

В.Н. ПЕТРОВ, Д.В. ПЕТРОВ, Л.Л. БРАГИНА, С.В. ФІЛОНЕНКО, С.О. ОЛИМ**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ОПТИЧНИХ СКЛОВИРОБІВ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ**

Наведено результати порівняльного аналізу існуючих способів формування виробів з оптичного скла. Створено новий спосіб виробництва деталей складної конфігурації з такого скла і вирішені питання щодо конструктивних особливостей печі формування вказаних деталей. Розроблена технологічна лінія для нового способу формування деталей з оптичного скла. Обрано необхідну марку оптичного скла, що відповідає технічному завданню на виготовлення приладів військового призначення.

Ключові слова: оптичні скловироби складної конфігурації, формування скла, в'язкість, вакуумне моллювання, термостійкість.

Приведены результаты сравнительного анализа известных способов формирования изделий из оптического стекла. Создан новый способ производства деталей сложной конфигурации из такого стекла и решены вопросы, относящиеся к конструктивным особенностям печи формирования указанных деталей. Разработана технологическая линия формирования деталей из оптического стекла по новому способу. Выбрана необходимая марка стекла, которое отвечает техническому заданию на изготовление деталей военного назначения.

Ключевые слова: оптические стеклоизделия сложной конфигурации, формирование стекла, вязкость, вакуумное моллирование, термостойкость.

The results of comparative analysis of the known methods of products forming from optical glass are given. A new method for the production of parts with complex configuration from such glass created and issues relating to the design features of the furnace forming these parts decided. The technological line for the forming of details from the optical glass by the novel process developed. The select of the necessary brand of glass that meets the technical specifications on the manufacture of apparatus for military purposes was made.

Keywords: optical glass products of complex configuration, the formation of the glass, the viscosity, vacuum bending, heat resistance.

Вступ. За станом справ на сьогоднішній момент важливим завданням є поліпшення якості продукції та збільшення її видів в багатьох галузях виробництва, зокрема у виробництві оптичного скла.

Єдиним виробником такого скла в Україні є ДП «Ізюмський приладобудівний завод». Основний напрямком цього підприємства - виробництво продукції військово-оборонного характеру. Перед заводом стоїть безліч завдань, що відносяться як до розробки нових технологій у виробництві скла, так і до рішення технологічних завдань, обумовлених економічним станом і геополітичною ситуацією.

Особливо складним завданням є створення лінії виробництва для нової продукції при малих партіях і неперіодичних замовленнях. Така лінія повинна відповідати наступним вимогам: забезпечення виключно високої якості кінцевої продукції і мінімальні витрати на її створення та обслуговування під час технологічного простою. Це завдання було поставлено при створенні виробів з оптичного скла зі складною конфігурацією для приладів військового озброєння. Зокрема, відбиваюча поверхня даних виробів задана наступними залежностями:

$$x^2 + y^2 = 206 \quad (1)$$

$$3614z - 0.068z^2 \quad (2)$$

$$y^2 = 4fx, \quad (3)$$

де f – фокусна відстань.

Діаметр виробів повинен складати 300 мм, висота - 230 мм, товщина - 5 мм. Крім цього, дане оптичне скло повинне мати низькі значення температурного коефіцієнту лінійного розширення ТКЛР і високу термостійкість.

Виробництво деталей з комплексом вказаних специфічних параметрів є складним науково-технічним завданням, рішення якого потребувало розробки нового

способа формування скла і створення такої технологічної лінії виробництва та такого обладнання, які б забезпечили випуск виробів з властивостями згідно наведених вимог. Саме це і склало мету даної роботи.

Базові положення створення нового способу формування скловиробів. З усіх фізико-хімічних властивостей, які характеризують скло як матеріал, найважливішу роль в процесі гарячого формування грають в'язкість і поверхневий натяг [1]. Процес формування будь-якого матеріалу, що знаходиться в пластичному стані, поділяють на дві стадії: утворення форми та її закріплення. Дуже часто фіксація форми є більш тривалою, трудомісткою і вартісною операцією, ніж сам процес формування.

