

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ  
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

КВАСНИЦЬКА КАТЕРИНА ГЕННАДІЇВНА

УДК 621.74.047.44.226.2.669.245.018.28

ДИСЕРТАЦІЯ  
**ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ  
ОБОЛОНКОВИХ ФОРМ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ВИЛИВКІВ ДЕТАЛЕЙ  
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ**

Спеціальність – 136 Металургія  
Галузь знань – 13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_К.Г. Квасницька

Науковий керівник:  
Шалевська Інна Анатоліївна, доктор технічних наук, доцент

Київ 2025

## АНОТАЦІЯ

*Квасницька К.Г.* Вдосконалення технології виготовлення керамічних оболонкових форм для одержання виливків деталей газотурбінних двигунів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 Металургія (13 – Механічна інженерія). – Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, 2025.

Дисертація присвячена розробленню технологічних процесів виготовлення керамічних оболонкових форм за разовими моделями, що одержані за допомогою 3D-друку, для лиття складнопрофільних деталей.

Виконано аналіз сучасних технологій лиття виливків за моделями, що витоплюються, із жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів. На основі огляду літературних джерел та подальшого порівняльного оцінювання властивостей керамічних матеріалів здійснено аналіз доцільності їх застосування для забезпечення необхідних міцнісних характеристик керамічних оболонкових форм, призначених для плавки жароміцних сплавів.

Досліджено склади керамічних суспензій з різними компонентами і зв'язувальними елементами. У результаті вивчення властивостей водних суспензій з керамічними наповнювачами (електрокорунд, кварц, дистен-силіманіт) встановлено, що вони для рівномірного покриття моделей потребують введення більшої кількості вогнетривкого наповнювача. Це пов'язано з тим, що такого типу суміші мають більшу умовну в'язкість в порівнянні з суспензіями на етилсилікаті (ЕТС). Вони показали задовільну покривну здатність різних моделей, завдяки наявності спеціальних добавок в їх складі, в порівнянні з суспензіями, які містять кремнезоль.

Встановлено, що міцність на вигин керамік, одержаних з водними зв'язувальними компонентами, є вищою ніж з ЕТС. Матеріали на основі електрокорунду і водних зв'язувальних компонентів мають міцність в сирому стані в 2,5-3,5 рази і в прожареному в 3,5-5,0 разів вищу, ніж з ЕТС. При цьому міцність на вигин керамік з дистен-силіманітовим наповнювачем

і зв'язувальними компонентами Remasol Premium Plus і кремнезем в сирому стані склала 3,8-7,1 МПа і 5,1-8,1 МПа, відповідно, що в 2 рази вище ніж у кераміки з ЕТС. Після прожарювання їх міцність зросла до 6,4-11,1 МПа і 6,6-10,0 МПа.

Визначено, що матеріали на основі електрокорунду, дистен-силіманіту і Remasol Premium Plus мають міцність на розрив в сирому стані більше 3,0 МПа. Це приблизно в два рази перевищує міцність відповідних керамік на ЕТС. Після прожарювання їх міцність зросла також в два рази.

Для пояснення підвищених показників міцності керамік зі зв'язувальними компонентами на водній основі було вивчено механізми з'єднання часток вогнетриву. Під час сушіння керамічної оболонкової форми з водними зв'язувальними компонентами відбувається видалення води, і золь переходить у гель. При цьому відбувається скорочення відстаней між частинками та формування зв'язків дальнього порядку. Таким чином кремнезем зв'язує частинки наповнювача, а потім утворює аморфний кремнезем.

