

Є. Ф. Венгер¹, М. М. Локшин¹, В. П. Маслов¹, Ю. М. Родічев²,
Д. І. Блецкан³, Я. М. Пекар³

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ, Київ

²Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАНУ, Київ

³ЗАТ "Технокристал", Ужгород

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ З'ЄДНАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ З ЛЕЙКОСАПФІРУ У КОНСТРУКЦІЙНІ ВУЗЛИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ

Аноація: Однією з причин, які гальмують застосування лейкосапфіру, є відсутність комплексних технологічних рішень з'єднання деталей, що забезпечують надійність прецизійних вузлів приладів. Комплексними дослідженнями методів з'єднання доведено, що попереднє нанесення вакуумного покриття поліпшує адгезію клеїв. Запропоновано клейові та безклейові методи з'єднання прецизійних вузлів, які працюють у широкому діапазоні температур. Вперше запропоновано композитні структури типу ілюмінатора "скло-сапфір". Показано ефективність їх застосування для підвищення стійкості ілюмінаторів до впливу пилу і збільшення твердості та міцності всієї конструкції. Результати даних досліджень можуть бути поширені на прецизійні вузли оптико-електронних приладів з інших матеріалів, які працюють в екстремальних умовах.

Ключові слова: лейкосапфір, нанотехнології, методи з'єднання, клейові композиції, ілюмінатор.

1. ВСТУП

Кристали лейкосапфіру ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) характеризуються унікальними механічними і фізико-хімічними властивостями. Це:

- висока хімічна чистота (99,995 %);
- висока температура плавлення ($T_{\text{пл}} = 2323 \text{ K}$);
- висока твердість (9 за шкалою Мооса);
- висока теплопровідність ($\sim 30 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$);
- високий питомий опір ($> 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{см}$);
- висока радіаційна стійкість;
- хімічна стійкість до різних агресивних середовищ (лугів, кислот тощо);
- висока оптична якість та прозорість у широкому спектральному діапазоні ($\lambda = 0,17\text{--}5,5 \text{ нм}$);
- біосумісність з людським організмом.

Завдяки таким характеристикам лейкосапфір широко використовується в мікро- та оптоелектроніці, оптичному приладобудуванні, лазерній техніці, прецизійних механізмах, тонкій хімічній технології, медицині (кісткова ортопедія [1], стоматологічні імплантати [2] і пломби [3, 4]), годинниковій та ювелірній промисловостях в якості складових частин детекторів для реєстрації гамма- та рентгенівського випромінювання.

Низькі значення діелектричної проникності ($\epsilon = 9,5$) та діелектричних втрат ($\text{tg } \delta < 10^{-5}$) роблять перспективним використання лейкосапфіру як підкладок при нанесенні тонких плівок високотемпературних надпровідників для застосування останніх в елементах СВЧ-техніки (фільтри, резонатори тощо).

В Україні у промислових масштабах кристали лейкосапфіру вирощують методом горизонтальної напрямленої кристалізації в НТК "Інститут монокристалів" НАН України (м. Харків) та видозміненим методом Кіропулоса [5] на підприємстві ЗАТ "Технокристал" (м. Ужгород).

Одним з факторів, що стримує більш широке використання кристалів лейкосапфіру в приладобудуванні є недостатність комплексних технологічних рішень щодо проблем з'єднання деталей з лейкосапфіру, які б забезпечували надійність прецизійних деталей і вузлів приладів. Дійсно, досить часто виникає потреба у створенні нероз'ємних з'єднань між деталями з лейкосапфіру та деталями, виготовленими з металу чи кераміки. При цьому нероз'ємні з'єднання повинні задовольняти певні технічні вимоги, такі, як забезпечення високого вакууму, висока електрична і механічна міцність. Усі відомі способи нероз'ємних з'єднань деталей, виготовлених із кристалів лейкосапфіру, можна поділити на три групи: з'єднання за допомогою клеїв, паяння і зварювання. Зупинимось коротко на характеристиках цих груп.

