

УДК 616.716+617.52]-089-085+546.281.261



В. О. Маланчук¹, В. С. Кисельов², О. І. Жуковцева¹,
Ю. В. Чепурний¹, Т. А. Алексеева³

¹ Національний медичний університет імені О. О. Богомольця, Київ

² Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ

³ Інститут хімії поверхні імені О. О. Чуйка НАН України, Київ

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ БІОМОРФНОГО КАРБІДУ КРЕМНІЮ В ЩЕЛЕПНО-ЛИЦЬОВІЙ ХІРУРГІЇ

Наведено огляд літератури щодо перспектив застосування в медицині нової біоморфної кераміки на основі карбіду кремнію, створеної за принципами біоміметики. Описано шляхи її отримання. Вивчено переваги застосування та особливості взаємодії цього матеріалу з живими клітинами організму. Висвітлено можливості застосування біоморфного карбіду кремнію вітчизняного виробництва в медицині, зокрема в щелепно-лицьовій хірургії та стоматології.

■

Ключові слова: біоморфна кераміка, карбід кремнію, імплантат, реконструктивна хірургія.

Останнім часом з'явився новий клас імплантатних матеріалів, створених відповідно до принципів біоміметики. Такі матеріали синтезовано з біологічних тканин або вони мають властивості, аналогічні до таких живих структур чи біологічно активних продуктів їх життєдіяльності. Великий інтерес становлять матеріали, які є псевдоморфними біологічними об'єктами [28]. Наприклад, рослинна сировина, зокрема деревина та її похідні, мають складну структуру та відзначаються значною механічною стійкістю щодо пошкоджень, низькою щільністю, високою жорсткістю та еластичністю. Зазначені переваги зумовлені генетично детермінованою будовою, яка розвивалася та вдосконалювалася в процесі еволюції [12].

Подібність мікро- і макроархітекtonіки, біомеханічних властивостей деревини та кісткової тканини відзначав ще творець мікроскопа Антоній Ван Левенгук. Волокниста будова деревини нагадує ієрархічну будову кісткової тканини з остеонами та гаверсовими каналами. Схожа просторова організація структурних одиниць деревини та кісткової тканини є передумовою аналогічного функціонального призначення: формування підтримувального каркаса з високою механічною стійкістю та забезпечення умов для живлення системи крізь мережу

каналів і каналців з певною просторовою організацією для створення механічної протидії навантаженню різного виду. Підтвердженням функціональної подібності дерева та кістки є їх здатність до ремодельовання внутрішньої структури у відповідь на зовнішнє, найчастіше — механічне подразнення, наявність камбіального клітинного шару для периферичного збільшення об'єму, а також постійне самовідновлення [25]. Деревина як матриця для виготовлення вуглецевих матеріалів з природною архітекtonікою привертає увагу дослідників з різних країн. На основі цієї сировини останнім часом виробляють нові види керамічних матеріалів.

Виготовлення кераміки з біоморфними властивостями в більшості випадків передбачає два основних етапи: створення вуглецевої матриці з біологічної заготовки та перетворення її на кераміку. Наявність вуглецевої матриці біологічного об'єкта дає змогу отримати матеріал, псевдоморфний цьому об'єкту, який матиме аналогічну до біологічного зразка структуру на мікро-, мезо- та макро-рівні. Природні ієрархічні пористі структури мають високий рівень складності, який не доступний при інших сучасних технологіях виготовлення [1].

Потенційно перспективний матеріал зазначеного класу розроблено в Інституті фізики напів-

Жуковцева Олена Ігорівна, аспірант
E-mail: zhukovtceva_o_i@ukr.net

© В. О. Маланчук, В. С. Кисельов, О. І. Жуковцева, Ю. В. Чепурний, Т. А. Алексеева, 2015

провідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України. Досліджені властивості біоморфного композиту на основі карбиду кремнію (так званої екокераміки або біо-SiC (ecoceramics, environment conscious ceramics)) можуть значно розширити арсенал лікувальних методик у реконструктивно-пластичній хірургії щелепно-лицьової ділянки.

Найбільш поширеним та ефективним шляхом отримання біоморфної кераміки є її виготовлення з «канальних» вуглецевих матриць, які отримують шляхом піролізу (обвуглення) різних сортів деревини. Також можливе отримання вуглецевих каркасів шляхом перетворення картону, зерен та ін.