У скляному виробництві обидві стадії процесу формування базуються на використанні в'язкості скломаси, яка значною мірою залежить від температури. Доводячи охолодження звареного скла до однієї чи іншої межі, фахівці забезпечують будь-яку ступінь пластичності, найбільш зручну для обраного способу формування. Для закріплення ж одержаної форми досить охолодити виріб до ще більш низької температури, при якій розплав втратить останні ознаки плинності. Це свідчить про важливу роль в'язкості в процесі формування скловиробів [2].

Зі зниженням температури розплавленого скла в'язкість його безперервно зростає від 10 Па·с в процесі освітлення до 10^{12} Па·с при нижній температурі відпаду і далі до практично повної відсутності плинності. Абсолютні значення в'язкості і її температурний градієнт залежать не тільки від температури, але і від складу скла [3].

Таким чином, в залежності від температури змінюються в'язкість та значно меншою мірою поверхневий натяг скломаси. Це створює ті специфічні сприятливі умови, що дозволяють

використовувати різноманітні і прості способи формування, які не вживають в інших галузях промисловості.

При виробництві скла його в'язкість змінюється більш ніж на 14-15 порядків. Тому для вивчення залежності в'язкість-температура доводиться застосовувати кілька різних методів. Складну форму кривої залежності в'язкості від температури зазвичай описують рівнянням Фогеля-Фулчера-Таммана[4]:

$$\ln \tau_{VFT}(1/T) = A + B/(T - T_0)$$

де

- τ_{VFT} - час діелектричної релаксації;
- A, B, T_0 - константи.

Зміни складу скла, що знижують ступінь зв'язності склообтворюючої сітки, призводять до зменшення в'язкості; зміни, які підвищують ступінь зв'язності, збільшують в'язкість. Гідроксильні групи, фториди і PbO діють як плавні і знижують в'язкість оксидних розплавів. В інтервалі переходу в склоподібний стан в'язкість значно залежить від температури розплаву і змінюється з часом, якщо зразок піддається термічній обробці при температурі. Фазовий поділ і кристалізація значно впливають на в'язкість розплавів, особливо в області переходу у склоподібний стан. При визначенні в'язкості розділених на фази зразків скла особливо важливо враховувати ці фактори.

Ще одним важливим параметром формування є відповідна температура розм'якшення скломаси. Початок розм'якшення скла характеризується температурою, при якій величина в'язкості набуває значення приблизно 10^{11} Па·с. Для звичайних промислових стекол початок розм'якшення скла настає при температурі 400-550 °С. За кінець розм'якшення скла приймають температуру, за якої величина в'язкості дорівнює приблизно $2 \cdot 10^7$ Па·с, що відповідає температурі від 700 до 750 °С. На практиці температура початку розм'якшення відповідає стану скла, при якому воно під дією певного навантаження починає деформуватися. На температуру початку розм'якшення дуже сильно впливає хімічний склад скла. Зокрема, зниженню температури початку розм'якшення скла, як і його в'язкості, сприяють наступні оксиди: B_2O_3 , BaO, Na_2O , K_2O , Li_2O , Fe_2O_3 , MnO і PbO. Підвищують температуру розм'якшення і в'язкість Al_2O_3 , CaO, MgO, SiO_2 , ZrO_2 , TiO_2 [1,3]

Механічні ж властивості скла характеризуються міцністю при стисканні, міцністю при розтягуванні, крихкістю, твердістю і відносною щільністю. Міцність скла при стисненні становить від 490 до 1960 Па; сила стиснення повинна бути спрямована перпендикулярно до поверхні зразка і рівномірно розподілена. Міцність при стисненні становить від 34 до 83 Па. Слід зазначити, що міцність при розтягуванні залежить більшою мірою від стану поверхні та інших причин. Наприклад, опір розриву для скляних ниток діаметром 0,1 і 0,03 мм становить відповідно 490 і 980 Па, а при подальшому зменшенні діаметра значно зростає [4].

Таким чином, розглянувши основні фізико-хімічні властивості оптичного скла, переходимо до розгляду способів його формування. На даний час їх

можна розділити на чотири основні групи: пресування, прокатка, видування і витягування.