Перша. У технології виробництва оптико-електронних приладів широко використовуються різноманітні клеї. Існує велика кількість марок клеїв, користування якими не потребує високої кваліфікації персоналу та спеціального обладнання, а процес з'єднання відбувається зазвичай при кімнатній температурі. Це дає можливість здійснювати точне позиціонування та юстирування деталей. Але висока хімічна інертність лейкосапфіру перешкоджає надійному клейовому з'єднанню деталей із нього. Тому, наприклад, ультрафіолетові (УФ) клеї не забезпечують високу міцність і надійність з'єднання в екстремальних умовах експлуатації.

До **другої** групи відносяться різноманітні способи паяння деталей з лейкосапфіру з використанням як попередньо металізованих

поверхонь, так і активних припоїв. Способи паяння є простими у реалізації і зазвичай не змінюють структурної досконалості з'єднаних деталей. Проте паяні шви характеризуються низькою механічною і електричною міцністю, високою хімічною активністю. Дифузія компонентів припою в монокристалічну матрицю, особливо при термоциклюванні виробів, знижує механічні та експлуатаційні характеристики таких вузлів. Значного прогресу в удосконаленні технології з'єднання деталей з лейкосапфіру з використанням методу паяння було досягнуто під керівництвом академіка *Ю. В. Найдича* в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України [6, 7], де протягом тривалого часу досліджувалися та розроблялися технологія вакуумного паяння та спеціальні припої. Ця технологія забезпечує високу міцність та надійність з'єднання, але потребує використання спеціального вакуумного високотемпературного обладнання, що ускладнює юстирування прецизійних деталей у виробничих умовах.

До **третьої** групи відносяться способи зварювання з розплавленням контактної зони та дифузійного (термокомпресійного) зварювання. Ці технології успішно розвиваються в НТК "Інститут монокристалів" НАН України (м. Харків) [8]. Способи зварювання з розплавленням контактної зони досить складні з технічної точки зору. Як показала практика, вони придатні тільки для одержання з'єднань з малою протяжністю шва, оскільки в області контакту при розплавленні локальної зони досить часто виникають значні напруження, що призводять до руйнування окремих елементів конструкції. З огляду на це більш перспективним є дифузійне зварювання деталей з лейкосапфіру у твердому стані, яке полягає в утворенні монолітного з'єднання на атомарному рівні як результат механічного наближення контактуючих поверхонь шляхом локальної плас-

тичної деформації при підвищеній температурі. При цьому має місце взаємна дифузія в поверхневих шарах з'єднаних матеріалів. Для здійснення дифузійного зварювання деталі після попередньої підготовки (шліфування, полірування тощо) поміщають у нагрівник зварювальної камери, яку вакуумують. Деталі нагрівають до температури $0,5 \div 0,9 T_{пл}$, притискають з певним зусиллям одну до одної, потім після ізотермічної витримки знімають механічне навантаження стиснення і повільно охолоджують.

В Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України розвивається напрямок нанотехнологій прецизійних конструкційних з'єднань з використанням попередньо нанесеного на деталі вакуумного покриття [9] та нанорозмірних порошків-наповнювачів до клейових композицій [10].

В даній роботі описана розробка комплексної технології з'єднань деталей з лейкосапфіру для експлуатації в широкому діапазоні температур — $77 \div 1\ 300$ К. Ця задача вирішувалася шляхом удосконалення безклеювих методів та розробки нових клейових композицій для з'єднань.

2. БЕЗКЛЕЙОВЕ З'ЄДНАННЯ МЕТОДОМ ПАЯНЯ

Враховуючи високу хімічну інертність лейкосапфіру до розплавів багатьох металів, що використовуються для паяння, нами використано таку технологічну схему:

- спочатку на з'єднувальну поверхню деталі методом термічного випаровування у вакуумі наноситься шар адгезійно активного металу, зокрема титану, товщиною ~ 50 нм або нікелю ~ 100 нм для забезпечення адгезії до припою;
- після цього деталі з'єднуються шляхом пайки з використанням стандартних промислових припоїв, паяльних паст для поверхневого монтажу друкованих плат та високочистого індію.