Технологія синтезу біоморфного SiC складається з декількох етапів (рис. 1):

1. Підготовка заготовки із сухої деревини, розмір якої на 20—25 % перевищує розмір майбутнього виробу для компенсації усадки заготовки при піролізі.

2. Процес піролізу, який проводять у потоці інертного газу (аргону, азоту): повільне нагрівання заготовки протягом 5—10 год (залежно від розміру зразка) до температури 900 °С, при якій видаляються леткі складові (вода, CO₂, кислоти, карбонільні групи та спирти). Основні компоненти матеріалу, які є складовими комірок деревини, перетворюються на вуглецеві структури.

3. Формування виробу. На цьому етапі вуглецевій матриці надають необхідної форми, оскільки вона легко піддається обробці. За потреби роблять отвори, нарізають різьбу тощо. Важливою особливістю цього процесу є те, що після просочування кремнієм та отримання вихідної кераміки механічну обробку можна проводити лише із застосуванням алмазного інструменту.

4. Для перетворення вуглецевих матриць на SiC-кераміку застосовують процес примусового просочування рідким кремнієм та синтез SiC [1, 21]. Необхідною умовою для проведення зазначеного процесу є наявність у матрицях пористої структури з відкритою системою каналних пор. Інфільтрацію кремнієм проводять у вакуумі за температур, які перевищують температуру плавлення кремнію (1420 °С). Реакція може бути представлена як $C_{sol} + Si_{liq} \rightarrow SiC_{sol}$.

Біоморфна кераміка є композиційним матеріалом, склад та властивості якого залежать від технологічних умов виготовлення. Застосування процесу примусового просочування дає змогу в певних межах змінювати склад і властивості кінцевого продукту. Залежно від співвідношення маси вуглецевої матриці і кремнію можна одержувати композити SiC/C або SiC/Si. За потреби надлишковий вуглець при утворенні SiC/C-композиту випалюють в атмосфері кисню за температури 900 °С протягом 2—3 год. Політипний склад карбиду кремнію залежить від температури синтезу. За температури менш ніж 1700 °С утворюються кристали кубічного SiC, а за температури понад 1700 °С — 6H-SiC [35].

Механічні властивості біоморфної кераміки збільшуються з підвищенням кількості надлишкового кремнію у SiC/Si-композиті [20].

5. За потреби оброблюють вироби за допомогою алмазного інструменту. Запропонована технологія дає змогу виготовляти вироби складних конфігурацій для застосування в медицині, зокрема в щелепно-лицьовій хірургії (рис. 2).

Вибір вихідної деревини значною мірою визначає важливі властивості біокераміки — щільність і пористість структури. Існують два види деревних порід: листяні (hardwood, dicotyledonous, angiosperms) і хвойні (softwoods, coniferous wood або gymnosperms), які відрізняються за анатомічною структурою. Для виготовлення біоморфних керамічних матеріалів найчастіше використовують листяні породи деревини. Це пов'язано з тим, що такі породи мають мультимодальний розподіл судин. У літературі, присвяченій біоморфній кераміці, судини часто називають порами, вони є типовими для листяних дерев і у різних порід на перерізі стовбура можуть розподілятися різним чином. Серед листяних порід розрізняють кільцеві судинні та розсіяно-судинні породи. В останніх дрібні й великі судини розташовані відносно рів-

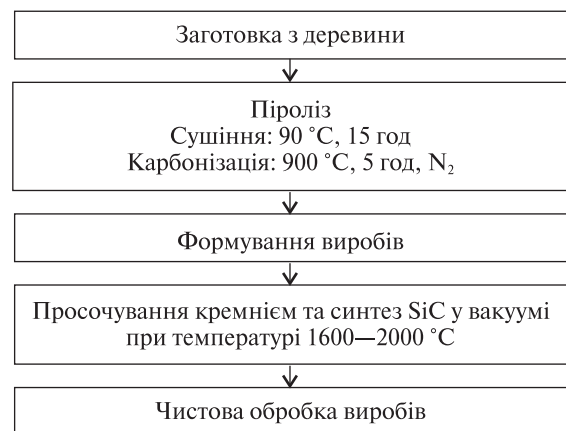


Рис. 1. Схема виготовлення карбиду кремнію



Рис. 2. Фотографії отриманих зразків SiC

номірно по перерізу стовбура, тому біоморфна кераміка з них має досить однорідну будову і, відповідно, кращі механічні властивості.