У результаті досліджень встановлено відмінності у газопроникності експериментальних керамічних матеріалів, які суттєво зумовлені формою, розмірами та характером упаковки сферичних частинок вогнетривких компонентів. Встановлено, що газопроникність керамічних матеріалів на основі етилсилікатного зв'язувального компонента є дуже низькою, що зумовлено їх щільною упаковкою. Натомість корундові матеріали, виготовлені з використанням водних зв'язувальних компонентів та сферичних частинок  $Al_2O_3$ , продемонстрували газопроникність, яка вдвічі вища. Щодо кварцової кераміки з водними зв'язувальними компонентами, то її газопроникність була в 1,8 та 1,4 рази вищою, порівняно з матеріалами на основі етилсилікату. Матеріали, отримані з дистенсиліманіту та водного зв'язувального компонента, мали показники понад 10 одиниць, тоді як аналогічна кераміка на основі етилсилікату — менше 2 одиниць. Це пояснюється тим, що при перетворенні  $\alpha$ -кварцу в  $\alpha$ -кристоболіт через  $\alpha$ -тридіаніт відбувається суттєва структурна перебудова, що

супроводжується значним збільшенням елементарної комірки. В результаті об'єм матеріалу збільшується на 15%, що призводить до зменшення його щільності.

Для випробування керамічних форм на основі водного зв'язувального компонента було обґрунтовано вибір жароміцного сплаву та визначено обладнання для плавлення складнопрофільних виливків з метою одержання лопаток газотурбінних двигунів.

Встановлено, що керамічні оболонкові форми на основі корундового наповнювача, виготовлені із застосуванням водних зв'язувальних компонентів, у температурному діапазоні від температури плавлення 1450°C до 1600°C не вступають у взаємодію з жароміцними розплавами. Це забезпечує високу чистоту поверхні виливків, що, у свою чергу, сприяє зниженню кількості браку виливків з нагароутворенням.

Проведені дослідження показали, що водні зв'язувальні компоненти можуть бути рекомендовані для впровадження на українських ливарних підприємствах замість етилсилікату, що дозволить усунути проблеми пожежної безпеки і підвищити екологічність виробництва.

Для виготовлення моделей малосерійного виробництва складнопрофільних виливків із жароміцних нікелевих сплавів, що отримуються литтям за витоплюємими моделями, було вибрано матеріал PLA (полілактид) для 3D-принтерів, з урахуванням таких характеристик, як розмірна точність, зольність, коефіцієнт лінійного термічного розширення (КЛТР), усадка та вартість. Полілактид (PLA) є біополімером, який отримують із відновлюваних рослинних ресурсів, зокрема кукурудзи та цукрових буряків. Матеріал є повністю біорозкладним, екологічно безпечним і нетоксичним. У процесі нагрівання під час роботи він виділяє характерний напівсолодкий запах, що, поряд із його безпечністю, робить PLA придатним для використання у закритих приміщеннях. Висока розмірна стабільність і низький рівень деформацій при друку сприяють точному відтворенню моделей та забезпечують високу роздільну здатність. Завдяки цим властивостям полілактид дозволяє виготовляти моделі

складної геометричної конфігурації, що є перевагою порівняно з матеріалами типу ABS.

Проведені експериментальні дослідження усадки пластикових моделей під час зберігання для подальшого використання у процесі виготовлення керамічних оболонкових форм. Результати показали, що максимальне відхилення від заданих розмірів деталей становило приблизно 0,4 %. Використання моделей з полілактиду (PLA) є екологічно безпечне та забезпечує скорочення тривалості виробничого циклу виготовлення керамічних оболонкових форм.

Експериментальне випробування керамічних форм, виготовлених із застосуванням зв'язувальних компонентів на водній основі, засвідчило, що виливки з жароміцного нікелевого сплаву відзначалися задовільною якістю поверхні та відсутністю хімічного пригару.

З метою оцінки працездатності нових керамічних оболонкових форм було здійснено повний технологічний цикл виготовлення зразків і робочих лопаток другого ступеня турбіни високого тиску газотурбінного двигуна методом спрямованої кристалізації з жароміцного корозійностійкого сплаву CM88. Дослідне плавлення проводилося на вертикальному ливарному агрегаті VIM-25-175C. Проведено дослідження макро- та мікроструктури отриманих зразків, а також визначено їхні механічні характеристики, показники тривалої та втомної міцності, а також корозійну стійкість.