Експериментальне дослідження безклеювого з'єднання сталеві труби до пластини лейкосапфіру товщиною 0,35 мм показало, що склад припою не впливає на цілісність з'єднання пластини зі сталевією трубкою за умови, якщо діаметр трубки не перевищує 20 мм. При збільшенні діаметра трубки у 2 рази тільки індій забезпечував працездатність та цілісність з'єднання. У даному випадку завдяки пластичності індію відбувається релаксація термічних напружень в контакті лейкосапфіру зі сталлю. На жаль, для індію характерна низька міцність (приблизно 2 МПа). Проте пластичність індію зберігається до криогенних температур (77 К) і тому цей тип з'єднання можна рекомендувати для використання у вузлах криостатів та приладах ІЧ-техніки з сенсорами, які охолоджуються.

Таким чином, методом паяння попереднього металізованих деталей із кристалів лейкосапфіру з конструкційними деталями із сталі можна виготовляти різні за складністю металокерамічні вузли. Конструктивно спай виконується у вигляді торцевого, конусного, охоплюючого, компенсаційного з'єднання лейкосапфіру з конструкційними металами.

3. КЛЕЙОВІ КОМПОЗИЦІЇ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У ШИРОКОМУ ТЕМПЕРАТУРНОМУ ІНТЕРВАЛІ

3.1. Неорганічні клеї для підвищених та високих температур

Такі клеї виготовлені за золь-гель-технологією на основі рідкого натрієвого скла, до якого для зменшення пористості і підвищення стійкості до вологи додавали як наповнювачі алюмінієву пудру, кремній та окис хрому. Найкращих результатів було досягнуто у випадку використання всіх трьох компонентів у рівних вагових співвідношеннях (1:1:1). Виготовлену пастоподібну суміш рідкого скла з наповнювачами тонким шаром наносили на деталі з лейкосапфіру, після чого ці

деталі притискали одну до одної, висушували та відпалювали у муфельній печі на повітрі при температурі 673 К. З'ясувалося, що залишки пастоподібної суміші навіть при кімнатній температурі починали взаємодіяти з рідким склом через кілька годин після виготовлення. Алюміній та кремній взаємодіяли з розчином силікату натрію та утворювали комплексні силікати. Ці процеси прискорювалися з підвищенням температури до 673 К.

Дослідження міцності показали, що з'єднання деталей з лейкосапфіру, зроблені за золь-гель-технологією, мають більш високі значення міцності (8–10 МПа), ніж з'єднання таких самих деталей з використанням паєння.

З урахуванням, що комплексні силікати є стійкими аж до температури плавлення (1 873 К) [11, 12], запропонована технологія може бути використана для з'єднань, які працюють при температурах до 1 273 К і вище.

3.2. Органічні клейові композиції

3.2.1. Клеї, полімеризація яких відбувається під дією ультрафіолетового випромінювання. З огляду на те, що оптичні клеї полімеризуються протягом 48 год, виникає необхідність здійснення постійного довготривалого контролю і юстирування оптичного вузла. Тому для серійного виробництва необхідно резервувати великі виробничі площі та збільшувати кількість устаткування для забезпечення необхідної пропускну здатності цієї технологічної операції. Клеї, полімеризація яких відбувається під дією ультрафіолетового випромінювання, заслуговують на особливу увагу в зв'язку з їх високою прозорістю й технологічністю: полімеризація відбувається протягом кількох хвилин. Оскільки кристали лейкосапфіру є прозорими в УФ-області спектра, то застосування ультрафіолетових клеїв дає можливість істотно спростити й прискорити операцію склеювання деталей з лейкосапфіру.