Інтерес медиків до карбіду кремнію зумовлений його особливою структурою з розвинутою системою каналних пор розміром від 20 до 100 мкм, що нагадує структуру кісткової тканини. Здатність кремнію (Si) позитивно впливати на процеси мінералізації кісткової тканини, відзначено в 1970 р. [11]. Численні роботи свідчать про вищі адаптаційні властивості вуглецю щодо стромальних стовбурових клітин кісткового мозку людини порівняно з матеріалом на основі біологічного гідроксіапатиту. Зокрема встановлено, що введення матеріалу з домішкою вуглецю в середовище культивування спричинило утворення багатошарових колоній, що свідчить про стимуляцію структурнотворного потенціалу стовбурових клітин-попередників [3].

До властивостей біоморфного SiC належать висока пористість матеріалу, хімічна інертність, яка виявляється резистентністю до корозії в агресивних середовищах, висока міцність (5,8 ГПа), значний модуль еластичності (424 ГПа) з низьким коефіцієнтом стиснення (0,17), що робить його, на думку деяких авторів, ідеальним матеріалом для «розумних» імплантатів [15]. Щодо здатності до корозії, то для SiC вона становить менше 30 нм на рік [6, 9, 19]. Це дає підстави вважати, що для біоморфного SiC не характерна здатність до біодеградації.

Механічні властивості кераміки значною мірою залежать від її пористості. Модуль пружності біоморфного SiC зменшується зі збільшенням пористості та концентрації домішок. Відомо, що біоморфний SiC належить до матеріалів з високою твердістю. Твердість — комплексна властивість матеріалу, яка залежить від умов його отримання, складу та домішок. Твердість кераміки в перпендикулярному до осі росту деревини напрямку в 2—3 рази нижча, ніж у паралельному, збільшується при збільшенні геометричної щільності та зменшується при збільшенні пористості. Збільшення щільності кераміки зумовлене збільшенням кількості залишкового кремнію, який заповнює частину пор і таким чином зменшує пористість матеріалу. Відповідно існує можливість створення біоморфного SiC з необхідними механічними властивостями [36]. Саме можливість створення нових SiC-матеріалів з різними фізичними та хімічними властивостями шляхом відтворення рослинної морфології, є потенційно важливою їх ознакою для використання імплантатів на їх основі у щелепно-лицьовій хірургії [12].

Також можливе отримання необхідної архітекtonіки матеріалу залежно від виду обраної для переробки деревини (твердої або м'якої) або інших об'єктів (папір, картон, зерно тощо) [31]. Таким чином, кераміка, яка відображує біологічну структуру природних тканин, викликає значний інтерес

як матеріал медичного призначення. Механічні властивості цього матеріалу залежать не лише від складу та пористості, а й від розміру, форми та орієнтації пор і каналців. Це пояснюється тим, що природна тривимірна структура є матрицею для клітин організму, в який поміщають матеріал з подібною структурою. Ця структура потенційно може стати шаблоном для регенерації. Доведено, що поверхневі властивості матеріалу можуть впливати на адгезію та проліферацію клітин, визначати їх фенотип. Пористість матеріалу має важливе значення для забезпечення живлення клітин шляхом вrostання судин з навколишніх тканин для транспорту поживних речовин. Низька маса, біологічна сумісність з фібробластими та остеобlastами, наявність системи пор та каналців є передумовами ефективного застосування зазначеного матеріалу в медицині і зокрема в хірургії [26].

С. Coletti та співавтори, досліджуючи біосумісність кристалічного SiC, оцінили якість клітинної адгезії та проліферації. Вони встановили високу біосумісність цього матеріалу і чинники, які їй сприяють, — гідрофільність та характер хімічної взаємодії на поверхні матеріалу [14].