Пресування - це формування виробів з рідкої скломаси на автоматичних пресах. Дозовану краплю скломаси при температурі вище температури розм'якшення t_g , подають у матрицю автоматичного преса і зверху притискають пуансоном, надаючи краплі скломаси форму, задану геометрією матриці і пуансона. Однак, діаметр виробів при такому методі формування не повинен перевищувати 120 мм. Це обумовлено нерівномірним прогріванням виробів з розміром більше 120 мм, що може призвести до механічних пошкоджень. Тому цей спосіб формування не може бути застосований у вирішенні вказаного вище завдання.

Видування - відмітний від всіх застосованих способів формування, який найбільш повно використовує своєрідність робочих властивостей скла, таких як поверхневий натяг і температурну залежність в'язкості. Процес видування використовують при формуванні з рідкої скломаси при температурі вище температури розм'якшення t_g , тобто скломаса повинна мати не тільки розм'якшення, але і плинність. Даний спосіб є досить популярним в скловарному виробництві виробів побутового споживання, проте для вирішення завдання даної роботи він не є припустимим: при такому способі формування немає можливості задавати конкретні складні геометричні параметри і забезпечити рівномірність товщини виробу.

Витягування - як спосіб формування виник з видування та є його логічним продовженням. Найбільш поширеним способом витягування є спосіб, коли основним робочим органом є «мундштук», що представляє собою керамічний наконечник, насаджений на трубу з жароміцної сталі. Даний спосіб також не дозволяє вирішити поставлене завдання, так як немає можливості створення деталей необхідної геометричної форми.

Прокатка - з усіх способів формування виробів зі є найменш специфічним, запозиченим у інших технологій. При прокатці скломаса випливає по жолобу з басейну ванної печі і надходить в прокатний пристрій, що складається з двох порожніх вальців, які охолоджуються водою. Прокатана стрічка скла надходить на охолоджену плиту, далі по роликовому транспортеру - в тунельну піч відпалу. За таким способом формування, застосовуючи гравіруючі вальці, можна отримати рифлене візерункове скло з зовнішнім або внутрішнім малюнком.

Найбільш прийнятний спосіб формування, який частково відповідав би необхідним вимогам для вирішення завдання, є **моллювання**. Операція, що носить цю назву, має за мету надати неправильним шматках скла, отриманим в результаті розбиття, більш-менш правильну геометричну форму завдяки здатності скла розм'якшуватися при нагріванні. Температура, до якої потрібно нагріти скло для приведення його у пластичний, найбільш прийнятний для формування стан, залежить від складу скла і коливається від 500 до 800 °С[5].

Цей спосіб найбільше підходить для досягнення поставленої мети, проте він не дає можливості створити деталь зі значною стрілою прогину. Все це обумовлює перегрів деталі і неоднорідності кінцевої продукції.

Ще один спосіб формування скла, який набув поширення в останні роки, це **відцентрове формування**. При відцентровому формуванні порція гарячої скломаси подається в роз'ємну металеву форму, що обертається зі швидкістю 800-1200 об / хв. Під дією відцентрових сил скломаса рівномірно розподіляється по стінках форми та точно копіює її конфігурацію. Так виготовляються лінзи Френеля, що представляють собою бочкоподібні скляні тіла з поясними лінзами і призми зовнішньої поверхні. Даний спосіб має лише один недолік: необхідність додаткової обробки внутрішньої поверхні, яка утворюється хвилями за рахунок відцентрової сили під час процесу формування[6].

Останній спосіб задовольняє всі вимоги для оптичного виробу, однак сама розробка і установка конструкції відцентрового апарату є вартісною. Крім того, економічний ефект установка приносить лише при повному завантаженні продукції, що випускається. У моменти технологічного простою вона потребує дорогого обслуговування. Тому, виходячи з усього цього, необхідним було створити конструкцію, яка задовольняла б технологічним вимогам до виробу і була звичайною і економною в обслуговуванні при її неперіодичній експлуатації.