Нами використовувалися фотополімерні клеї типу КС, що полімеризуються під дією ультрафіолетового світла [13], розроблені в Інституті хімії високомолекулярних сполук НАН України *В. Ф. Матюшовим*. Як показали наші дослідження, для успішного використання клеїв типу КС спочатку на чисті поверхні деталей із лейкосапфіру, які підлягають склеюванню, необхідно нанести тонкий шар покриття із двоокису кремнію (або двоокису індію) методом термічного наплення у вакуумі. Завдяки цьому покращується адгезія і, як наслідок, міцність з'єднання збільшується більше, ніж у два рази.

Встановлено, що при склеюванні лейкосапфіру з оптичним склом у процесі УФ-полімеризації клею виникають напруги, які зосереджуються у скляній деталі. Визначення напружень здійснювали через величину подвійного променезаломлювання [14], оскільки модуль пружності оптичних стекол у кілька разів менший, ніж модуль пружності лейкосапфіру.

Отримані позитивні результати склеювання були використані при створенні нового технічного рішення — ілюмінатора "Сапфір" [15]. Для підвищення стійкості ілюмінатора до абразивного впливу зовнішнього середовища на зовнішню поверхню оптичного скла за допомогою розробленої технології наклеюється тонка сапфірова полірована пластинка.

3.2.2. Модифіковані кремнійорганічні епоксидні композиції. Більшість епоксидних клеїв здатні працювати при температурах, що не перевищують 423 К. Термостійкі (до 573 К і вище) епоксидні клеї одержують, використовуючи нові термостійкі смоли та отверджувачі. Модифікаторами епоксидних смол є кремнійорганічні смоли. Кремнійорганічні клеї мають такі переваги:

- висока стійкість до дії сонячного випромінювання та до старіння в атмосферних умовах, в озоні, в електричному коронному розряді;

- стійкість до дії води й вологості;
- стійкість до радіації й одночасного впливу температури й радіації;
- високі діелектричні властивості.

Істотно покращують властивості кремнійорганічних клеїв порошкові наповнювачі. Найбільш відомі термостійкі кремнійорганічні клеї К-300 (короткочасно можуть працювати при 573 К) і К-400 (короткочасно можуть працювати при 673 К), які містять наповнювач у вигляді мікропорошків окису титану та нітриду бору [16].

Як додатковий наповнювач ми використовували нанорозмірні порошки окису цирконію. При цьому робочою гіпотезою для обґрунтування пошуку оптимальних композицій правила модель щільного пакування кульок, де кульки — частинки мікропорошку, а порожнини між ними заповнені наночастинками. За умови, якщо клейовий прошарок між частинками наповнювача нанорозмірний, в ньому створюються додаткові міжатомні зв'язки [17], які і забезпечують механічну та термічну стійкість з'єднання.

Нанопорошки окису цирконію з розміром часток 10÷15 нм зменшують величину усадки при полімеризації й додатково підвищують міцність. Оптимальні склади розроблених композицій забезпечили працездатність вузлів *лейкосапфір—мідь* при температурі рідко-

го азоту (73 К), а з'єднань *лейкосапфір—лейкосапфір* — при температурах до 673 К (короткочасно). Після тривалого прогрівання до температури 523 К міцність з'єднання складала ~ 35 МПа. Розроблені клейові композиції придатні для використання у вузлах кріогенних приладів та приладів для реєстрації інфрачервоного світла з охолоджуваними фотоприймачами, у лазерній техніці тощо.

4. ДВОШАРОВИЙ ЛЮМІНАТОР НА ОСНОВІ ОПТИЧНОГО СКЛА І ЛЕЙКОСАПФІРУ

Двошаровий ілюмінатор — це композитна шарувата структура з неметалічних матеріалів. Деякі механічні властивості неметалічних матеріалів, які використовуються у приладобудуванні, наведені у таблиці. Скло і склокераміка — лінійно-пружні матеріали; алюмокераміці властиве в'язке деформування у мікрооб'ємах, але всі вони є крихкими. Монокристали лейкосапфіру принципово відрізняються від цих крихких матеріалів явно вираженою анізотропією твердості, пружними характеристиками і показниками міцності. Необхідно відзначити, що конструкційні властивості лейкосапфіру вивчені ще недостатньо, рекомендацій щодо гранично допустимих напружень немає. Відомі лише