Дослідженню SiC *in vitro* присвячено поодинокі роботи. Зокрема, група дослідників на чолі з G. Kotzara проаналізували накопичення остеобlastів та гінгівальних фіброblastів шляхом радіочастотного напilenня протягом 3 тиж на зразках SiC [22]. Вони встановили, що SiC є цитосумісним за всіма показниками, хоча прикріплення фіброblastів та остеобlastів виявилось недостатньо задовільним. За даними іншого дослідження, виявлено відсутність цитотоксичної реакції аморфного SiC-композиту в експерименті на культурах щурячих фіброblastів L92 [4]. У дослідженні С. Сogan та співавторів підтверджено біосумісність імплантованих кварцових дисків, покритих SiC, в експерименті на тваринах [13]. Гістологічний аналіз показав відсутність хронічної запальної реакції та наявність тонкої капсули порівняно з кремнієм або кварцем без покриття, які було використано як контроль. В інших роботах також підтверджено високий рівень тканинної біосумісності зразків SiC [7—9, 26, 29]. Усі зазначені дослідження проводили з використанням аморфного або кристалічного SiC. Практично немає даних щодо біосумісності біоморфного SiC та його взаємодії з живими тканинами на макро-, мікро- та нанорівні в експерименті. Не досліджено цитотоксичність та біоінертність біоморфної SiC-кераміки, характер репаративного остеогенезу в ділянці контакту біоморфного SiC з кістковою тканиною. Особливості взаємодії цієї кераміки з кістковою тканиною практично не досліджені щодо можливості її клінічного використання, зокрема в стоматології та щелепно-лицьовій хірургії.

Одним з актуальних завдань сучасної щелепно-лицьової хірургії є пошук і розроблення нових

імплантаційних матеріалів з метою розширення арсеналу лікувальних засобів для усунення дефектів, деформацій тканин або надання їм нової форми і функції. Проведення деяких щелепно-лицьових операцій потребує застосування штучних матеріалів як фіксаторів кісткових фрагментів, бар'єрів між різними видами тканин, опор для утримання форми або здійснення певної специфічної функції. Останніми роками з'явилися дані про перспективність застосування SiC-кераміки в медицині. Як зазначено вище, карбідкремнієва кераміка має низку потенційно корисних властивостей: висока механічна міцність, малий коефіцієнт термічного розширення, низька щільність, хімічна інертність, стійкість до окиснення і корозії. Завдяки високій біосумісності цей матеріал можна використовувати для виготовлення імплантатів різного призначення [17, 28].

Щодо практичного медичного використання, то нині застосування карбіду кремнію досліджують у різних галузях медицини. зокрема вивчається можливість його використання у виробництві стентів судин завдяки високим показникам гемосумісності та тромборезистентності різних форм карбіду кремнію. Ймовірною причиною тромбоутворення при введенні імплантатів як стентів є електронна взаємодія (перехід електронів між енергетичними рівнями) при близькому розташуванні молекул фібриногену до поверхні імплантату. Тому умовою тромборезистентності матеріалу є відсутність взаємодії такого роду, зокрема умов для переходу електронів між порожніми енергетичними рівнями за рахунок зниженої щільності останніх. Іншою умовою є відсутність електростатичного заряду на поверхні матеріалу. Саме такі властивості притаманні карбіду кремнію, який досліджують як внутрішнє покриття для судинних стентів. Зокрема експериментально доведено низький рівень накопичення фібрину та фібриногену при контакті зразка SiC з кров'ю і, відповідно, високий рівень резистентності щодо тромбоутворення [33]. Також встановлено, що покриття з SiC є резистентним до адгезії тромбоцитів [7, 8]. Кілька груп дослідників установили, що тромборезистентність SiC на 200% вища за таку титанових імплантатів та вуглецевих матеріалів. Ця властивість відкриває широкі перспективи для використання покриття з SiC при виготовленні катетерів, штучних клапанів серця, стентів, біологічних внутрішньосудинних сенсорів. На підставі результатів експериментальних досліджень стенти з карбідкремнієвим покриттям застосовують при лікуванні хворих на інфаркт міокарда з обнадійливим найближчим та віддаленим результатом [27, 30].

