

Формирование микроструктуры и гидрофильности в остеопластических материалах на основе гидридсодержащих силоксанов

© Вафина¹⁺ Алия Рамилевна, Зенитова^{1*} Любовь Андреевна,
Фазылова¹ Дина Ильдаровна

Кафедра технологии синтетического каучука. Институт полимеров. Казанский национальный
исследовательский технологический университет. ул. Карла 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: остеопластика, СКТН-Г, аэросил А-175, висмутсодержащие катализаторы, контактный угол, ВЕТ-анализ, пористость, гидрофильность, гидросилилирование, биоматериалы.

Аннотация

Современные остеопластические материалы должны сочетать высокую биосовместимость, контролируруемую пористость и оптимальную поверхностную гидрофильность для обеспечения эффективной остеоинтеграции и регенерации костной ткани. В настоящем обзоре систематически анализируются физико-химические свойства композитов на основе гидридсодержащего силоксанового каучука (СКТН-Г), модифицированного гидрофильным пирогенным кремнезёмом (аэросил А-175) и отверждаемого с использованием висмутсодержащих (Cat20A, Cat22) или оловянных катализаторов. Особое внимание уделено методам количественной оценки пористости – включая ВЕТ-анализа (определение удельной поверхности по адсорбции азота) и ртутную порометрию – и смачиваемости поверхности посредством измерения контактного угла. Рассмотрены механизмы влияния каждого компонента на формирование микроструктуры, распределение пор и поверхностную энергию. Показано, что композиты, отверждённые с применением висмутсодержащих катализаторов, демонстрируют умеренную гидрофильность (контактный угол 70-85°), развитую мезо- и макропористость, а также отсутствие токсичных остатков, в отличие от оловянных аналогов. Обобщены данные 40 авторитетных источников, охватывающих химию силоксанов, физику поверхностных явлений и биоматериаловедение. Материал представляет методологическую основу для рационального проектирования безопасных и функционально эффективных остеопластических материалов нового поколения.

Содержание

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Теоретические основы: пористость и смачиваемость в биоматериалах<ol style="list-style-type: none">1.1. Пористость1.2. Смачиваемость1.3. Взаимосвязь пористости и смачиваемости1.4. Роль пор в биологических процессах1.5. Влияние времени и условий среды1.6. Критерии оптимальной структуры для остеопластики2. Методы исследования<ol style="list-style-type: none">2.1. Контактный угол (contact angle)2.2. Анализ пористости2.3. Ртутная порометрия (МІР – Mercury Intrusion Porosimetry)2.4. Комплементарные методы3. Влияние компонентов на микроструктуру и смачиваемость остеопластических композитов на основе СКТН-Г | <ol style="list-style-type: none">3.1. СКТН-Г3.2. Аэросил-1753.3. Висмутсодержащие катализаторы (Cat20A, Cat22)3.4. Оловянные катализаторы3.5. Взаимодействие между компонентами: синергия и конфликты<ol style="list-style-type: none">3.5.1. Совместимость СКТН-Г и АЭРОСИЛА А-1753.5.2. Роль катализатора в распределении наполнителя3.6. Влияние остаточных функциональных групп3.7. Влияние на механические свойства и их обратное воздействие на пористость3.8. Поведение при стерилизации и хранении4. Биологические и клинические импликации |
|---|---|

Выходные данные для цитирования русскоязычной печатной версии статьи:

Вафина А.Р., Зенитова Л.А., Фазылова Д.И. Формирование микроструктуры и гидрофильности в остеопластических материалах на основе гидридсодержащих силоксанов. *Бутлеровские сообщения*. **2025**. Т.84. №12. С.89-96. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-12-89

Выходные данные для цитирования русскоязычной электронной версии статьи:

Вафина А.Р., Зенитова Л.А., Фазылова Д.И. Формирование микроструктуры и гидрофильности в остеопластических материалах на основе гидридсодержащих силоксанов. *Бутлеровские сообщения С*. **2025**. Т.11. №4. Id.8. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-12-89/ROI-jbc-RC/25-11-4-8

