

УДК 681.4.002.2 (075.8)

В. П. Маслов

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ

Перспективні матеріали і технології виготовлення полегшених дзеркал телескопів

Надійшла до редакції 15.12.06

Аналіз літературних даних і сукупність результатів, отриманих експериментальним шляхом, дозволяють виділити як найбільш перспективні матеріали для полегшених дзеркал телескопів SiC-кераміку і склокераміку. Розроблена технологія твердофазного спікання полірованих деталей за допомогою нанорозмірних вакуумних покриттів (ТСПД-технологія) дозволяє реалізувати «сандвіч»-конструкції полегшених дзеркал як зі склокераміки, так і комбіновані конструкції SiC-кераміка (основа) — склокераміка (верхній робочий шар).

Телескопи є найважливішим інструментом вивчення Всесвіту. За допомогою телескопів одержується значна частина інформації про властивості космічних об'єктів, розширюється уявлення про масштаби Всесвіту та його еволюцію.

Можливості «побачити далі» визначаються багато в чому розмірами, точністю виготовлення і стабільністю форми головного дзеркала телескопа. Вибір найкращих матеріалів для астрономічних дзеркал був і є питанням, що постійно стоїть перед розробниками телескопів [2, 6].

Ще в 17 столітті Мерсен (у 1636 р.), а потім англійський математик Джеймс Грегорі (у 1663 р.) розробили принципову схему телескопа з дзеркал з оптичною поверхнею параболічної й еліпсоїдальної форми, а Ньютон знайшов потрібний сплав для дзеркал (бронза) і придумав спосіб полірування цього сплаву. Найбільш відома система Кассегрена, що складається з двох дзеркал, була запропонована у 1672 р. Перевагою дзеркальних систем є не тільки істотне зменшення габаритів, але і можливість одночасно працювати в різних діапазонах спектру.

Відомо сім основних оптичних систем побудови дзеркальних телескопів, однак етапи їхнього розвитку великою мірою визначаються наявністю матеріалів і технології виготовлення дзеркал необхідної жорсткості, стабільності геометрії і якості оптичної поверхні. Сплави на основі міді використовувались для виготовлення оптичних дзеркал телескопів понад двісті років. Лібих та Штейнгель у 1856 р., а потім Фуко у 1857 р. запропонували виготовляти телескоп зі скляним дзеркалом, яке було легшим і дешевшим, ніж бронзове. Відбивання забезпечувалося нанесенням спеціального покриття [7].

У 1948 році в США (Маунт-Паломар) було завершено будівництво телескопа з 5-м скляним дзеркалом. У 1976 р. в СРСР на Кавказі (станція Зеленчуцька) був введений у дію великий азимутальний телескоп з монолітним головним дзеркалом зі скла діаметром 6 м.

Для полегшення астрономічних дзеркал американський астроном Річі і радянські вчені І. В. Гребенщиков і Н. Г. Пономарьов висловили незалежно один від одного у 1930-х рр. ідею

чарункових дзеркал. У 1994 р. почав працювати такий телескоп, установлений на горі Мауна Кеа (Гаваї, США). Головне дзеркало діаметром 10 м виконано з 36 гексагональних сегментів зі склокераміки церодур («Шотт АГ», Німеччина) з практично нульовим коефіцієнтом температурного розширення (КТР). Кожен сегмент має форму шестигранника, вписаного в коло діаметром 1.8 м. Вторинне дзеркало цього телескопа виготовлене з берилію.