Перспективним напрямом сучасних біомедичних досліджень є розробка та експериментальне обґрунтування застосування біосенсорних систем, які мали б здатність отримувати і передавати інформацію щодо перебігу певних біологічних

процесів усередині організму. Останнім часом досягнуто значних успіхів у мініатюризації та спрощенні біохімічних і хімічних сенсорних пристроїв [5]. Припускають, що зменшення розмірів дасть змогу підвищити швидкість роботи, точність вимірювання і значно зменшити вартість пристрою. Актуальним у цьому аспекті є застосування напівпровідників з високою біосумісністю. За даними досліджень останніх років, використання різних форм SiC із зазначеною метою виявилось перспективним та обнадійливим. Можливість культивування живих клітин на поверхні SiC є підставою для застосування пристроїв з цього матеріалу як біосенсорів [15]. Створення органічного шару на поверхні напівпровідника, нерозривно з ним пов'язаного, є ключовою передумовою використання біосенсорних систем [10, 16, 34].

Важливе значення для використання пристроїв із SiC має їх здатність сприймати електричні сигнали, генеровані живими клітинами. Існує можливість створення та застосування біосенсорів із SiC на нанорівні організму. В дослідженнях мікроелектромеханічних систем на основі SiC встановлено, що при їх застосуванні не виникає біонесумісність [22]. Завдяки SiC вдається значно збільшити площу поверхні системи без зміни розмірів робочих волокон, що дає змогу створити вищу щільність заряду такої геометричної поверхні [32]. На основі карбідкремнієвої кераміки створено експериментальні моделі датчиків імпедансу і температури для медичних голок, які можна застосовувати для оцінки стану тканин у хірургії серця, трансплантаційній хірургії та при транспортуванні донорських органів [18].

Таким чином, основними характеристиками SiC-кераміки, які привертають увагу науковців у галузі біосенсорних медичних систем, є висока біосумісність цього матеріалу, тобто можливість безпосереднього контакту живих клітин з його поверхнею, а також висока пористість матеріалу та його властивості напівпровідника. Мікроструктура поверхні має як біологічне, так і фізичне значення. Завдяки особливостям архітектоники є можливість культивувати шар клітин на поверхні матеріалу. Рельєф поверхні дає змогу створити вищу щільність електричного заряду. Ці властивості можуть бути використані і у щелепно-лицьовій хірургії.

В останнє десятиліття дедалі більше дослідників приділяють увагу біоморфній кераміці на основі SiC як матеріалу для виготовлення стоматологічних імплантатів та ортопедичних конструкцій [24]. Це пояснюється високими показниками біосумісності матеріалу та механічними властивостями. Відомо, що для ефективного використання матеріалу для виготовлення внутрішньокісткових імплантатів необхідна низка умов: наявність у матеріалу значної механічної міцності, можливість формування міцного зв'язку між поверхнями матеріалу та кісткової тканини, а також біосуміс-

ність матеріалу. Досліджують можливість застосування біоморфного SiC для використання його в дентальній імплантації. Порівняно з біоморфним SiC титан марок, які традиційно застосовують для виготовлення дентальних імплантатів, має приблизно на 40 % нижчі показники механічної міцності. Є можливість змінювати механічні параметри біоморфної кераміки залежно від виду деревини для її отримання, тобто потенційно існує можливість виготовлення кераміки з різними механічними властивостями для імплантації у різні види кісткової тканини.

З огляду на дифузію іонів титану в навколишній тканини, тривають дослідження можливості використання SiC як покриття для титанових імплантатів. На думку дослідників, це обґрунтовано відсутністю явища корозії у кераміки на основі SiC [29].

Великий інтерес викликають порівняльні дослідження властивостей металів, які традиційно застосовують для виготовлення ортопедичних конструкцій (титан, кобальт-хромовий сплав та медична сталь), із SiC-керамікою. Такі властивості сплавів металів, як металоз, корозія, іонна дифузія, які часто є причиною зношуваності металевих ортопедичних конструкцій, теоретично не характерні для SiC. Зокрема встановлено, що твердість SiC більш ніж у 4 рази перевищує таку кобальт-хромового сплаву, що є найтвердішим серед зазначених металів. Модуль пружності SiC (380) подібний до такого для кобальт-хромового сплаву (300–370), і близький до показника кісткової тканини (120 МПа та більше), модуль пружності титану та сталі значно нижчий (127 та 223 відповідно) [2, 23].