Розроблено технічні рекомендації виготовлення лопаток ГТД в процесі використання пластикових моделей та керамічних сумішей з зв'язувальними компонентами на водній основі методом 3D-друку. Це привело до створення і обґрунтування технологічного процесу одержання виливків з корозійностійких сплавів та підвищення якості виробів з них, скорочення його часу та захисту навколишнього середовища від шкідливих речовин для малосерійного виробництва (ремонт ГТД, створення нових ГТД четвертого покоління). Запропонована технологія виготовлення керамічних оболонкових форм із використанням водних

зв'язувальних компонентів за полілактидними моделями, одержаними методом 3D-друку, для лиття складнопрофільних виливків із жароміцних сплавів не потребує спеціалізованих умов сушіння та характеризується екологічною безпечністю.

Отримані в процесі виконання роботи результати теоретичних і експериментальних досліджень були перевірені на ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» (що підтверджується актом дослідно-промислової перевірки від 18.09.2023 р.) та можуть бути впроваджені на вітчизняних підприємствах газотурбобудівної галузі.

**Ключові слова:** жароміцний корозійностійкий сплав; фазово-структурна стабільність; лопатка турбіни; керамічна форма; зв'язувальний компонент; електрокорунд; міцність на вигин; керамічний фільтр; ливарне виробництво; розплав; виливок; міцність; модифікування; етилсилікат; структура.

## ABSTRACT

*Kvasnytska K.H.* Development of Technologies for Obtaining Complex-Shaped Castings for Gas Turbine Engine Components. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 136 Metallurgy (13 "Mechanical Engineering"). – Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the development of technological processes for manufacturing ceramic shell molds using single-use patterns obtained by 3D printing for casting complex-shaped components.

An analysis of modern investment casting technologies for producing castings from heat-resistant nickel-based alloys intended for gas turbine engine blades has been conducted. Based on a review of literature sources and subsequent comparative evaluation of the properties of ceramic materials, the feasibility of their application for ensuring the required strength characteristics of ceramic shell molds designed for the casting of heat-resistant alloys has been assessed.

The compositions of ceramic slurries containing various components and binding agents have been investigated. An analysis of modern investment casting technologies for heat-resistant nickel alloy castings intended for gas turbine engine blades has been carried out. Based on a review of the literature and subsequent comparative assessment of the properties of ceramic materials, the feasibility of their application to provide the necessary strength characteristics of ceramic shell molds for casting heat-resistant alloys has been analyzed.

The compositions of ceramic slurries with various components and binding agents have been investigated.

To explain the increased strength parameters of ceramics with water-based binders, the mechanisms of refractory particle bonding have been studied. During the drying of a ceramic shell mold containing water-based binders, water is removed, and the sol transitions into a gel state. This process reduces the distances between the particles and forms long-range bonds. Consequently, silica bonds the filler particles and subsequently forms an amorphous silica matrix.

As a result of studying the properties of water-based ceramic slurries with fillers such as electrocorundum, quartz, and kyanite-sillimanite, it was found that for uniform coating of patterns, a higher quantity of refractory filler is required compared to slurries based on ethyl silicate (ES). These mixtures demonstrated satisfactory coating capability due to the presence of special additives, unlike slurries containing colloidal silica.

It was established that the flexural strength of ceramics produced with water-based binders exceeds that of ES-based ceramics. Electrocorundum-based materials with water binders exhibited flexural strength 2.5–3.5 times higher in the green state and 3.5–5.0 times higher after firing. For ceramics with kyanite-sillimanite filler and binders such as Remasol Premium Plus and colloidal silica, the flexural strength in the green state reached 3.8–7.1 MPa and 5.1–8.1 MPa, respectively — twice as high as for ES-based ceramics. After firing, their strength increased to 6.4–11.1 MPa and 6.6–10.0 MPa.

It was determined that materials based on electrocorundum, kyanite-sillimanite, and Remasol Premium Plus possess tensile strength in the green state exceeding 3.0 MPa — approximately twice that of their ES-based counterparts. After firing, their strength similarly doubled.

