

Формирование микрорельефа и поверхностной пористости в остеопластическом материале на основе низкомолекулярного силиконового каучука

© Кузнецова¹⁺ Алия Рамилевна, Зенитова^{1*} Любовь Андреевна

Кафедра технологии синтетического каучука. Институт полимеров. Казанский национальный
исследовательский технологический университет. ул. К. Маркса, 68. г. Казань, 420015.
Республика Татарстан. Россия. Тел.: +7 (843) 231-41-61. E-mail: aliyshaa2811@gmail.com

*Ведущий направление; ⁺Поддерживающий переписку

Ключевые слова: остеопластический материал, силоксановый эластомер, СКТН-Г, шероховатость поверхности, пористость, хлорид натрия, выщелачивание, остеointеграция.

Аннотация

Исследовано влияние хлорида натрия (NaCl) как порообразующего агента на микрорельеф и пористую структуру остеопластического композита на основе низкомолекулярного силиконового каучука СКТН Г, наполненного аэросилом А 175 и отверждаемого неodecanoатом висмута (САТ 20А). Методами оптической профилометрии и микроскопии установлено, что введение 2-3 масс.ч. NaCl (фракция 100-200 мкм) приводит к увеличению средней шероховатости Ra с 6.22 до 20.05 мкм за счёт выступающих кристаллов соли. После выщелачивания NaCl в физиологическом растворе формируется поверхностная пористость 10-15% со средним диаметром пор около 88 мкм (диапазон 60.8-105.4 мкм), а шероховатость поверхности снижается до Ra = 4.77 мкм. Показано, что сформированный микрорельеф обеспечивает гидрофильность поверхности (краевой угол смачивания 75.7°), сохраняя при этом удовлетворительные физико-механические свойства (прочность на сжатие 1.96-2.04·10⁶ Па, эластичность 23-24%) и техно-логичность (время отверждения 9-10 мин.).

Дополнительно отмечено, что использованная фракция соли 100-200 мкм обеспечивает формирование пор преимущественно открытого типа, сообщающихся между собой, что важно для прорастания костной ткани и транспорта биологических жидкостей. Применение СКТН Г в качестве матрицы обусловлено его низкой вязкостью, способностью отверждаться при физиологических температурах и отсутствием токсичных продуктов реакции. Аэросил А 175 выполняет роль наполнителя и регулятора реологических свойств, а САТ 20А обеспечивает быстрое и равномерное отверждение композита.

Полученные результаты подтверждают перспективность разработанного материала для остеокондуктивного замещения костных дефектов. Технологическая простота метода, основанного на использовании легкоудаляемого порообразователя и быстром отверждении, делает материал привлекательным для масштабирования и потенциального внедрения в клиническую практику. Таким образом, предложенная стратегия формирования микрорельефа и пористости открывает возможности для создания эффективных остеопластических материалов с заданными характеристиками.

Выходные данные для цитирования русскоязычной печатной версии статьи:

Кузнецова А.Р., Зенитова Л.А. Формирование микрорельефа и поверхностной пористости в остеопластическом материале на основе низкомолекулярного силиконового каучука. *Бутлеровские сообщения*. 2026. Т.87. №8. С.123-133. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-8-123

Выходные данные для цитирования русскоязычной электронной версии статьи:

Кузнецова А.Р., Зенитова Л.А. Формирование микрорельефа и поверхностной пористости в остеопластическом материале на основе низкомолекулярного силиконового каучука. *Бутлеровские сообщения* А. 2026. Т.14. №3. Id.15. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-8-123/ROI-jbc-A/26-14-3-15 (Russian)

The output for citing the English online version of the article:

Alia R. Kuznetsova, Lyubov A. Zenitova. Formation of microrelief and surface porosity in an osteoplastic material based on low molecular weight silicone rubber. *Butlerov Communications A*. 2026. Vol.14. No.3. Id.15. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-8-123/ROI-jbc-A/26-14-3-15