Коефіцієнт зношуваності при критичному навантаженні для SiC удвічі більший, ніж для титану та кобальт-хромового сплаву, і втричі — ніж для сталі. Таким чином, порівняно з металами, які зазвичай використовують для виготовлення ортопедичних імплантатів, SiC має вищі хіміко-фізичні показники (твердість, модуль пружності, стійкість до механічних пошкоджень та зношуваності). Для SiC характерне найкраще співвідношення механічних якостей та стійкості до дії руйнівних чинників, що свідчить на користь останнього як матеріалу вибору для виготовлення ортопедичних конструкцій [23].

Отже, більшість дослідників високо оцінюють можливість застосування біоморфної кераміки на основі SiC з урахуванням високої механічної стійкості, біоінертності, відсутності корозії, можливості виготовлення виробів різної форми, доступності та відновлюваності ресурсів для її отримання. Привабливою є можливість застосування біо-

морфного SiC у щелепно-лицьовій хірургії для виготовлення імплантатів, як дентальних, так і для контурної пластики, при усуненні дефектів та деформацій щелепно-лицьової ділянки. Це сприятиме підвищенню якості надання допомоги постраждалим такого профілю.

Однак більшість досліджень можливості застосування імплантатів із SiC мають лише експериментальний характер. Вони стосуються різних видів матеріалів на основі SiC. Тому існує необхідність в експериментальному обґрунтуванні клінічного використання імплантатів з біоморфної кераміки. Практичне використання цього матеріалу в щелепно-лицьовій хірургії видається перспективним. Однак практичних рекомендацій щодо його клінічного застосування немає, так само, як методи його використання в лікуванні пацієнтів з дефектами та деформаціями кісток лицевого черепа. Основна причина цього — брак даних щодо морфологічних особливостей взаємодії кісткової тканини зі зразками біоморфної кераміки на основі SiC.

Таким чином, аналіз даних літератури свідчить про те, що біоморфна кераміка на основі SiC має низку позитивних якостей, які можуть бути використані для кістково-замісної хірургії, зокрема для щелепно-лицьової. Зокрема завдяки високій міцності при різних видах навантаження біоморфна кераміка може протидіяти руйнівному впливу жувального навантаження або тяги м'язів щелепно-лицьової ділянки, але досліджень у цьому напрямі не проведено. Зазначений матеріал розглядають як можливу альтернативу титану та його сплавам, але кількість наукових праць з цього питання обмежена. Актуальним є дослідження взаємодії біоморфної кераміки на основі SiC з кістковою тканиною, характеру імунної відповіді живих тканин на введення матеріалу, ступеня його цитотоксичності. З огляду на технологічні можливості створення матеріалу та високі показники його біосумісності, відзначені у низці наукових праць, видається потенційно можливим та ефективним застосування біоморфної кераміки на основі SiC для виготовлення імплантатів різного призначення.

В експерименті отримано дані щодо природи взаємодії SiC з живими тканинами, але не досліджено практичне застосування цього матеріалу в людини. Впровадження зазначеного матеріалу в клінічну практику як зразок біоміметичного підходу до вирішення важливої медичної проблеми може стати новим напрямом розвитку кістково-замісної терапії в хірургії, зокрема в щелепно-лицьовій.