Наземним телескопом «побачити далі» заважає атмосферний шар, у якому відбувається поглинання ультрафіолетових променів, і якому властиві турбулентність, запиленість та інші небажані явища. Тому ще в книзі Германа Оберта «Ракети в космічному просторі», опублікованій в 1923 р., було запропоновано установити телескоп на штучний геостационарний супутник. Однак тільки в 1968 р. НАСА успішно запустило такий супутник. У 1977 р. Конгрес США виділив 475 млн доларів на космічну обсерваторію з телескопом, діаметр головного дзеркала якого складав 2.4 м — максимальний розмір вантажного відсіку шаттла. Оптична схема цього телескопа являла собою схему Кассегрена, модифіковану Річі й Анрі Кретьеном (головне і вторинне дзеркала мають поверхні гіперболоїда обертання). Заготовки для дзеркал були виготовлені зі склокераміки ULE (Corning, USA) з практично нульовим коефіцієнтом температурного розширення за технологією спікання «сандвіч»-конструкції, де внутрішній шар мав стільникову структуру. Це забезпечило полегшення більш ніж на 90 % від ваги монолітної заготовки таких же розмірів. Цьому телескопу було присвоєно ім'я Едвіна Хаббла. 24 квітня 1990 р. відбувся старт корабля «Дискавері», що вивів на орбіту телескоп Хаббла, а 20 травня на Землю були передані перші знімки космічних об'єктів, що відстоять від Сонця на 1300 світлових років. Орбітальний телескоп Хаббла відправив понад 700 тисяч зображень різних космічних об'єктів. За допомогою цієї інформації була встановлена наявність надмасивних чорних дір в галактичних ядрах і доведено, що Всесвіт розширюється, прискорюючись.

У 2003 р. був здійснений запуск японського супутника з інфрачервоним телескопом, діаметр головного дзеркала якого складав 70 см і був виконаний з карбідокремнієвої кераміки.

НАСА планує у 2011—2013 виведення на орбіту спадкоємця телескопа Хаббла — космічний телескоп «Джеймс Вебб» з головним дзеркалом діаметром 6.5 м, яке складається з 18 шестикутних берилієвих дзеркал. Діаметр такого дзеркала в 2.5 рази перевершує дзеркало телескопа Хаббла, а вага цього телескопа на 2/3 менша за вагу свого попередника.

Паралельно фахівцями розглядається можливість створення ультралегких оптичних дзеркал телескопів космічного базування нового покоління у вигляді тонких гнучких плівок, але вони ще не зайшли практичного застосування [15].

Наприкінці 1950-х рр. у СРСР вперше була розроблена склокераміка з практично нульовим коефіцієнтом термічного розширення (КТР) — астроситал СО 115М [8, 10]. Технологія астроситалу СО 115М дозволяє виготовляти дзеркала діаметром до 2.6 м. Такі дзеркала використовуються як в наземних (1.2 м сонячні телескопи), так і в космічних телескопах (станція «Астрон» та інші).

В Німеччині фірма «Шотт АГ» розробила технологію виготовлення заготовок діаметром до 8 м з матеріалу церодур, близького за складом та властивостями до астроситалу СО 115М.

В США фірма «Оуенс-Іллінойс Інкорпорейтед» (Толедо, Огайо) розробила аналогічну кераміку цервіт з практично нульовим КТР, однак ширше застосування отримав матеріал фірми «Корнінг», який має торгову назву ULE і відрізняється тим, що його основою є кварц.

За фізичними властивостями всі названі матеріали можна віднести до однієї групи.

Берилій в якості матеріалу для дзеркал космічних телескопів вперше був запропонований у 1958 р. Н. Н. Міхельсоном. Берилій був використаний в космічному телескопі GEP (Goddard Experiment Package), і сьогодні цей матеріал запропоновано для виготовлення дзеркала діаметром 6.5 м космічного телескопа Вебба.

Таким чином, перспективними матеріалами для виготовлення великогабаритних дзеркал телескопів наземного і космічного базування є: склокераміка церодур з практично нульовим коефіцієнтом температурного розширення (його аналог СО 115М, цервіт) або ULE, берилій і карбідокремнієва кераміка (SiC). На рис. 1 приведені порівняльні дані для цих матеріалів з урахуванням комплексних показників їхньої

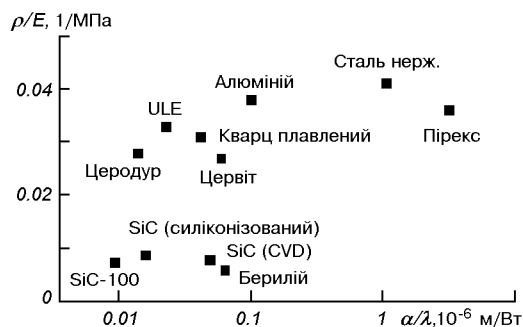


Рис. 1. Порівняльні властивості перспективних матеріалів (за даними www.astro.lu.se/~torben/euro50/publications/SiC_Panels.htm): залежність відношення питомої ваги ρ до модуля Юнга E від відношення коефіцієнта температурного розширення α до теплопровідності λ .