Розробка нового методу формування скловиробів. З усього перерахованого вище можна зробити висновок, що процес формування скла зводиться до перетворення в'язкого розплаву скломаси у твердий виріб заданої конфігурації в результаті прикладення зовнішніх сил до об'єкта формування і його поступового охолодження і затвердіння. Обираючи для формування температурний інтервал, можна забезпечити швидкість мимовільної фіксації доданої склу форми. Що ж стосовно проблем формування скловиробів зі складною конфігурацією, можна впевнено сказати, що такі способи, як пресування, видування, витягування, прокатка, моллювання і відцентрове формування, не вирішують завдань формування скловиробів зі складною конфігурацією за причини, що до поверхні цих виробів висуваються жорсткі вимоги до чистоти поверхні, а точність геометричних розмірів повинна забезпечувати задану фокусну відстань.

Тому, спираючись на значний практичний досвід і ґрунтуючись на науково-теоретичних положеннях, висококваліфіковані фахівці ДП ІПЗ створили новий спосіб формування деталей з оптичного скла зі складною конфігурацією. Для забезпечення виконання вимог до чистоти поверхонь виробу кругла пластина з оптичного скла заданого діаметра піддається механічній обробці. Потім готову поліровану пластину встановлюють на борт чаші із заданою поверхнею кривої і розміщують її у печі моллювання. Температура в ній дорівнює температурі розм'якшення скла ($\sim 800^\circ\text{C}$), що відповідає в'язкості скла $10^6 - 10^7$ Па·с. Це дуже важливий момент, тому що при таких температурах і в'язкості скло

розм'якшується, але ще не має властивостей плинності, що дозволяє зберігати необхідну поверхню пластини. Витримавши її в печі протягом часу, достатнього для розм'якшення пластини по всій товщині, через отвір в дні чаші підключається вакуумний насос і розм'якшена пластина вакуумом розтягується по поверхні чаші, набуваючи необхідну конфігурацію.

В якості оптичного скла з низьким ТКЛР і високою температурною стійкістю було вибрано оптичне скло марки ЛК-105 [7], яке повністю задовольняло необхідним вимогам, пов'язаним з виготовленням з нього деталей виробів військового призначення.

Висновки. Таким чином, була створена піч вакуумного моллювання, що в підсумку дозволило створити вироби з відбиваючою поверхнею, яка відповідає залежностям $x^2+y^2=206,3614z - 0,068z^2$; $y^2=4fx$. Обрано оптичне скло з низьким ТКЛР і високою температурною стійкістю, формування з якого за розробленою технологією деталей виробів військового призначення призвело до забезпечення необхідних службових характеристик.

Список літератури

1. Технология стекла / И.И. Китайгородский, Н.Н. Качалов, В.В. Варгин и др. ; под общей ред. И.И. Китайгородского. – [4-е издание]. – М.: Госстройиздат, 1967. – 564 с.
2. Немиллов С.В. Оптическое материаловедение: Оптическое стекло: учебн. пособие/ С.В.Немиллов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 175 с.
3. Shelby J. E. Introduction to Glass Science and Technology / J. E. Shelby. – New York: The royal society of chemistry, 2003. – 288 p.
4. Сандитов Д.С. Температурная зависимость вязкости стеклообразующих жидкостей/ Сандитов Д.С., Мункуева С.Б., Машанов А.А. – Вестник Бурятского государственного университета, - 2011.- №3. – С. 170-184.
5. Качалов Н.Н. Основы производства оптического стекла / Н.Н. Качалов, В.Г.Воано. – Л.: ОНТИ-ХИМТЕОРЕТ, 1936. – 194 с.
6. Сулим А.В. Производство оптических деталей / А.В.Сулим– [3-е издание, переработанное и дополненное]. – М.: Высшая школа, 1975. – 317 с.
7. ГОСТ 3514-94. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия. – Минск, 1997. – 36 с

References (transliterated)