Differences in gas permeability were identified among the experimental ceramic materials, which were significantly influenced by the shape, size, and packing characteristics of the refractory component particles. It was found that ceramic materials based on ethyl silicate exhibited very low gas permeability due to their dense packing. In contrast, corundum-based materials produced using water-based binders and spherical  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles demonstrated twice the gas permeability. Quartz ceramics with water-based binders showed 1.8 and 1.4 times higher permeability than ES-based materials. Materials produced from kyanite-sillimanite and water binders exhibited values exceeding 10 units, whereas similar ceramics on ES had values below 2 units. This is attributed to the transformation of  $\alpha$ -quartz into  $\alpha$ -cristobalite via  $\alpha$ -tridymite, which involves a significant structural rearrangement accompanied by a 15% increase in unit cell volume and corresponding density reduction.



For testing ceramic molds with water-based binders, a heat-resistant alloy and equipment for melting complex-profile castings intended for gas turbine engine blades were substantiated and selected.

It was established that ceramic shell molds based on corundum filler and manufactured using water-based binders did not interact with heat-resistant melts within the temperature range from melting point (1450 °C) to 1600 °C. This ensured high surface cleanliness of the castings, thus reducing the occurrence of casting defects caused by surface contamination.

The conducted research demonstrated that water-based binders can be recommended for implementation at Ukrainian foundry enterprises as a replacement for ethyl silicate, eliminating fire hazards and improving environmental safety in production.

For the production of models for small-batch manufacturing of complex-profile heat-resistant nickel alloy castings produced via investment casting, polylactic acid (PLA) material was selected for 3D printing, considering dimensional accuracy, ash content, linear thermal expansion coefficient (CTE), shrinkage, and cost. Polylactic acid (PLA) is a biopolymer derived from renewable plant resources, particularly corn and sugar beets. The material is fully biodegradable, environmentally safe, and non-toxic. During heating, it emits a characteristic semi-sweet odor, which, along with its safety, makes PLA suitable for use in enclosed spaces. Its high dimensional stability and low deformation during printing facilitate precise reproduction of models and ensure high resolution. These characteristics allow for the fabrication of geometrically complex models, an advantage over materials such as ABS.

Experimental studies on the shrinkage of plastic models during storage prior to ceramic shell mold production were conducted. The results showed that the maximum dimensional deviation was approximately 0.4%. The use of PLA models is environmentally safe and shortens the production cycle for ceramic shell molds.

Experimental testing of ceramic molds produced with water-based binders confirmed that castings from heat-resistant nickel alloys featured satisfactory surface quality and were free from chemical contamination.

To assess the performance of new ceramic shell molds, a complete technological cycle was performed for producing samples and working blades for the second stage of a high-pressure turbine of a gas turbine engine, using directional solidification of a heat- and corrosion-resistant alloy CM88. Experimental melting was performed using a vertical VIM-25-175C casting system. The macro- and microstructure of the samples were examined, and their mechanical properties, long-term strength, fatigue resistance, and corrosion resistance were evaluated.

Technical recommendations were developed for the manufacturing of gas turbine engine blades using plastic models and ceramic slurries with water-based binders by 3D printing. This resulted in the development and justification of a technological process for producing castings from corrosion-resistant alloys with improved product quality, reduced production time, and minimized environmental impact for small-batch production (GTE repair and development of next-generation GTEs). The proposed technology for manufacturing ceramic shell molds using water-based binders and PLA models produced via 3D printing for casting complex-profile heat-resistant alloy components does not require specialized drying conditions and is environmentally friendly.

The theoretical and experimental research findings obtained during this study were validated at SE SRTC “Zorya-Mashproekt” (as confirmed by the industrial test report dated 18.09.2023) and can be implemented at domestic enterprises in the gas turbine engine manufacturing sector.

**Keywords:** heat-resistant corrosion-resistant alloy; phase-structural stability; turbine blade; ceramic mold; binder component; electrocorundum; flexural strength; ceramic filter; foundry production; melt; casting; strength; modification; ethyl silicate; structure.