Таблиця. Механічні властивості деяких неорганічних матеріалів для композитних структур

Матеріал	Модуль $E \times 10^5$, МПа ($G \times 10^5$, МПа)	Межа міцності на вигин σ_b , МПа	Коефіцієнт Пуассона	Характер деформування і руйнування
Скло	0,6...0,8 (0,26...0,32)	40...250 [5...35...35]*	0,2...0,25	лінійно-пружне, крихке
Склокераміка	0,65...1,4	60...250 [5... 40]*	0,2...0,25	лінійно-пружне, крихке
Алюмокераміка	2,5...3	250...400 [30...100]*	0,19...0,22	нелінійно-пружне, крихке
Лейкосапфір	3...3,8	230...3500	—	характер деформування не вивчений, квазікрихке

*Примітка. У квадратних дужках наведені дані про орієнтовні напруження, що допускаються для розрахунку конструкцій.

Результати вивчення міцності на вигин використані нами при створенні нових шаруватих композитних структур *скло–лейкосапфір*, призначених для оглядових вікон та ілюмінаторів, що працюють при бічному тиску в умовах інтенсивного абразивного впливу.

Запропоновані структури — це двошарові пакети, зібрані з листового скла і тонкої пластини лейкосапфіру, з'єднані між собою клеєм. Композит має несиметричну структуру. Основний силовий шар виконаний зі скла товщиною 4 мм, а міцний зносостійкий шар товщиною 350÷450 мкм — із лейкосапфіру. Пластини лейкосапфіру вирізали по нормалі до осі c з об'ємного монокристала. Відхилення товщини в межах пластини не перевищували $\pm 5\%$. Стан поверхні пластин визначався послідовно виконаними операціями різання заготовки алмазним інструментом, попереднього точного шліфування, чистового шліфування і полірування [19]. Якість поверхні контролювали за допомогою оптичного мікроскопа ZEISS Axiovert 200 MAT.

Конструкція композитних ілюмінаторів *скло–лейкосапфір* [15] вибиралася на основі таких міркувань:

- для підвищення конструкційної міцності елемента в порівнянні зі звичайними ламінованими склополімерними структурами типу триплекса і багатошаровими композитами шар лейкосапфіру варто розташувати в зоні розтягування композитної деталі при вигині, оскільки це повинно бути і при експлуатації (наприклад, у конструкції ілюмінатора вакуумної камери);
- економічна доцільність вимагає застосування якнайтоншого конструкційного шару лейкосапфіру.

Композитні ілюмінатори мали зовнішній діаметр 70 мм. Їх випробування здійснювали за схемою симетричного вигину. Діаметр пуансона, що навантажує, був 13,7 мм, нижньої кільцевої опори — 35 мм. При розрахунку на-

пружень враховували твердість на вигин кожного із шарів. Модуль пружності лейкосапфіру був прийнятий рівним 300 ГПа, листового скла — 80 ГПа [18]. Завдяки використанню твердого клею і малої товщини клейового шва (не більш 100÷150 мкм), обидві пластини під час навантаження працюють спільно як монолітна структура.

Для оцінки ролі лейкосапфіру при навантаженні композиту спочатку проводилося випробування пластини листового скла товщиною 4 мм. Руйнування окремих пластин скла відбувалося при навантаженні $P = 275\text{—}338$ кг, що відповідає рівню напружень 91÷113 МПа. Цей рівень міцності характерний для даного типу скла (листова ВВ) в елементах з якісною поверхнею. Джерело руйнування знаходилося в центрі пластин у межах робочої ділянки під пуансоном з максимальним рівнем напружень, що розтягують.