термічної стабільності, найменші значення яких відповідають вищій якості.

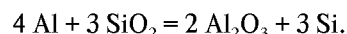
Видно, що за комплексними показниками термічної стабільності склокераміка і карбідокремнієва кераміка кращі, ніж берилій. Однак за питомою жорсткістю берилій трохи кращий за SiC, і ці два матеріали істотно перевершують склокераміку.

Розглянемо технологічні і виробничі фактори для оцінки перспективності застосування цих матеріалів. Насамперед необхідно відзначити, що виробництво берилію високої чистоти і виготовлення деталей з нього вимагає особливих умов безпеки персоналу, зв'язаних з його високою токсичністю. Відомо, що берилієвий пил, що утворюється при металургійних процесах, а також при механічній обробці (фрезерування, шліфування, полірування) викликає смертельно небезпечне захворювання — бериліоз. Витрати на забезпечення охорони персоналу і навколишнього середовища порівнянні з витратами при роботі з радіоактивними ізотопами. Крім того, великі витрати обумовлені необхідністю багаторазового очищення берилію для забезпечення високої механічної міцності, а також одержанням заготовок дзеркал у високовакуумних спеціалізованих електронно-променевих плавильних печах. Прагнення збільшити розмір заготовок берилієвих дзеркал вимагає збільшення розміру виробничого обладнання, що є складною науково-технічною проблемою. Усі ці негативні

фактори, зв'язані з виробництвом берилієвих дзеркал, викликають необхідність пошуку інших технічних рішень. З цього погляду особливу увагу привертають церодур і карбід кремнію.

Відповідно до інформаційних матеріалів фірми «Шотт АГ», церодур сьогодні — це єдиний матеріал для дзеркал телескопів, з якого можна отримувати заготовки розміром до 8.2 м по відносно простій технології скловаріння у виробничих умовах. Фірма «Шотт АГ» може виготовляти дзеркала з церодуру зі ступенем полегшення приблизно 60 % шляхом механічної обробки (свердління, фрезерування глухих отворів) тильної сторони монолітної заготовки дзеркала. Експериментальні дослідження з розробки технології низькотемпературного з'єднання (менше 100° С), проведені фірмою «Шотт СГТ» (США), дозволяють одержувати демонстраційні дзеркала «сандвіч»-конструкції діаметром 20 см [14]. Труднощі цієї технології обумовлені попереднім високоточним поліруванням поверхонь, що з'єднуються, як і у випадку з'єднання поверхонь за технологією оптичного контакту (ОК) і глибокого оптичного контакту (ГОК), відомих в оптичному виробництві [9]. Таким чином, великі переваги використання церодуру стримуються відсутністю виробничої технології виготовлення дзеркал «сандвіч»-конструкції.

Дослідження [11] показали, що алюмінієвий компонент вакуумного покриття на склокераміці церодуру при температурі 400° С взаємодіє з поверхнею склокераміки:



Це дозволило припустити, що такі покриття можуть забезпечити з'єднання деталей з церодуру при температурах, не вищих за 600° С, при яких зберігаються фізичні властивості склокераміки. Експериментальні дослідження підтвердили таку можливість [3, 13].