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати  
дисертації**

***Статті у закордонних наукових періодичних виданнях, що включені  
в міжнародні наукометричні бази даних «Scopus»:***

1. Balitskii, A.I.; Kvasnytska, Y.H.; Ivaskevych, L.M.; **Kvasnytska, K.H.**; Balitskii, O.A.; Miskiewicz, R.M.; Noha, V.O.; Parkhomchuk, Z.V.; Veis, V.I.; Dowejko, J.M. Improvement of Hydrogen-Resistant Gas Turbine Engine Blades: Single-Crystal Superalloy Manufacturing Technology *Materials* 2024, 17, 4265. <https://doi.org/10.3390/ma17174265> (Scopus, Q1)
2. Alexander I. Balitskii, Yuliia H. Kvasnytska, Lyubomir M. Ivaskevych, **Kateryna H. Kvasnytska**, Olexiy A. Balitskii, Inna A. Shalevska, Oleg Y. Shynskii, Jaroslaw M. Jaworski, Jakub M. Dowejko Hydrogen and Corrosion Resistance of Nickel Superalloys for Gas Turbines, Engines Cooled Blades *Energies* 2023 EISSN 1996-1073, Published by MDPI 16(3),1154. <https://doi.org/10.3390/en16031154> (Scopus, Q2).
3. O.I. Balitskii, Yu.H. Kvasnytska, L.M. Ivaskevych, H.P. Mialnitsa, **K.H. Kvasnytska** Fatigue refractory of the blades of gas-turbine engines made of a new refractory nickel alloy *Materials Science*, Vol. 57, No. 4, January, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00568-z>
4. Yu.H. Kvasnytska, L.M. Ivaskevych, A.I. Balitskii, K.H. Kvasnytska, H.P. Mialnitsa Structural and mechanical properties of the nickel alloy of gas-turbine engine blades *Materials Science*, Vol. 57, No. 5, March, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00596-9>
5. Lyubomir Ivaskevich, Alexander Balitskii, Iuliia Kvasnytska, **Kateryna Kvasnytska**, Heorhiy Myalnitsa Thermal Stability, Cyclic Durability and Hydrogen Resistance of Cast Nickel-Cobalt Alloys for Gas Turbine Blades *CAMPE 2021: Advances in Mechanical and Power Engineering*, pp 147–155. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_15)
6. S. Ye. Kondratyuk, V. I. Veis, Z. V. Parkhomchuk, Y. H. Kvasnytska, **K. H. Kvasnytska** Thermokinetic Parameters of Solidification and Gradient Structure

of Steel Castings Metallophysics and Advanced Technologies 2023, vol. 45, No. 7, pp. 865–872

<https://doi.org/10.15407/mfint.45.07.0865>

7. Y. H. Kvasnytska, I. A. Shalevska, A. I. Balitskii, L. M. Ivaskevich, I. I. Maksuta, **K. H. Kvasnytska** Influence of Refractory Elements on Phase–Structural Stability of Heat-Resistant Corrosion-Resistant Alloys for Gas Turbine Blades Metallophysics and Advanced Technologies 2023, vol. 45, No. 8, pp. 975–992, <https://doi.org/10.15407/mfint.45.08.0975>

8. Yu. H. Kvasnytska, L. M. Ivaskevych, A. I. Balitskii, H. P. Mialnitsa, **K. H. Kvasnytska** Evaluation of the endurance limit of cooled blades of gas-turbine engines made of heat-resistant nickel alloy *Materials Science*, Vol. 59, No. 3, November, 2023.

<https://doi.org/10.1007/s11003-024-00783-w>

9. **K.H. Kvasnytska**, Y.H. Kvasnytska, Z.V. Parkhomchuk, V.O. Noha, V.I. Veis & P.B. Kaliuzhnyi Features of the formation of a directional structure of complex-profile castings. Proceedings of the VIIth International Conference on Welding and Related Technologies (WRT 2024, 7-10 October 2024, Yaremche, Ukraine), pp. 34-37.

<https://doi.org/10.1201/9781003518518-7>

### *Статті у журналах, що включені до переліку фахових видань*

#### *України:*

10. Квасницька Ю.Г., Максютя І.І., Шалевська І.А., **Квасницька К.Г.**, Нога В.О. Застосування керамічних фільтрів при виплавці заготовок з жароміцних сплавів // Процеси лиття. – 2023. – № 2 (152). – С. 41–48.