Композитний ілюмінатор в зоні напружень, що розтягують, показав майже в два рази більш високу конструкційну міцність і стійкість до динамічного абразивного впливу пилу. Граничне навантаження P зросло до 605 кг. Максимальні розрахункові напруження в шарі лейкосапфіру знаходяться на його зовнішній поверхні. Вони виявилися у 1,4 рази більшими у порівнянні з пластиною зі скла без покриття. Водночас, завдяки високому модулю пружності лейкосапфіру, напруження на поверхні скла в адгезійному шарі виявилися у 4,5 рази меншими, ніж на сполученій з нею внутрішній поверхні шару лейкосапфіру.

Характер руйнування анізотропного шару лейкосапфіру в шаруватому композиті при кільцевому вигині при великих напруженнях показано на рис. 2. Руйнування шару лейкосапфіру при високому рівні напружень (300÷400 МПа) відбувається по площинах спайності. Шар скла теж зруйнований.

Характер руйнування шару лейкосапфіру при низькому рівні напружень ілюструє рис. 3. Мають місце поодинокі тріщини у ша-

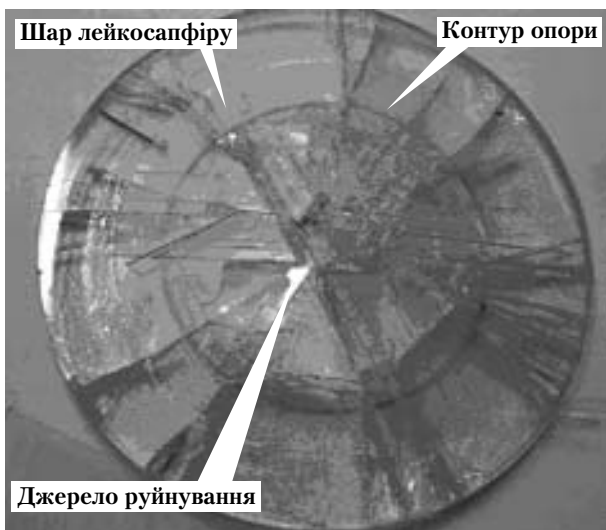


Рис. 2. Характер руйнування анізотропного шару лейкосапфіру в шаруватому композиті при кільцевому вигині при великих напруженнях

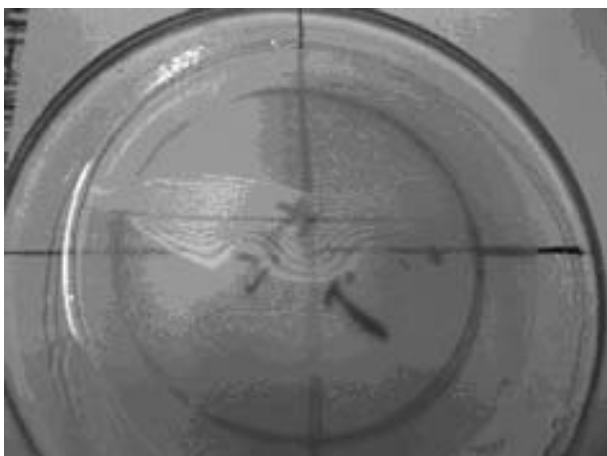


Рис. 3. Характер руйнування шару лейкосапфіру при низькому рівні напружень

рі лейкосапфіру, що є характерним для низького рівня напружень 185÷200 МПа, а силовий шар скла при цьому не руйнується.

Незважаючи на руйнування шару лейкосапфіру і його часткове відшарування (про що свідчить поява інтерференційних смуг в межах ділянки відшарування), загальна ці-

лісність композиту зберігається завдяки адгезійному зв'язку зі скляним шаром.

В цілому результати досліджень вказують на ефективність запропонованих шаруватих ілюмінаторів "скло—лейкосапфір" та їхні явні переваги не тільки щодо зносостійкості твердої поверхні шару лейкосапфіру, але й щодо їх конструкційної міцності. Вартість ілюмінатора "Сапфір" вища за вартість скляного ілюмінатора у два-три рази, але в десятки та сотні разів (залежно від габаритів) нижча від вартості ілюмінаторів з монокристалічного лейкосапфіру.