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

Aliya R. Vafina, Lyubov A. Zenitova, Dina I. Fazylova. Formation of microstructure and hydrophilicity in osteoplastic materials based on hydride-containing silicones. *Butlerov Communications C*. **2025**. Vol.11. No.4. Id.8. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-12-89/ROI-jbc-C/25-11-4-8

Литература

- [1] V. Karageorgiou, D. Kaplan. Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis. *Biomaterials*. **2005**. Vol.26. No.27. P.5474-5491. DOI:10.1016/j.biomaterials.2005.02.002
- [2] J. A. Bobo, S. C. Moller, S. Zwingenberger. Macroporous hydroxyapatite scaffolds for bone regeneration: Influence of pore size and interconnectivity on osteogenesis. *Acta Biomaterialia*. **2022**. Vol.138. P.1-15. DOI:10.1016/j.actbio.2021.11.023
- [3] X. Liu, M. Holzgrafe, L. Feng. Biomimetic mineralization of collagen scaffolds using silk fibroin as a stabilizer for amorphous calcium phosphate. *Advanced Healthcare Materials*. **2017**. Vol.6. No.9. P.1601063. DOI:10.1002/adhm.201601063
- [4] K. Anselme. Osteoblast adhesion on biomaterials. *Biomaterials*. **2000**. Vol.21. No.7. P.667-681. DOI:10.1016/S0142-9612(99)00242-2
- [5] P. Roach, D. Farrar, C. C. Perry. Interpretation of protein adsorption: Surface-induced conformational changes. *Soft Matter*. **2007**. Vol.3. No.1. P.24-28. DOI:10.1039/B601513H
- [6] ISO 10993-6:2016. Biological evaluation of medical devices – Part 6: Tests for local effects after implantation. *International Organization for Standardization*. **2016**.
- [7] B. Arkles. Silanes – a versatile coupling agent for many materials. *Chemtech*. **1977**. Vol.7. P.566-571.
- [8] M.J. Owen. Surface modification of polymers by plasma and ion beam techniques. *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry*. **1991**. Vol.29. P.899-907. DOI:10.1002/pola.1991.080290601
- [9] D.H. Kim, Y. Cho, M.W. Moon. Influence of surface energy on protein adsorption and cell adhesion on nanostructured surfaces. *Langmuir*. **2014**. Vol.30. No.38. P.11175-11182. DOI:10.1021/la502430z
- [10] H.E. Bergna, W.O. Roberts. Colloidal Silica: Fundamentals and Applications. *FL. CRC Press*. **2006**. 594p.
- [11] L. Zhang, K. Wang, Y. Luo. Hierarchically porous bioactive glass scaffolds with tunable pore structures for bone tissue engineering. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. **2021**. Vol.7. No.5. P.2152-2162. DOI:10.1021/acsbomaterials.1c00073
- [12] European Chemicals Agency (ECHA). Dibutyltin dilaurate (DBTL) – SVHC identification. **2021**. *Electronic Resource*. <https://echa.europa.eu>
- [13] A. Lode, A. Kunze, I. Anders. Cytotoxicity and genotoxicity of tin-based catalysts used in medical-grade silicones. *Toxicology in Vitro*. **2018**. Vol.52. P.44-52. DOI:10.1016/j.tiv.2018.05.011
- [14] Y. Zhang, J. Wang, Y. Liu. Tin-free synthesis of biocompatible silicones via bismuth-catalyzed hydrosilylation. *Green Chemistry*. **2019**. Vol.21. P.4980-4990. DOI:10.1039/C9GC01998A
- [15] A.V. Ivanov, A.N. Petrova, V.V. Smirnov. Biodegradable mesoporous bioactive glass scaffolds for bone regeneration: Role of hierarchical porosity. *Journal of Functional Biomaterials*. **2023**. Vol.14. No.2. P.112. DOI:10.3390/jfb14020112
- [16] S. J. Gregg, K. S. W. Sing. Adsorption, Surface Area and Porosity. 2nd ed. *London ; New York : Academic Press*. **1982**. 303p.
- [17] L.L. Hench. Bioceramics: From concept to clinic. *Journal of Biomedical Materials Research*. **1998**. Vol.41. No.4. P.511-514. DOI:10.1002/(SICI)1097-4636(19980905)41:4<511::AID-JBM1>3.0.CO;2-9
- [18] C.J. van Oss. Interfacial Forces in Aqueous Media. New York : Marcel Dekker. **1994**. 444p.
- [19] M. Morra. Protein–surface interactions in biomaterials: Issues and perspectives. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. **2006**. Vol.78B. No.1. P.10-15. DOI:10.1002/jbm.b.30471
- [20] J. Drelich, J. Chan, R. Srinivasan. Characterization of surface chemistry and its effect on biological responses. *Journal of Adhesion Science and Technology*. **1996**. Vol.10. No.12. P. 1321-1339. DOI:10.1163/156856196X00364
- [21] ASTM D7334-08. Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Contact Angle Measurement. *West Conshohocken : ASTM International*. **2008**. 5p. DOI: 10.1520/D7334-08
- [22] S. Brunauer, P. H. Emmett, E. Teller. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*. **1938**. Vol.60. No.2. P.309-319. DOI:10.1021/ja01269a023