З метою дослідження стабільності взаємного положення прецизійних вузлів, з'єднаних за розробленою технологією твердофазного спікання полірованих деталей за допомогою нанорозмірних вакуумних покриттів (ТСПД-технологія), були виготовлені дзеркальні призми 90°. Прецизійні вимірювання кута 90° проводили в Науково-виробничому інституті метрологічного забезпечення вимірювань геометричних, механічних і віброакустичних величин (НВІ ГМВ)

Укрметртестстандарту. З вересня 2004 р. до жовтня 2005 р. було проведено п'ять етапів вимірювань: на першому етапі деталі піддавали п'ятикратному термічному удару рідким азотом і нагріванню до плюс 400° С (витримка 1 год); на другому етапі зразки піддавали подвійному механічному удару 100g і 300g; на наступних етапах досліджувалася стабільність кутового положення деталей в нормальних умовах.

Результати досліджень показали, що:

- геометрична точність виготовлення вихідних деталей зберігається при їхньому з'єднанні і дозволяє задавати точність збірного вузла технологічними методами виготовлення поверхонь деталей;
- для дзеркальних призм 90° технологічна похибка виготовлення складала для різних зразків від 0 до 8.5";
- вплив екстремальних умов приводить до зміни взаємного положення для різних призм від 0.2 до 8.3";
- при збереженні призм у нормальних умовах відхилення взаємного положення не перевищувало 6" (рис. 2), а для кращого зразка № 1 — 1", тобто на рівні похибки вимірювань.

Експеримент показав високу стійкість і стабільність геометричних і механічних властивостей прецизійних наноз'єднань у збірних деталях і вузлах черодуру за розробленою технологією на основі адгезійно-активних вакуумних покриттів, що містять алюміній. Ці з'єднання здатні зберігати високу несучість і при екстре-

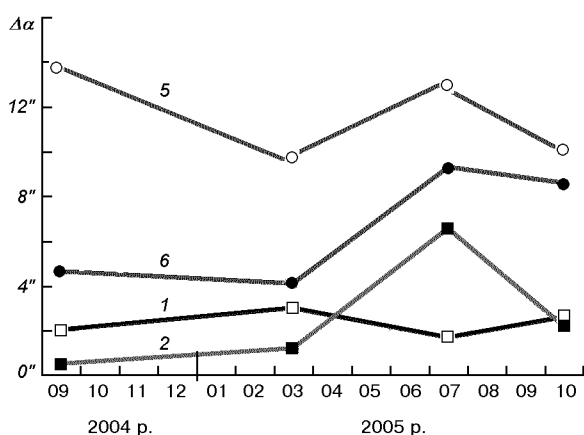


Рис. 2. Відхилення кута 90° для чотирьох зразків дзеркальних призм

мальних впливах, що можуть мати місце у процесі експлуатації виробів.

Висока надійність і стабільність розробленого з'єднання була пояснена з погляду дислокаційної теорії міцності [4, 13]. Для тонкого шару металу руйнівне напруження можна описати залежністю

$$\sigma_f = \sigma_0 + K \cdot d^{-1/2},$$

де σ_0 — значення руйнівного напруження для монокристалу, K — константа, d — довжина площини ковзання дислокацій.

Дана формула була багаторазово експериментально і теоретично досліджена для металевих масивних деталей. При цьому за параметр d був прийнятий розмір зерна структури металу. Подрібнення зерен у результаті механічної термообробки дозволяє істотно збільшити величину руйнівного напруження. У випадку розробленої технології наноз'єднання такий підхід дозволяє за параметр d прийняти товщину сполучного шару, що складає сотні нанометрів. Тому міцність руйнування наноз'єднання може бути вищою в 20—100 разів в порівнянні з алюмінієвою масивною деталлю.

Хімічна взаємодія на границі полірованих деталей з нанесеними металевими шарами створює умови закріплення дислокацій, що істотно зменшує пластичність цього шару і збільшує міцність. Використання методу електронної мікроскопії дозволило роздивитися поверхню руйнування (рис. 3, а).

Видно, що тріщина проходить як через черодуру, так і через сполучний шов, поверхня руйнування надзвичайно розвинута й у деяких випадках має вигляд «венного» візерунка.

Таке з'єднання набуває властивостей лінійно-пружного високоміцного композиційного матеріалу [12].