Литература

- [1] Лосев Ф.Ф., Боровский Л.Б. Потребность в костно-пластических материалах в России с учётом распространённости дефектов костей и анализа рынка. *Стоматология*. **2025**. Т.104. №6. С.55-59. DOI: 10.35164/0554-2901-2025-06-1055. [F.F. Losev, L.B. Borovsky. The need for bone-plastic materials in Russia, considering the prevalence of bone defects and market analysis. *Stomatologiya*. **2025**. 104(6). P.55-59. DOI: 10.35164/0554-2901-2025-06-1055. (Russian)]
- [2] Полупан П.В., Сипкин А.М. Оценка результатов костнопластических операций в полости рта: осложнения и исходы. *Клиническая стоматология*. **2022**. Т.25. №1. С.54-61. DOI: 10.37988/1811-153X_2022_1_54. [P.V. Polupan, A.M. Sipkin. Evaluation of the results of bone-grafting operations in the oral cavity: complications and outcomes. *Clinical Dentistry*. **2022**. 25(1). P.54-61. (Russian). DOI: 10.37988/1811-153X_2022_1_54]
- [3] Ли Ц., Ван С., Сюй Ц. и др. Предварительный обзор модифицированного полиметилметакрилата и костного цемента на основе кальция для улучшения свойств при остеопоротических компрессионных переломах позвонков. *Frontiers in Materials*. **2022**. Т.9. Арт. 912713. DOI: 10.3389/fmats.2022.912713 [C. Li, S. Wang, J. Xu, *et al.* A preliminary review of modified polymethyl methacrylate and calcium-based bone cement for improving properties in osteoporotic vertebral compression fractures. *Frontiers in Materials*. **2022**. 9: 912713. DOI: 10.3389/fmats.2022.912713]
- [4] Муханов В.В., Сакалов Д.А., Денисов А.А. Костнозамещающие материалы в лечении крупных дефектов кости: клиническое применение и перспективы. *Bioimplantat.ru*. **2019**. [V.V. Mukhanov, D.A. Sakalov, A.A. Denisov. Bone-substituting materials in the treatment of large bone defects: clinical application and prospects. *Bioimplantat.ru*. **2019**. (Russian)]
- [5] Каучук силиконовый низкомолекулярный СКТН. Технические условия: ТУ 38.403-123-2016. Казань: АО «Казанский завод синтетического каучука». **2016**. 24с. [Low-molecular-weight silicone rubber SKTN. Technical specifications: TS 38.403-123-2016. *Kazan: JSC "Kazan Synthetic Rubber Plant"*. **2016**. 24p. (Russian)]
- [6] A. Colas, J. Curtis. Silicone biomaterials: history, chemistry and medical applications of silicones. Biomaterials science: An introduction to materials in medicine. 2nd ed. *Academic Press*. **2004**. P.697-712. DOI: 10.1016/B978-0-12-582460-6/50027-6.
- [7] Чжан Л., Хан С., Чжоу Ц. и др. Влияние микротопографии на остеоинтеграцию имплантируемых биоматериалов и стратегии её модификации. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. **2022**. Т.10. Арт.981062. DOI: 10.3389/fbioe.2022.981062 [L. Zhang, X. Han, J. Zhou, *et al.* Influence of microtopography on osseointegration of implantable biomaterials and strategies for its modification. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. **2022**. 10: 981062. DOI: 10.3389/fbioe.2022.981062]
- [8] Денисов А.А., Кузнецов И.А. Костно-пластические материалы для имплантологии: подробный обзор. *Bioimplantat.ru*. **2019**. [A.A. Denisov, I.A. Kuznetsov. Bone-plastic materials for implantology: a detailed review. *Bioimplantat.ru*. **2019**. (Russian)]
- [9] Ван В., Ли М., Лю С. Пористая конструкция и модификация поверхности материалов на основе титана для остеогенеза: обзор. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. **2022**. Т. 10. Арт. 973297. DOI: 10.3389/fbioe.2022.973297. [Wang W., Li M., Liu X. Porous design and surface modification of titanium-based materials for osteogenesis: a review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. **2022**. 10: 973297. DOI: 10.3389/fbioe.2022.973297.]
- [10] Кононович Н.А., Горбач Е.Н., Антонов Н.И. Интеграция костной ткани в пористые титановые имплантаты. *Гений ортопедии*. **2023**. Т.29. №4. С.412-418. DOI: 10.18019/1028-4427-2023-29-4-412-418. [N.A. Kononovich, E.N. Gorbach, N.I. Antonov. Integration of bone tissue into porous titanium implants. *The Genius of Orthopedics*. **2023**. 29(4). P.412-418. DOI: 10.18019/1028-4427-2023-29-4-412-418. (Russian)]
- [11] Оптимальная шероховатость поверхности имплантатов: technical review. *Altracore Biomedical*. **2019**. 12с. [Optimal surface roughness of implants: technical review. *Altracore Biomedical*. **2019**. 12p. (Russian)]
- [12] Олесеова В.Н., Мурашов М.А., Новиков А.В. Факторы, влияющие на остеоинтеграцию и применение ранней функциональной нагрузки для сокращения сроков лечения при дентальной имплантации. *Стоматология*. **2019**. Т.98. №4. С.84-89. DOI: 10.17116/stomat20199804184. [V.N. Olesova, M.A. Murashov, A.V. Novikov. Factors affecting osseointegration and the use of early functional loading to reduce treatment time in dental implantation. *Stomatologiya*. **2019**. 98(4). P.84-89. DOI: 10.17116/stomat20199804184. (Russian)]