<https://doi.org/10.15407/plit2023.02.041>

11. Ю.Г. Квасницька, Г.П. Мяльніца, **К.Г. Квасницька**, І.І. Максютя, В.О. Нога Дослідження структурних особливостей жароміцного нікелевого сплаву для лопаток газотурбінного двигуна // Сучасна електрометалургія. – 2023. – № 2. – С. 41–45.

<https://doi.org/10.37434/sem2023.02.06>

12. П.Б. Калюжний, **К.Г. Квасницька**, О.В. Нейма, О.В. Михнян Р.В. Лютий Вивчення властивостей керамічних ливарних форм і суспензій зі зв'язувальними компонентами на водній основі // Процеси лиття. – 2024. – № 3 (157). – С. 28–35.

<https://doi.org/10.15407/plit2024.03.028>

13. **К.Г. Квасницька** Шляхи усунення недоліків технології лиття деталей газотурбінних двигунів // Процеси лиття. – 2025. – № 1 (159). – С. 22–33.

<https://doi.org/10.15407/plit2025.01.022>

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

14. Іваськевич Л.М., Балицький О.І., Квасницька Ю.Г., **Квасницька К.Г.**, Мяльниця Г.П. Термостійкість, циклічна довговічність і воднева стійкість литих нікель-кобальтових сплавів для лопаток газових турбін // Матеріали Міжнародної наукової он-лайн конференції SAMPE-2021 (18-20 жовтня 2021 р., м. Харків).

15. Шинський О.Й., Квасницька Ю.Г., Максюта І.І., Михнян О.В., **Квасницька К.Г.** Особливості стабілізації фазово-структурних характеристик сучасних вітчизняних жароміцних сплавів для деталей ГТД подовженого ресурсу роботи // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції ЛИТВО 2022, XI Міжнародної науково-практичної конференції МЕТАЛУРГІЯ 2022 (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ) – С. 146-148

16. Шинський О.Й., Квасницька Ю.Г., Максюта І.І., Михнян О.В., **Квасницька К.Г.** Використання методів зниження забруднення фосфором розплавів жароміцних сплавів // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції ЛИТВО 2022, XI Міжнародної науково-практичної конференції МЕТАЛУРГІЯ 2022 (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ) – С. 148-150

17. Шинський О.Й., Квасницька Ю.Г., Максюта І.І., Михнян О.В., **Квасницька К.Г.** Оцінка структурної стабільності і оптимізація системи легування методом PHASOMP // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції ЛИТВО 2022, XI Міжнародної науково-практичної

конференції МЕТАЛУРГІЯ 2022 (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ) – С. 151-153

18. Квасницька Ю.Г., Шинський О.Й., Максюта І.І., **Квасницька К.Г.** Дослідження структурно-фазової стабільності жароміцних корозійностійких сплавів для робочих лопаток ГТД // Збірка матеріалів XV Міжнародної науково-технічної конференції «Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (08-09 листопада 2022р., м. Запоріжжя) – С. 86-90.

19. О.В. Нейма, В.С. Дорошенко, **К.Г. Квасницька** Аналіз 3D-друку моделей для вибору пластика, що газифікується // Міжнародна Наукова Конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 12» (15 – 16 грудня 2022р., м. Київ) – С. 91-92.

20. **Квасницька К.Г.** Шляхи вдосконалення технології одержання складнопрофільних деталей за моделями, що витоплюються // Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (23-24 лютого 2023р., НУБіП України, м. Київ) – С.269-370.

21. **Kvasnytska K.H.** Ways of improving the technology of obtaining complex-profile parts based on melted models // Збірник тез доповідей XXII міжнародної онлайн-конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: конструювання та дизайн» (19-20 квітня 2023 року) – С. 15-17.

22. Квасницька Ю.Г., Максюта І.І., Михнян О.В., Нейма О.В., **Квасницька К.Г.** Умови ефективного видалення кремнію та сірки з розплавів жароміцних сплавів при вакуумно-індукційному плавленні // Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (27-28 квітня 2023 року) – С.158-164.