Розроблена технологія дає можливість виготовлення дзеркал «сандвіч»-конструкції з черодуру [5]. У цьому випадку середня частина дзеркала у виді стільникової конструкції має наскрізні отвори, які легко отримати шляхом механічної обробки алмазним інструментом або водяним струменем високого тиску (з абразивним порошком) за аналогією з дзеркалом з ULE телескопа Хаббла.

Експериментальні дослідження підтвердили можливість з'єднання стільникової структури з

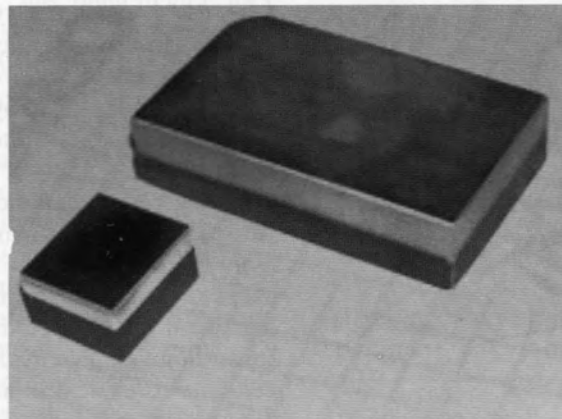
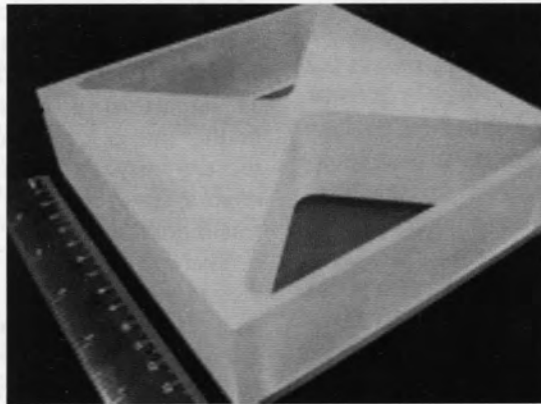
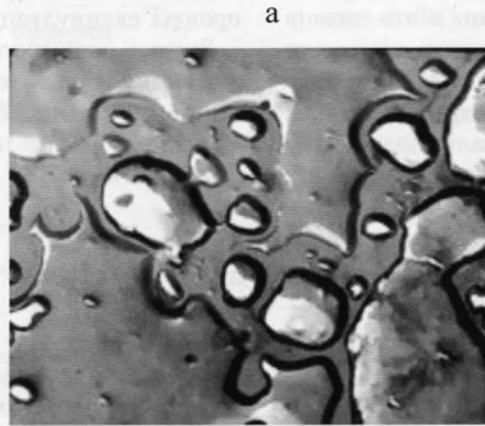


Рис. 3. а — мікроструктура поверхні руйнування на границі церодур — сполучний шов, збільшення $10000\times$; б — з'єднання за розробленою технологією фрагмента стільникової структури з церодуру (алмазна і хімічна обробка) з тонкою нижньою пластиною з церодуру; в — наноз'єднання SiC-кераміки (нижня частина) зі склокерамікою

Переваги та недоліки конструкторсько-технологічних рішень з виготовлення полегшених астрономічних дзеркал