5. ВИСНОВКИ

1. Комплексними дослідженнями методів з'єднання деталей з лейкосапфіру доведено, що попереднє нанесення вакуумного покриття поліпшує адгезію клеїв. Запропоновано клейові та безклейові методи з'єднання прецизійних вузлів оптико-електронних приладів, які працюють в широкому діапазоні температур.
2. Вперше запропоновано композитні структури типу *скло—сапфір* (ілюмінатор "Сапфір"). Показана ефективність їх застосування для підвищення стійкості ілюмінаторів до впливу пилу і збільшення твердості та міцності усєї конструкції в 2 рази порівняно зі скляними ілюмінаторами.
3. Результати даних досліджень можуть бути використанні при конструюванні та виготовленні прецизійних вузлів оптико-електронних приладів з інших матеріалів, які працюють в екстремальних умовах.

Робота виконана за фінансової підтримки (інноваційний проект № 15) Президії Академії наук України та в співпраці з підрозділом ДП "Завод "Арсенал" — "Гарантійний нагляд та випробувальний центр "Арсенал" (директор підрозділу — Толстих Ю. Г.).

ЛІТЕРАТУРА

1. Ендопротез з сапфіровою головкою для лікування захворювань і пошкоджень кульшового суглоба. / Інноваційна розробка Інституту патології хребта та суглобів ім. М. І. Ситенка АМН України та Інституту монокристалів НАН України. // Наука та інновації. — 2006. — № 4. — С. 33.
2. **Fartash B., Tangerund T., Silness J., Arvidson K.** Rehabilitation of mandibular edentulism by single crystal sapphire implants and overdentures: 3 — 12 years results in 86 patient. // *Clinical Oral Implants Research*. — 1996. — № 7. — P. 220—229.
3. Патент України на винахід № 34362. Оpub. 15.12.2003. Бюл. № 12. Інгрeдiєнт стоматологічних матеріалів і спосiб його одержання. / Блецкан Д. І., Трапезнікова Л.В.
4. Патент України на винахід № 46529. Оpub. 15.06.2005. Бюл. № 6. Пломбувальний матеріал. / Блецкан Д.І., Трапезнікова Л.В., Блецкан В.Т.
5. **Блецкан Д. І., Блецкан О. Д., Лук'ячук О. Р., Машков А. І., Пекар Я. М., Цифра В. І.** Промислове вирощування монокристалів сапфіру видозміненим методом Кіропулоса. // *Вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. — 2000. — № 6. — С. 221—240.
6. **Найдич Ю. В., Габ И. И., Куркова Д. И., Стецюк Т. В.** Сварка давлением неметаллических материалов между собой и с металлами для применения в экстремальных условиях. / *Труды международной конференции ММС-2005 "Современное материаловедение: достижения и проблемы"*, сентябрь, 2005, Киев, Украина. — С. 617.
7. **Журавлев В. С., Коваль А. Ю., Найдич Ю. В., Карнец М. В.** Влияние добавок Ti, Zr, Hf в меди на взаимодействие и смачиваемость оксида Al. / *Труды Международной конференции ММС-2005 "Современное материаловедение: достижения и проблемы"*, сентябрь, 2005, Киев, Украина. — С. 621.
8. **Добровинская Е. Р., Литвинов Л. А., Пищик В. В.** Монокристаллы корунда. — К.: Наук. думка, 1994. — 256 с.
9. **Маслов В. П.** Наносоединение — новый тип бесклевового соединения прецизионных деталей для работы в экстремальных условиях. / *Труды 4 Международной конференции МЕЕ-2006 "Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий"*, сентябрь, 2006, Ялта, АР Крым, Украина. — С. 137.
10. **Венгер Є. Ф., Локшин М. М., Маслов В. П.** Клейова композиція "Сапфір"/ Патент України № 20427 на корисну модель, опубл. 15.01.2007, бюл. № 1, 2007.
11. Проблемы химии силикатов. — Л.: Наука, 1974. — 319 с.
12. Справочник технолога-оптика. / Под ред. С. М. Кузнецова и М. А. Окатова. — Л.: Машиностроение, 1983. — С. 414.
13. **Маслюк А. Ф., Храновский В. А.** Фотохимия полимеризационноспособных олигомеров. — К.: Наук. думка, 1989 — 192 с.
14. Патент України на корисну модель № 7496, бюл. № 6, 15.06.05. Пристрій вимірювання величини подвійного променезаломлювання. / Бережінський Л. Й., Венгер Е. Ф., Маслов В. П., Сердега Б. К.
15. **Венгер Є. Ф., Локшин М. М., Маслов В. П., Родічев Ю. М.** Заявка на патент України № 200611964 від 13.11.2006. Люмінатор "Сапфір". Рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель від 13 лютого 2007 року № 3721/1.
16. **Калинина И. Д., Мельникова Т. А., Земскова И. А.** Клеевые композиции, их свойства и применение. / *Обзоры по электронной технике. Серия Материалы*, вып.10 (1155), ЦНИИ "Электроника", Москва, 1985, с. 62.
17. **Жужнева А. П., Маслов В. П., Олейник В. Г.** Исследование взаимодействия клея К-400 с ситалом и кварцем методом инфракрасной спектроскопии МНПВО. // *Оптико-механическая промышленность*. — 1981. — № 4. — С.15—16.
18. **Иванов А. В.** Прочность оптических материалов. — Л.: Машиностроение, 1989. — 144 с.
19. **Блецкан Д. І., Блецкан О. Д., Лук'ячук О. Р., Машков А. І., Пекар Я. М.** Механічна обробка кристалів сапфіра та виготовлення підкладок із них для потреб оптоелектроніки. // *Вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. — 2000. — № 7. — С. 161—172.