- [13] A. Braem, A. Chaudhari, M.V. Cardoso, J. Schrooten, J. Duyck, J. Vleugels. Peri- and intra-implant bone response to microporous Ti coatings with surface modification. *Acta Biomaterialia*. **2014**. Vol.10. No.2. P.986-995. DOI: 10.1016/j.actbio.2013.10.017.
- [14] Вафина А.Р., Зенитова Л.А., Фазылова Д.И. Сравнительная оценка висмут- и оловоорганических катализаторов в синтезе биосовместимых кремнийорганических остеопластических композитов. *Ползуновский вестник*. **2026**. №2. С.207-214. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.027.
[A.R. Vafina, L.A. Zenitova, D.I. Fazylova. Comparative evaluation of bismuth- and organotin catalysts in the synthesis of biocompatible organosilicon osteoplastic composites. *Polzunovsky Vestnik*. **2026**. (2). P.207-214. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.027. (Russian)]
- [15] Вафина А.Р., Фазылова Д.И., Дулмаев С.Э. Современные методы отверждения силоксановых композиций (обзорная статья). *Вестник технологического университета*. **2021**. Т.24. №9. С.42-48.
[A.R. Vafina, D.I. Fazylova, S.E. Dulmaev. Modern methods of curing siloxane compositions (review article). *Herald of the Technological University*. **2021**. 24(9). P.42-48. (Russian)]
- [16] R.T. Tran, E. Naseri, A. Kolasnikov, X. Bai, J. Yang. A new generation of sodium chloride porogen for tissue engineering. *Biotechnology and Applied Biochemistry*. **2011**. Vol.58. No.6. P.405-412. DOI: 10.1002/bab.46
- [17] Шубладзе Г.К. Сравнение преимуществ анодированной поверхности имплантата с другими видами поверхностей. *Dental Magazine*. **2017**. №5. С.34–38. [G.K. Shubladze. Comparison of the advantages of an anodized implant surface with other surface types. *Dental Magazine*. **2017**. (5). P.34-38. (Russian)]
- [18] Макиров С.К., Голубева А.С., Сычеников Б.А. Применение различных костнопластических материалов при вертебро- и кифопластике (обзор литературы). *РМЖ*. **2016**. №23. С.1569-1574.
[S.K. Makirov, A.S. Golubeva, B.A. Sychenikov. The use of various bone-plastic materials in vertebro- and kyphoplasty (literature review). *RMJ*. **2016**. (23). P.1569-1574. (Russian)]
- [19] ГОСТ Р ИСО 14949-2014. Имплантаты для хирургии. Эластомеры силиконовые двухкомпонентные, полученные при отверждении в результате реакции присоединения. Москва: Стандартинформ, **2015**. 16с. [GOST R ISO 14949-2014. Implants for surgery. Two-part addition-cure silicone elastomers. Moscow: Standartinform. **2015**. 16p. (Russian)]
- [20] Кирилова И.А., Садовой М.А., Подорожная В.Т. Биорезорбируемые костные материалы: состояние в Российской Федерации. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. **2023**. Т.79. С.126-132. DOI: 10.1016/j.jtemb.2023.127255. [I.A. Kirilova, M.A. Sadovoy, V.T. Podorozhnaya. Bioresorbable bone materials: state of the art in the Russian Federation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. **2023**. 79. P.126-132. DOI: 10.1016/j.jtemb.2023.127255]
- [21] Alia R. Kuznetsova, Lyubov A. Zenitova. Formation of microrelief and surface porosity in an osteoplastic material based on low molecular weight silicone rubber. *Butlerov Communications A*. **2026**. Vol.14. No.3. Id.15. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-8-123/ROI-jbc-A/26-14-3-15
- [22] Кузнецова А.Р., Зенитова Л.А. Формирование микрорельефа и поверхностной пористости в остеопластическом материале на основе низкомолекулярного силиконового каучука. *Бутлеровские сообщения А*. **2026**. Т.14. №3. Id.15. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-8-123/ROI-jbc-A/26-14-3-15 (Russian)