Ва-ріант	Конструкція полегшеного дзеркала	Технологія виготовлення	Недоліки	Переваги	Висновки
1.	Дзеркало з церодуру (CO115M, цервіт) виготовлене з монолітної заготовки	Послідовне алмазне свердління і фрезерування тильної сторони заготовки з наступною хімічною обробкою	— невисокий ступінь полегшення ($\approx 60\%$) — отвори в тильній стороні зменшують твердість і стабільність конструкції — тривалий цикл виготовлення, тому що технологічні операції виконуються послідовно	Дзеркала перевірені часом і мають довіру у споживачів на ринку, є принципова можливість виготовлення дзеркал діаметром до 8 м	Дані дзеркала і технологія можуть бути прийняті як базові для порівняння
2.	Дзеркало з ULE «сандвіч»-конструкції	Паралельно виготовляються три окремі деталі: дві пластини і середня стільникова пластина, полегшення в якій виконується різанням водяним струменем. Деталі з'єднуються спіканням при температурі $\approx 1000^\circ\text{C}$	— висока вартість матеріалу (ULE) — максимальний розмір, освоєний у виробництві — 4 м	— полегшення вище 90 % — висока жорсткість конструкції	Дані дзеркала переважніші, ніж дзеркала з церодуру (CO115M, цервіт) для використання в космічних телескопах. Успішне застосування такого дзеркала на телескопі Хаббла протягом 10 років
3.	Дзеркало «сандвіч»-конструкції з церодуру (CO115M, цервіт)	Паралельно виготовляються три окремі деталі: дві пластини і середня стільникова пластина може бути виконана: — з церодуру — з ULE — із трубчастих елементів — методом порошкової металургії без наступної механічної обробки отворів — з SiC порошкової заготовки. Усі перераховані варіанти можливо з'єднати завдяки розробленій ТСПД-технології	Необхідно полірувати поверхні, що з'єднуються, і наносити вакуумні покриття. Ці додаткові операції здорожують виготовлення	— високий ступінь полегшення (більш 90 %), а у випадку застосування SiC — до 98 % — висока жорсткість конструкції — можливість одержання дзеркал діаметром до 8 м — використання традиційних технологій і устаткування оптичного приладобудування	За критерієм якість/вартість має переваги перед варіантами № 1 і 2

тонкою плоскою пластиною (рис. 3, б).

Іншим перспективним матеріалом за даними рис. 1 для виготовлення полегшених дзеркал телескопів є карбід кремнію (SiC), для одержання якого використовуються дешеві і доступні матеріали, а методи порошкової металургії дозволяють виготовляти полегшену заготовку, форма і розміри якої максимально близькі до

вимог конструкції дзеркала. Однак при обробці робочої поверхні дзеркала розкриваються пори та інші дефекти, властиві матеріалам, одержуваним методами порошкової металургії. Цей недолік може бути усунутий використанням двошарового SiC: основа отримана методами порошкової металургії, а зовнішній робочий шар товщиною 0.5 мм створений методами осаджен-

ня SiC з газової фази (CVD — SiC). Сумарна щільність такого комбінованого полегшеного дзеркала діаметром 70 см (японський ІЧ-телескоп) складала 2.2 т/м^3 , а загальна вага дзеркала — 8.2 кг. Одним з головних достоїнств таких дзеркал є стабільність форми у широкому діапазоні температур, у тому числі і при криогенних температурах, необхідних для роботи ІЧ-фотоприймачів, що перетворюють оптичне зображення в цифрове. У Європі найбільш відома фірма ЕСМ, що випускає заготовки і дзеркала з SiC-кераміки високої якості під торговельною назвою «Cesic». А в США — фірма «Курстек», яка випускає продукцію оптичної якості за назвою «ultrasic».

Однак технологія CVD-Si складно реалізується у виробничих умовах для великогабаритних дзеркал діаметром понад 1 м. У зв'язку з цим, за повідомленням Європейського космічного агентства, дзеркало для телескопа Гершеля діаметром 3.5 м, запуск якого намічений на 2007 рік, виготовляється з 12 SiC-сегментів (за матеріалами Cosmiverse.com).

Тому одним з перспективних напрямків є можливість створення дзеркал на основі SiC-кераміки і верхнього робочого шару з більш технологічного матеріалу, наприклад оптичної склокераміки [1].

Дослідження показали можливість такого перспективного з'єднання SiC-кераміки зі склокерамікою з близьким значенням КТР (рис. 3, в).

Комбіноване дзеркало може мати рекордне значення показника полегшення, тому що питома жорсткість E/ρ (де E — модуль пружності, а ρ — питома вага) SiC-кераміки в кілька разів перевищує аналогічний показник для склокераміки. Тому загальна товщина такого комбінованого полегшеного дзеркала може бути принаймні у два-три рази меншою, ніж для дзеркала, виконаного цілком з церодуру.

