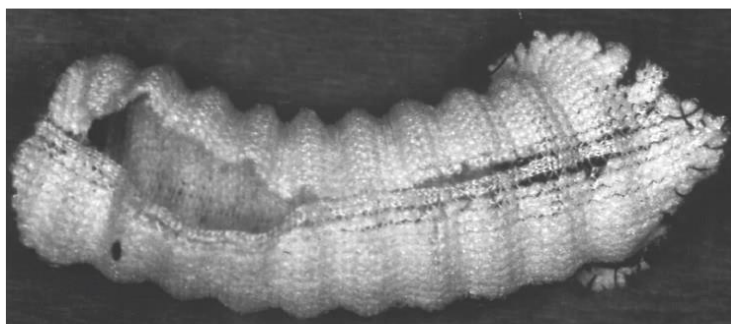


Рис. 1. Макроскопия разрыва сосудистого протеза.

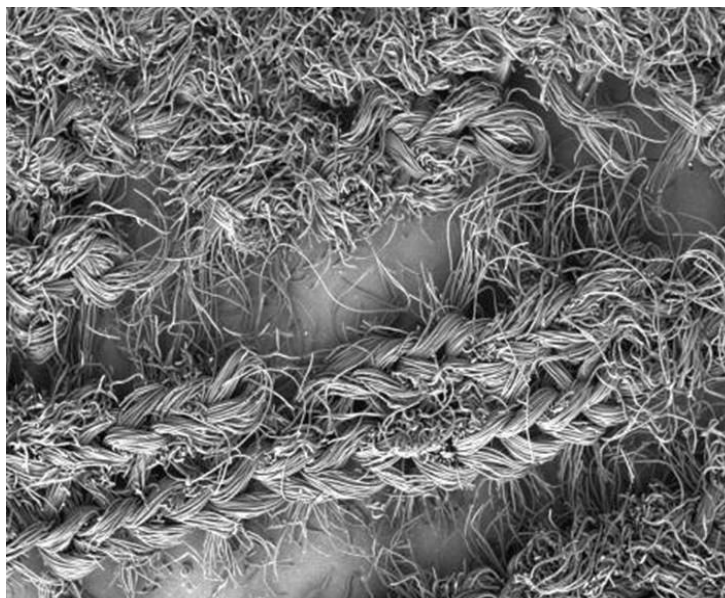


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия разрыва сосудистого протеза (увеличение в 250 000 раз).

Вследствие этого была предложена новая геометрия сосудистого протеза, отвечающего требованиям поддержания ламинарности кровотока (см. рис. 3).

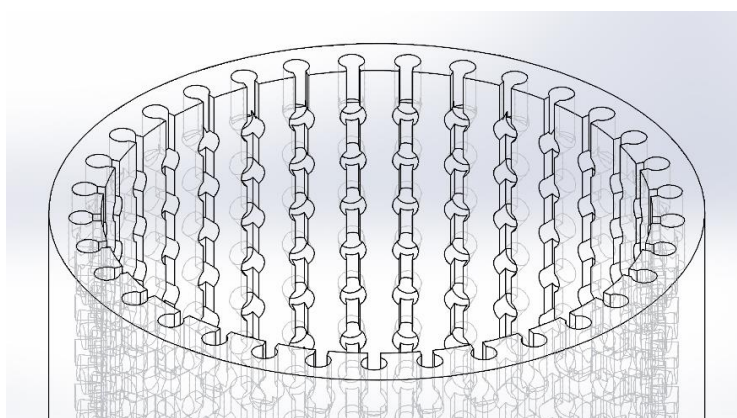


Рис. 3. Новая геометрия внутренней стенки сосудистого протеза.

Благодаря наличию отверстий в толще сосудистой стенки, сообщающейся с полостью сосудистого протеза, возможно врастание *vasa vasorum* и *vasa nervorum*. Геометрия и линейность контуров данного сосудистого протеза обеспечивают отсутствие турбулентности даже при нарушении его анатомической конфигурации.

В процессе выбора материала для изготовления сосудистого протеза были проанализированы различные химические соединения. Но каждый из материалов имел свои недостатки. При разработке данных сосудистых протезов, а именно малокалиберных, должны использоваться материалы, которые, кроме своей антитромботической активности, должны обладать биосовместимостью, биodeградацией, биологической активностью компонентов, сверхпластичностью, сверхупругостью. К таким материалам можно отнести PLA-материал (полилактид, мономером которого является молочная кислота). Он обладает всеми качествами, представленными выше, за исключением двух последних. Поэтому его последующий синтез с добавлением определенного вида пластификатора позволит добиться необходимых характеристик.

С использованием современного высокотехнологичного оборудования (установки 2PP) возможно получение любых геометрических фигур из различного вида полимерного материала (см. рис. 4), в том числе возможно получение и треугольника как самой устойчивой к деформациям фигуры.