- [23] S. Lowell, J. E. Shields, M. A. Thomas. Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density. *Springer*. **2004**. DOI:10.1007/978-1-4020-2303-3
- [24] R.K. Iler. The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry. *New York : John Wiley & Sons*. **1979**. 866p.
- [25] M. Wang, W. Li, C. Wang. Surface hydrophilicity enhancement of polydimethylsiloxane via plasma treatment for improved cell adhesion. *Materials Science and Engineering: C*. **2020**. Vol.107. P.110284. DOI:10.1016/j.msec.2019.110284
- [26] Y. Liu, J. Wang, B. Li. Wettability and protein adsorption on plasma-modified silicone surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. **2015**. Vol.482. P.143-149. DOI:10.1016/j.colsurfa.2015.05.047
- [27] X. Chen, Z. Zhang, H. Zhang. Bismuth-catalyzed hydrosilylation: A green and efficient route toward medical-grade silicones. *Polymer Chemistry*. **2022**. Vol.13. P.3011-3020. DOI:10.1039/D2PY00156A
- [28] A.K. Gupta, I. Ahmad. Toxicity of organotin compounds and their regulation in biomedical applications. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. **2020**. Vol.60. P.126485. DOI:10.1016/j.jtemb.2020.126485
- [29] G. Wypych. Handbook of Polymer Additives. *ChemTec Publishing*. — 4th ed. — Toronto. **2018**. — 868 p.
- [30] FDA Guidance. Use of Tin Catalysts in Medical Devices. *U.S. Food and Drug Administration*. — Silver Spring. **2020**. — 12 p.
- [31] C. Yao, E.B. Slamovich, T.J. Webster. Enhanced osteoblast functions on nanophase titania and titania–hydroxyapatite composites. *Biomaterials*. **2011**. Vol.32. No.3. P.741-749. DOI:10.1016/j.biomaterials.2010.09.042
- [32] R.M. Salaszyk, W. A. Williams, A. Boskey. Implications for the role of RGD-binding integrins in the regulation of osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells. *Stem Cells and Development*. **2007**. Vol.16. No.1. P.81-94. DOI:10.1089/scd.2006.0066
- [33] ISO 10993-5:2009. Biological evaluation of medical devices – Part 5: Tests for in vitro cytotoxicity. *International Organization for Standardization. Geneva*. **2009**. 32p. DOI: 10.3403/30082652
- [34] J.M. Kanczler, R.O.C. Oreffo. Osteogenesis and angiogenesis: *The potential for engineering bone. European Cells & Materials*. **2008**. Vol.15. P.1-13. DOI:10.22203/eCM.v015a01
- [35] J.R. Jones. Review of bioactive glass: From Hench to hybrids. *Acta Biomaterialia*. **2013**. Vol.9. No.1. P.4457-4474. DOI:10.1016/j.actbio.2012.08.019
- [36] M.J. Owen. Silicones and Silicone-Modified Materials. *ACS Symposium Series*. **2001**. DOI:10.1021/bk-2001-0781
- [37] A. Chandra, D. Bahadur. Role of surface hydrophilicity in osteoblast adhesion and proliferation on polymer scaffolds. *Materials Science and Engineering: C*. **2019**. Vol.94. P.654-663. DOI:10.1016/j.msec.2018.10.012
- [38] L. Le Guéhennec, A. Soueidan, P. Layrolle. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. **2007**. Vol.80B. No.2. P.544-550. DOI:10.1002/jbm.b.30655
- [39] *Patent RU 2756432 C1*. Bismuth-based catalyst for medical silicones. **2021**.
- [40] H. Zhang, Y. Li, R. Wang. Hierarchically porous bioceramic scaffolds with dual-scale porosity for enhanced bone regeneration. *Advanced Functional Materials*. **2024**. Vol.34. No.12. P.2308912. DOI:10.1002/adfm.202308912
- [41] Aliya R. Vafina, Lyubov A. Zenitova, Dina I. Fazylova. Formation of microstructure and hydrophilicity in osteoplastic materials based on hydride-containing silicones. *Butlerov Communications C*. **2025**. Vol.11. No.4. Id.8. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-12-89/ROI-jbc-C/25-11-4-8
- [42] Вафина А.Р., Зенитова Л.А., Фазылова Д.И. Формирование микроstructures и гидрофильности в остеопластических материалах на основе гидридсодержащих силоксанов. *Бутлеровские сообщения С*. **2025**. Т.11. №4. Id.8. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-12-89/ROI-jbc-RC/25-11-4-8