Порівняльні дані за технологіями виготовлення полегшених астрономічних дзеркал із залученням результатів розробленої ТСПД-технології приведені у таблиці.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних даних і сукупність результатів, отриманих експериментальним

шляхом, дозволяють виділити в якості найбільш перспективних матеріалів для полегшених дзеркал телескопів SiC-кераміку і склокераміку.

2. Розроблена ТСПД-технологія дозволяє реалізувати «сендвіч»-конструкції полегшених дзеркал як зі склокераміки, так і комбіновані конструкції SiC-кераміка (основа) — склокераміка (верхній робочий шар).

Дослідження проведені при фінансовій підтримці УНТЦ (проект № 3045).

Автор вдячний Ю. М. Родічеву (Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України) за допомогу в дослідженнях механічної міцності зразків.

1. Декларационный патент Украины № 9167. Зеркало Маслова / В. П. Маслов. — Оpubл. 15.09.2005, Бюл. № 9.
2. Максудов Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. — Л.-М.: ОГИЗ, 1948.
3. Маслов В. П. Стеклокерамика с практически нулевым коэффициентом термического расширения и способы ее прецизионного соединения // Тез. докл. Междунар. конф. «Современное материаловедение: достижения и проблемы». — Киев, 2005.—С. 627.
4. Маслов В. П. Наносоединение — новый тип бесклевого соединения прецизионных деталей для работы в экстремальных условиях // Тр. Междунар. конф. МЕЕ-2006 «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (18—22 сентября 2006, Ялта). — Жуковка, Крым, 2006.—С. 137.
5. Маслов В. П. Нано- та мікротехнології з'єднання прецизійних конструкцій вузлів оптико-електронних приладів авіаційно-космічної техніки // Зб. доп. VI Міжнар. науково-технічної конф. «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки» — К.: НТУУ «КПІ», 2007.—Ч. 1.
6. Михельсон Н. Н. Бериллий — возможный материал для астрономических зеркал будущего // Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулковке.—1958.—№ 162.—С. 153—158.
7. Михельсон Н. Н. Оптические телескопы. — М.: Наука, 1976.—313 с.
8. Павлушкин Н. М., Сентюрин Г. Г., Ходаковская Р. Р. Практикум по технологии стекла и ситаллов. — М.: Стройиздат, 1970.—363 с.
9. Справочник технолога-оптика / Под общей ред. С. М. Кузнецова, М. А. Окатова. — Л.: Машиностроение, 1983.—С. 362—363.
10. Химическая технология стекла и ситаллов / Под ред. Н. М. Павлушкина. — М.: Стройиздат, 1983.—С. 391—411.
11. Berezhinsky L. I., Maslov V. P., Serdega B. K., et al. Study of chemical interaction at Al-ZERODUR interface // J.

- European Ceramic Soc.—2006.—26/16.—P. 3825—3830.
12. Int. Pat. application # PCT/UA2006/000045. The Maslov's ceramic bonding of the glassy-crystalline units.—, 17 July 2006.
 13. Maslov V. P. High-reliability unglue bonding of Zerodur details // The Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (June, 2005, Munich, Germany). — Munich, 2005.—P. 777—779.
 14. Strzelecki M., Wyckoff N., O'Malley R., et al. Sticking together // SPIE's Oemagazine.—2003.—May.—P. 27—29.
 15. Zeiders G. W. ULTIMA Update — Ultra Light Telescope Integrated Missions for Astronomy // NGST Technology Challenge Review. — Goddard Space Flight Center, July 1997.

PERSPECTIVE MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR CONSTRUCTING LIGHT-WEIGHT TELESCOPE MIRRORS

V. P. Maslov

The analysis of literature data and the set of experimental results allow one to consider SiC-ceramics and glassceramics as the most perspective materials for light-weight telescope mirrors. The developed technology of solid-phase bonding of polished details with the help of nano-dimensional vacuum coatings (SBPD-technology) enables one to realize “sandwich”-constructions of the light-weight mirrors both of glass ceramics and of the combined constructions, SiC-ceramics (basis) — glassceramics (top working layer).