Література

- Карбид кремнія: технологія, свойства, применение / Под ред. А. Е. Беляева, Р. В. Конаковой. — Х.: ИСМА, 2010. — 532 с.
- Маланчук В. О., Колпач А. В. Оцінка якості кісткової тканини лицевого відділу черепа та класифікація її типів на основі біомеханічних параметрів // Укр. мед. часопис. — 2013. — № 1 (93). — С. 126—131.
- Сулима В. С., Панченко Л. М. Імунологічне обґрунтування можливості застосування матеріалів на основі біологічного гідроксиапатиту для заміщення кісткових дефектів // Гал. лік. вісн. — 2002. — Т. 9, № 1. — С. 87—89.
- Amon M., Bolz A., Schaldach M. Improvement of stenting therapy with a silicon carbide coated tantalum stent // J. Mater. Sci.: Mater. Med. — 1996. — N 5. — P. 273—278.
- Berthold A., Laugere F., Schellevis H. et al. Fabrication of a glass-implanted microcapillary electrophoresis device with integrated contactless conductivity detection // Electrophoresis. — 2002. — Vol. 23. — P. 3511—3519.
- Bolz A., Schaldach M. Artificial heart valves: improved blood compatibility by PECVD a-SiC: H coating // Artificial Organs. — 1990. — Vol. 14(4). — P. 260—269.
- Bolz A., Schaldach M. Biomaterials haemocompatibility optimization of implants by hybrid structuring // Med. Biol. Eng. Comput. — 1993. — Vol. 31. — P. 123—130.
- Bolz A., Schaldach M. Haemocompatibility optimization of implants by hybrid structuring // World Congress Supplement, Biomaterials. — Kyoto, 1993. — P. 123—130.
- Bolz A., Wise D. L., Trantolo D. J. et al. Applications of Thin-Film Technology in Biomedical Engineering // Encyclopedic Handbook of Biomaterials and Bioengineering. Part A: Materials. — 1995. — Vol. 2. — P. 1287—1320.
- Botsoa J., Lysenko V., Geloan A. et al. Application of 3C-SiC quantum dots for living cell imaging // Appl. Phys. Lett. — 2008. — Vol. 92. — P. 173902.
- Carlisle E. M. Silicon: a possible factor in bone calcification // Science. — 1970. — Vol. 167 (3916). — P. 279—280.
- Chakrabarti O. P., Maiti H. S., Majumdar R. Biomimetic synthesis of cellular SiC based ceramics from plant precursor // Bull. Mater. Sci. — 2004. — Vol. 27, N 5. — P. 467—470.
- Cogan S. F., Edell D. J., Guzzell A. A. et al. Plasma-enhanced chemical vapor deposited silicon carbide as an implantable dielectric coating // J. Biomed. Mater. Res. — 2003. — Vol. 67, N 3. — P. 856—867.
- Coletti C., Jaroszkeski M., Hoff A. M. et al. Culture of mammalian cells on single crystal SiC substrates // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2006. — P. 950.
- Coletti C., Jaroszkeski M. J., Pallaoro A. et al. Biocompatibility and wettability of crystalline SiC and Si surfaces // IEEE EMBS Proceedings. — 2007. — P. 5849—5852.
- Frewin C. L., Jaroszkeski M., Weeber E. et al. Atomic force microscopy analysis of central nervous system cell morphology on silicon carbide and diamond substrates // Mol. Recognit. — 2009. — Vol. 22, N 5. — P. 380 p.
- Gibson L. Biomechanics of cellular solids // J. Biomech. — 2005. — Vol. 38(3). — P. 377—399.
- Godignon P. New generation of SiC based biodevices implemented on 4II wafers // Mat. Sci. Forum. — 2005. — P. 483—485.
- Harder C., Rzany A., Schaldach M. Coating of vascular stents with antithrombogenic amorphous silicon carbide // Progress in Biomedical Research. — 1999. — P. 71—77.
- Kiselov V. S., Borisov Yu. S., Tryun M. et al. Mechanical properties of biomorphous ceramics, semiconductor physics // Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2012. — Vol. 15, N 4.
- Kiselov V. S., Lytvyn P. M., Yukhymchuk V. O. et al. Synthesis and properties of porous SiC ceramics // J. Appl. Physics. — 2010. — Vol. 107, N 9. — P. 093510—093516.
- Kotzara G., Freasa M., Abell Ph. et al. Evaluation of MEMS materials of construction for implantable medical devices // Biomaterials. — 2002. — Vol. 23. — P. 2737—2750.
- Li X., Wang X., Bondokov R. et al. (Micro/nanoscale mechanical and tribological characterization of SiC for orthopedic applications // J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater. — 2005. — Vol. 72 (2). — P. 353—361.
- Martinez-Fernandez J., Varela-Feria F. M., Singh M. Microstructure and thermomechanical characterization of biomorphic silicon carbide-based ceramics // Scr Mater. — 2000. — Vol. 43. — P. 813—818.
- Matinlinna J., Rekola J., Aho Aj. et al. The effect of heat treatment of wood on osteoconductivity // Acta Biomaterialia. — 2009. — Vol. 5, N 5. — P. 1596—1604.
- Naji A., Harmand M. F. Cyto compatibility of two coating materials, amorphous alumina and silicon carbide, using human differentiated cell cultures // Biomaterials. — 1991. — Vol. 12. — P. 690—694.
- Rzany A., Schaldach M. Smart material silicon carbide: reduced activation of cells and proteins on a-SiC: H-coated stainless steel // Progress in Biomedical Research. — 2001. — May. — P. 182—194.
- Sanchez C., Arribart H., Guille M. M. Biomimetic and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems // Nat. Mat. — 2005. — N 4 (4). — P. 277—288.
- Santavirta S., Takagi M., Nordstletten L. et al. Biocompatibility of silicon carbide in colony formation test *in vitro* A promising new ceramic THR implant coating material // Arch. Orthop. Trauma Surg. — 1998. — Vol. 118. — P. 89—91.
- Scheller B., Hennen B., Severin-Kneib S. et al. Long-term follow-up of a randomized study of primary stenting versus angioplasty in acute myocardial infarction // Am. J. Med. — 2001. — Vol. 110. — P. 1—6.
- Sieber H., Vogli E., Greil P. Biomorphic SiC-ceramic manufactured by gas-phase infiltration of pine wood // Ceram. Eng. Sci. Proc. — 2001. — Vol. 22, N 4. — P. 109—116.
- Singh Sh., Buchanan R. C. SiC-C fiber electrode for biological sensing // Mater. Sci. and Eng. C. — 2007. — Vol. 27. — P. 551—557.
- Takami Y., Yamane S., Makinouchi K. et al. Protein adsorption onto ceramic surfaces // J. Biomed. Mater. Res. — 1998. — Vol. 40 (1). — P. 24—30.
- Yakimova R., Petoral R. M., Yazdi G. R. et al. Surface functionalization and biomedical applications based on SiC // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2007. — Vol. 40. — P. 6435—6442.
- Yukhymchuk V. O., Kiselov V. S., Belyaev A. E. et al. Raman spectroscopy of bio-SiC ceramics // Phys. Status Solidi A. — 2011. — Vol. 208, N 4. — P. 808—813. doi 10.1002/pssa.201026618V.S.
- Zawrah M. F., El-Gazery M. Mechanical properties of SiC ceramics by ultrasonic nondestructive technique and its bioactivity // Materials Chem. Phys. — 2007. — Vol. 106. — P. 330—337.