1. Tehnologiya stekla / [I.I. Kitaigorodskii, N.N. Kachalov, V.V. Vargin i dr.] ; pod obschei red. I.I. Kitaigorodskogo. – [4_e izdanie]. – M.: Gos. izdatelstvo literaturi po stroitelstvu, arhitekture i stroitelnim materialam, 1961. - 623 p.
2. Nemilov S.V. Opticheskoe materialovedenie: Opticheskoe steklo: uchebn. posobie /S.V. Nemilov. – SPb: SPbU ITMO, 2011. – 175 p.
3. Shelby J. E. Introduction to Glass Science and Technology / J. E. Shelby. – New York: The royal society of chemistry, 2003. – 288 p.
4. Sanditov D.S. Temperaturnaja zavisimost' v'язkosti stekloobrazuushchih zhidkostej / Sanditov D.S., Munkueva S.B., Mashanov A.A. – Vestnik Buriatskogo gosudarstvennogo universiteta, - 2011.- №3. – P. 170-184.
5. Kachalov N.N. Osnovi proizvodstva opticheskogo stekla / Kachalov N.N., Voano V.G. – L.: ONTI-HIMTEORET, 1936. – 194 p.
6. Sulim A.V. Proizvodstvo opticheskikh detalei / Sulim A.V. – [3-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe]. – Moscow: Visshaya shkola, 1975. – 317 p.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Особливості формування оптичних скловиробів складної конфігурації / **В.Н. Петров**, **Д.В. Петров**, **Л.Л. Брагіна**, **С.В. Філоненко**, **С.О. Олым** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 22 (1194). – С. 136-139. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0821.

Особенности формирования оптических изделий сложной конфигурации / **В.Н. Петров**, **Д.В. Петров**, **Л.Л. Брагіна**, **С.В. Філоненко**, **С.О. Олым** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 22 (1194). – С. 136-139. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0821.

Features of Optical Products of Complex Configuration Forming / **V. Petrov**, **D. Petrov**, **L. Bragina**, **S. Filonenko**, **S. Olym** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Chemistry, chemical technology and environment. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. - № 22. – P.136-139. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0821.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петров Віктор Миколайович – Державне підприємство «Ізюмський приладобудівний завод», зам. головного технолога з нової техніки 1987-1998, 2000-2010;

Петров Віктор Николаевич – Государственное предприятие «Изюмский приборостроительный завод», зам. главного технолога по новой технике 1987-1998, 2000-2010;

Petrov Viktor – State Development «Izyum's Instrument-Making Plant», Vice - Chief Technologist for New Technology 1987-1998, 2000-2010;

Петров Дмитро Вікторович – Державне підприємство «Ізюмський приладобудівний завод», інженер відділу головного метролога; тел.: 066-947-8031; e-mail: petrovdmitry@ukr.net

Петров Дмитрий Викторович – Государственное предприятие «Изюмский приборостроительный завод», инженер отдела главного метролога; тел.: 066-947-8031; e-mail: petrovdmitry@ukr.net

Petrov Dmitry – State Development «Izyum's Instrument-Making Plant», Engineer of a Chief Metrologist's Department; тел.: 066-947-8031; e-mail: petrovdmitry@ukr.net

Брагіна Людмила Лазарівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доктор технічних наук, професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; тел.: (057) 707-68-78; e-mail: bragina_l@ukr.net

Брагіна Людмила Лазаревна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доктор технических наук, профессор кафедры технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей; тел.: (057) 707-68-78; e-mail: bragina_l@ukr.net

Bragina Liudmyla –National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Dr. Sci, Professor of Department of Ceramics, Refractories, Glass and Enamel Technology; тел.: (057) 707-68-78; e-mail: bragina_l@ukr.net

Філоненко Сергій Вікторович – Державне підприємство «Ізюмський приладобудівний завод», директор підприємства; тел.: 057 432 15 48, e-mail: ipz@ipz.com.ua

Філоненко Сергей Викторович – Государственное предприятие «Изюмский приборостроительный завод», директор предприятия; тел.: 057 432 15 48, e-mail: ipz@ipz.com.ua

Philonenko Sergey – State Development «Izyum's Instrument-Making Plant», Director of Development; тел.: 057 432 15 48, e-mail: ipz@ipz.com.ua

Олым Світлана Олегівна – Державне підприємство «Ізюмський приладобудівний завод», головний технолог оптичного скловарного виробництва; тел.: 0951436144, e-mail: ipz@ipz.com.ua

Олым Светлана Олеговна – Государственное предприятие «Изюмский приборостроительный завод», главный технолог оптического стекловарного производства; тел.: 0951436144, e-mail: ipz@ipz.com.ua

Olym Svetlana – State Development «Izyum's Instrument-Making Plant», Chief Technologist of Optical Glass-Making Manufactory, тел.: 0951436144, e-mail: ipz@ipz.com.ua