23. **Kvasnytska K.H.** Methods of improving the technology for obtaining complex-profile parts based on melted models // Матеріали IX науково-

практичної конференції молодих вчених України «Металеві матеріали, їх виробництво та перспективи застосування в сучасній промисловості» (18 травня 2023 року) – С. 27-29.

24. Максютя І.І., Михнян О.В., Нейма О.В., **Квасницька К.Г.**, Нога В.О. Коригування ступеня засміченості спрямовано закристалізованих виливків жароміцних сплавів при використанні фільтрації // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» (25-27 вересня 2023 року) – С. 83-84.

25. Калюжний П.Б., **Квасницька К.Г.**, Нейма О.В. Переваги використання водних зв'язувальних компонентів для виготовлення керамічних форм // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» (25-27 вересня 2023 року) – С. 56-58.

26. Ю.Г. Квасницька, І.І. Максютя, О.В. Михнян, О.В. Нейма, **К.Г. Квасницька** Механізм нейтралізації лужних металів при отриманні високоточних деталей із жароміцних сплавів // Матеріали ХІХ міжнародної науково-практичної конференції «Литво 2023» (10-12 жовтня 2023 року) – С. 102-104.

27. **К.Г. Квасницька** Визначення технологічних властивостей вогнетривких суспензій на основі різних видів зв'язувальних компонентів // ХІ Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 117-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (22-23 лютого 2024р., НУБіП України, м. Київ)

28. **К. Г. Квасницька**, П. Б. Калюжний, О. В. Нейма, О. В. Михнян, В. О. Нога Методи визначення технологічних властивостей керамічних форм // Матеріали ХХ ювілейної міжнародної науково-практичної конференції Литво 2024 ХІІІ міжнародної науково-практичної конференції Металургія 2024 (28-30 травня 2024р., Україна, Київ-Харків) – С.131-135

## ЗМІСТ

<b>АНОТАЦІЯ</b>	2
<b>ЗМІСТ</b>	16
<b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК.....</b>	19
<b>ВСТУП.....</b>	20
<b>1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГІЙ ЛИТТЯ ВИЛИВКІВ З ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ЛОПАТОК ГТД</b>	29
1.1 Аналіз сучасних технологічних схем виробництва та якості лопаток ГТД в Україні.....	29
1.2 Вогнетривкі матеріали керамічних ливарних форм .....	32
1.3 Зв’язувальні компоненти для виготовлення керамічних форм... ..	35
1.4 Модельні матеріали для точного лиття .....	39
1.5 Вимоги до керамічних форм для лиття деталей ГТД , технологічні властивості суспензій та керамічних оболонок.....	41
1.6 Мета та задачі роботи.....	43
<b>2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ</b>	45
2.1 Методика досліджень визначення властивостей керамічних оболонкових форм.....	45
2.2 Вибір вогнетривких матеріалів і зв’язувальних компонентів для виготовлення керамічних форм.....	51
2.3 Процес виготовлення керамічних форм з водними зв’язувальними компонентами .....	55
2.4 Обладнання для виготовлення полімерних моделей та видалення їх із керамічних оболонок .....	57
2.5 Методика досліджень для визначення властивостей матеріалу моделі, що виготовляється 3D-друком .....	58