В. А. Маланчук¹, В. С. Киселев², Е. И. Жуковцева¹, Ю. В. Чепурной¹, Т. А. Алексеева³

¹Национальный медицинский университет имени А. А. Богомольца, Киев

²Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкаре́ва НАН Украины, Киев

³Институт химии поверхности имени А. А. Чуйко НАН Украины, Киев

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БИОМОРФНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ В ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ХИРУРГИИ

Приведен обзор литературы относительно перспектив использования в медицине новой биоморфной керамики на основе карбида кремния, изготовленной в соответствии с принципами биомиметики. Описаны пути ее получения. Изучены преимущества использования и особенности взаимодействия данного материала с живыми клетками организма. Освещены возможности применения биоморфного карбида кремния отечественного производства в медицине, в частности в челюстно-лицевой хирургии и стоматологии.

Ключевые слова: биоморфная керамика, карбид кремния, имплантат, реконструктивная хирургия.

V. O. Malanchuk¹, V. S. Kiselov², O. I. Zhukovtseva¹, Y. V. Chepurnii¹, T. A. Aleksyeyeva²

¹O. O. Bogomolets National Medical University, Kyiv

²V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kyiv

³Chuiko Institute of Surface Chemistry NAS of Ukraine, Kyiv

BIOMORPHIC SILICON CARBIDE IN MAXILLO-FACIAL SURGERY: PERSPECTIVES

This paper reviews the recent literature on trends and prospects for application of biomorphic silicon carbide ceramics in medicine, created by the biomimetic principles. The obtaining ways has been described. Benefits of the material's use and interaction with the living body cells have been studied. The possibility inland biomorphic silicon carbide use in medicine, particularly in the Maxillofacial Surgery and Dentistry is highlighted.

Key words: biomorphic ceramics, silicon carbide, implant, reconstructive surgery.