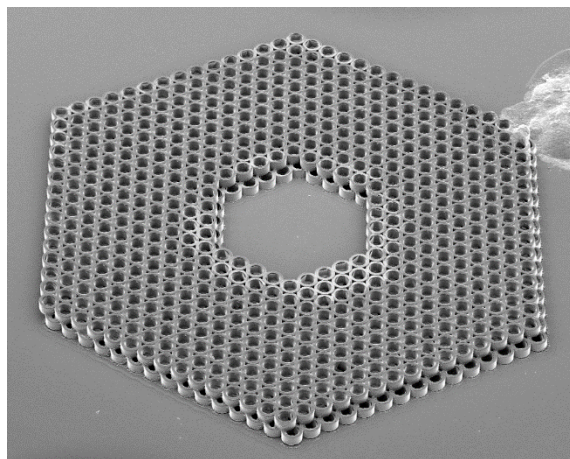


Рис. 4. Растровая электронная микроскопия шестиугольного скаффолда, полученная на установке 2PP из полимерного материала (увеличение в 25 раз).

При поиске методов и способов предотвращения бесконтрольной адгезии тромбоцитов на сосудистый протез без применения лекарственных препаратов были изучены патофизиологические механизмы данного процесса. Выяснено, что именно ламинарность кровотока, о которой упоминалось выше, выполняет защитную функцию, тем самым препятствуя бесконтрольной адгезии и агрегации тромбоцитов на сосудистой стенке. Кроме ламинарности, большого внимания заслуживает ионно-обменный механизм, благодаря

которому в сосудах по типу «сигнальной системы» происходит смена зарядов самой сосудистой стенки и некоторых форменных элементов для своевременного ее заживления.

Обсуждение. В результате проведенных исследований было выяснено, что процесс создания и изготовления сосудистых протезов должен иметь многогранный характер. С одной стороны, добиваясь нужной геометрии сосудистого протеза, нельзя забывать и о «ребрах жесткости». Известно, что наиболее устойчивой геометрической фигурой к деформациям является треугольник. Следовательно, при возникновении деформационных изгибов в сосудистом протезе внутренняя геометрия его стенок должна приближаться именно к трехгранной структуре. Это позволит предотвратить преждевременные повреждения и разрывы стенок сосудистого протеза. С другой стороны, необходим правильный выбор материала для будущего сосудистого протеза, который позволит выполнить не только требования, предъявляемые к биосинтетическому материалу, но и создать оптимальные условия для придания вышеуказанных «ребер жесткости» сосудистому протезу. С целью блокады чрезмерной адгезии и агрегации тромбоцитов на внутреннюю стенку протеза необходимо создать определенный заряд (часть положительного, часть отрицательного), что даст возможность контролировать этот процесс самим форменным элементом в большей степени, а стенка сосудистого протеза выступит в качестве дополнительного эквивалента.

Заключение. Использование новых технологий в создании химических соединений, их преобразование с помощью современного оборудования (установка 2PP, 3D-принтеры) и современных программ для 3D-моделирования в заданный объект находят свое применение и в медицине. Благодаря внедрению этих технологий возможно создание различных микроструктурных компонентов организма человека. Дальнейшие исследования в области создания данного сосудистого протеза и последующий его выход на рынок позволят повысить качество оказания медицинской помощи и снизить уровень смертности населения от васкулярных заболеваний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агейкин А. В., Темников В. А., Пронин И. А., Аверин И. А., Микуляк Н. И., Ионичева Л. В., Алмакаева А. Д., Димитров Д. Ц. Определение уровня залегания липидного ядра атеросклеротических бляшек в брюшной части аорты методом инфракрасной Фурье-спектроскопии // *Ангиология и сосудистая хирургия.* – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 52–57.

2. Рожкова Т. А., Титов В. Н., Амелюшкина В. А., Смирнов Г. П., Малышев П. П. Дифференциальная диагностика высокой гиперхолестеринэмии (клиническое наблюдение) // Атеросклероз и дислипидемии. – 2012. – № 2. – С. 36–38.
3. Meinhart J. G., Deutsch M., Fischlein T., Howanietz N., Froschl A., Zilla P. Clinical autologous in vitro endothelialization of 153 infrainguinal PTFE grafts // Annals Thoracic Surgery Journal. – 2001. – Vol. 71. – pp. 327–331.
4. Murohara T., Ikeda H., Duan J., Shintani S., Sasaki K., Eguchi H., Onitsuka I., Matsui K., Imaizumi T. Transplanted cord blood derived endothelial precursor cells augment postnatal neovascularization // Journal of Clinical Investigation. – 2000. – Vol. 105. – pp. 1527–1536.
5. Schilling T., Brandes G., Tudorache I., Cebotari S., Hilfiker A., Meyer T., Biskup C., Bauer M., Waldmann K.-H., Bach F.-W., Haverich A., Hassel T. In vivo degradation of magnesium alloy LA63 scaffolds for temporary stabilization of biological myocardial grafts in a swine model // Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering. – 2013. – Vol. 58, Issue 5. – pp. 407–416.