The English version of the article has been published in the international edition of the journal

Butlerov Communications A
Advances in Organic Chemistry & Technologies

The Reference Object Identifier – ROI-jbc-A/26-14-3-15

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-8-123/ROI-jbc-A/26-14-3-15

Formation of microrelief and surface porosity in an osteoplastic material based on low-molecular-weight silicone rubber

© Alia R. Kuznetsova,⁺ Lyubov A. Zenitova*

*Department of Synthetic Rubber Technology. Institute of Polymers. Kazan National Research Technological University. Karl Marx St., 68. Kazan, 420015. Republic of Tatarstan. Russia.
Phone: +7 (843) 231-41-61. E-mail: aliyshaa2811@gmail.com*

*Supervising author; ⁺Corresponding author

Keywords: osteoplastic material, siloxane elastomer, SKTN-G, surface roughness, porosity, sodium chloride, leaching, osteointegration.

Abstract

The effect of sodium chloride (NaCl) as a porogenic agent on the microrelief and porous structure of an osteoplastic composite based on SKTN-G low-molecular-weight silicone rubber, filled with Aerosil A-175 and cured with bismuth neodecanoate (CAT 20A), was investigated. Using optical profilometry and microscopy, it was established that the introduction of 2-3 pbw of NaCl (100-200 μm fraction) leads to an increase in the average surface roughness (R_a) from 6.22 to 20.05 μm due to protruding salt crystals. After NaCl leaching in physiological saline, a surface porosity of 10-15% is formed with an average pore diameter of approximately 88 μm (range 60.8-105.4 μm), while the surface roughness decreases to ($R_a = 4.77$) μm . It was demonstrated that the formed microrelief ensures surface hydrophilicity (contact angle of 75.7°) while maintaining satisfactory physical and mechanical properties (compressive strength of $1.96\text{-}2.04 \cdot 10^6$ Pa, elasticity of 23-24%) and processability (curing time of 9-10 min).

Additionally, it was noted that the used salt fraction of 100-200 μm ensures the formation of predominantly open, interconnected pores, which is essential for bone tissue ingrowth and biological fluid transport. The application of SKTN-G as a matrix is attributed to its low viscosity, ability to cure at physiological temperatures, and the absence of toxic reaction byproducts. Aerosil A-175 acts as a filler and rheological property regulator, while CAT 20A ensures rapid and uniform curing of the composite.

The obtained results confirm the promise of the developed material for osteoconductive bone defect substitution. The technological simplicity of the method, based on the use of an easily removable porogen and rapid curing, makes the material attractive for scaling and potential implementation into clinical practice. Thus, the proposed strategy for microrelief and porosity formation opens up new avenues for designing effective osteoplastic materials with tailored characteristics.