Е. Ф. Венгер, М. М. Локшин, В. П. Маслов, Ю. М. Родичев, Д. И. Блецкан, Я. М. Пекар. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОЕДИНЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛЕЙКОСАПФИРА В КОНСТРУКЦИОННЫЕ УЗЛЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ.

Аннотация: Одной из причин, которые тормозят применение лейкосапфира, является отсутствие комплексных технологических решений по соединению деталей, обеспечивающих надежность прецизионных узлов приборов. Комплексными исследованиями методов соединения доведено, что предварительное нанесение вакуумного покрытия улучшает адгезию клеев. Предложены клеевые и бесклеевые методы соединения прецизионных узлов, которые работают в широком диапазоне температур. Впервые предложены композитные структуры типа иллюминатора "стекло-сапфир". Показана эффективность их применения для повышения стойкости иллюминаторов к влиянию пыли и увеличение твердости и прочности. Результаты данных исследований могут быть распространены на прецизионные узлы оптоэлектронных приборов из других материалов, которые работают в экстремальных условиях.

Ключевые слова: лейкосапфир, методы соединения, нанотехнологии, клеевые композиции, иллюминатор.

E. F. Venger, M. M. Lokshin, V. P. Maslov, Yu. M. Rodichev, D. I. Bletskan, Ya. M. Pekar. THE COMPLEX TECHNOLOGY OF JOINING SAPPHIRE PRECISION DETAILS TO CONSTRUCTIONAL UNITS OF OPTICAL-ELECTRONIC DEVICES.

Abstract: Lack of all-inclusive technological decisions of joining of details, which provide reliability of devices' precision-built units, is one of the problems which put a brake on sapphire application. It is proved by comprehensive researches of the methods of joining that a preliminary vacuum coating improves an adhesion of glues. We offer methods with using of glues and without it for joining of precision devices' components, which work in a wide range of temperatures. For the first time we offer composite structures like illuminator "glass-sapphire" type. The efficiency of their using for the increasing of illuminators' resistance to dust influence and for the increasing of their hardness and durability is shown. Results of given researches can be propagated on the joining of precision units in the optoelectronic devices from other materials, which work in extreme conditions.

Keywords: sapphire, methods of joining, nanotechnology, compositions, illuminator.

Надійшла до редакції 26.02.07.