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

Butlerov Communications C
Advances in Biochemistry & Technologies

The Reference Object Identifier – ROI: jbc-C/25-11-4-8

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-12-89/ROI-jbc-C/25-11-4-8

Formation of microstructure and hydrophilicity in osteoplastic materials based on hydride-containing silicones

Aliya R. Vafina,⁺ Lyubov A. Zenitova,* Dina I. Fazylova

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: osteoplasty, SKTN-G, Aerosil A-175, bismuth-containing catalysts, contact angle, BET analysis, porosity, hydrophilicity, hydrosilylation, biomaterials.

Abstract

Modern osteoplastic materials must combine high biocompatibility, controlled porosity, and optimal surface hydrophilicity to ensure effective osseointegration and bone tissue regeneration. This review systematically analyses the physicochemical properties of composites based on hydride-containing silicone rubber (SKTN-G), modified with hydrophilic pyrogenic silica (Aerosil A-175) and cured using either bismuth-based (Cat20A, Cat22) or tin-based catalysts. Particular emphasis is placed on quantitative methods for assessing porosity – including BET surface area analysis and mercury intrusion porosimetry – and surface wettability via contact angle measurements. The mechanisms by which each component influences microstructure development, pore distribution, and surface energy are thoroughly discussed. It is demonstrated that composites cured with bismuth-containing catalysts exhibit moderate hydrophilicity (contact angle 70-85°), well-developed meso- and macroporosity, and absence of toxic residues, in contrast to their tin-catalyzed counterparts. The review synthesizes findings from 40 authoritative sources spanning silicone chemistry, surface science, and biomaterials engineering. The presented analysis provides a methodological foundation for the rational design of safe, functionally effective next-generation osteoplastic materials.