2.6	Установка та методика для вимірювання міжфазних властивостей високотемпературних розплавів з вогнетривкою керамікою ливарних форм методом лежачої краплі.....	60
2.7	Матеріали і обладнання для плавлення складнопрофільних виливків.....	63
2.8	Методика досліджень макро- та мікроструктури, структурно-фазового стану дослідних зразків зі спрямованою структурою.....	66
2.9	Методика визначення механічних та спеціальних властивостей зразків жароміцних сплавів зі спрямованою структурою .....	67
<b>3</b>	<b>РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ ФОРМ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ</b>	<b>71</b>
3.1.	Визначення технологічних властивостей керамічних суспензій...	71
3.2	Визначення властивостей керамічних оболонок.....	73
3.3	Порівняння механізмів сполучення частинок вогнетриву.....	84
3.4	Вибір пластика для 3D - друку моделей керамічних оболонкових форм.....	86
3.5	Міжфазна взаємодія в системі вогнетривкий матеріал форми – жароміцний сплав .....	90
3.6	Висновки за 3 розділом.....	93
<b>4</b>	<b>РОЗРОБЛЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО ЕКОЛОГІЧНОБЕЗПЕЧНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОДЕРЖАННЯ ЛОПАТОК ТУРБИНИ ГТД ІЗ ЖАРОМІЦНИХ КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ СПЛАВІВ НА НІКЕЛЕВІЙ ОСНОВІ</b>	<b>96</b>
4.1	Розроблення технологічного процесу виготовлення керамічної форми з використанням екологічно безпечних сполучних матеріалів для лиття лопаток ГТД.....	96
4.2	Дослідження макро-мікроструктури зразків жароміцного сплаву	

	18
СМ88, одержаних методом спрямованого твердіння .....	102
4.3 Дослідження глибини приповерхневого зміненого шару литих зразків з жароміцного сплаву.....	105
4.4 Дослідження фізико-механічних властивостей.....	109
4.5. Оцінка меж витривалості робочих лопаток ГТД з жароміцного корозійностійкого сплаву на нікелевій основі .....	111
4.6 Визначення стійкості зразків жароміцного сплаву до високотемпературної корозії.....	113
Висновки до розділу 4.....	115
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>117</b>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>119</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	<b>132</b>

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

ГТД – газотурбінний двигун

ЛВМ – лиття за моделями, що витоплюються

ЗК – зв’язувальний компонент

КО – керамічна оболонка

ЕТС – етилсилікат

ЧПК – чисельне програмне керування

КТЛР – коефіцієнт термічного лінійного розширення

МС – модельна суміш

FDM – технологія 3D друку, в якій виготовлення виробу відбувається нанесенням шар за шаром розплавленого пластику

PLA – полілактид, пластик для 3D друку

HIPS – ударостійкий полістирол, що використовується для 3D друку

$\sigma_{\text{виг}}$ , Н/м<sup>2</sup> – межа міцності кераміки за статичного вигину

## ВСТУП

З розвитком української промисловості газотурбобудування все більше удосконалюються конструкції газотурбінних двигунів і установок. Однак, це призводить до ускладнення конструкцій лопаток, які є важливою складовою частиною цих систем. Унаслідок цього, виробництво цих лопаток стає складнішим і вимагає більше зусиль. Задача полягає в покращенні ефективності процесів виробництва литих лопаток та забезпеченні високої якості виробів.

Аналіз наукових робіт показав, що основна увага приділена технології одержання лопаток газотурбінних двигунів з нових сплавів. Проте керамічні ливарні форми отримують недостатньо уваги, хоча вони мають значний вплив на властивості, геометрію і якість виготовлених лопаток.

Кераміка оболонкових форм зазвичай складається з вогнетривкого наповнювача та зв'язувального компоненту (ЗК), основна роль якого полягає в забезпеченні достатньої міцності керамічної форми в сирому та спеченому стані. В якості зв'язувальних компонентів для керамічних форм на українських підприємствах використовують етилсилікати, в яких є використання легких (летучих) розчинників (спирту, ацетону) та необхідність аміачного середовища. Дослідження властивостей керамічних форм з водними зв'язувальними компонентами наразі носять фрагментарний характер, а жодна з організацій ливарного профілю в Україні системно й комплексно не займається створенням технологічних засад та їх реалізацією щодо екологічних процесів одержання керамічних форм з високою розмірною точністю.

Незважаючи на довготривалий досвід українських турбобудівних підприємств, виробництво литих лопаток є недосконалим, і відсоток браку є досить високим. Крім внутрішніх дефектів, на всіх поверхнях виливків не допускаються тріщини, засмічення, недоливи, наскрізні дефекти, плени, спаї, дефекти поперек пера та крайок лопатки. Вони виникають на етапі отримання керамічних форм через недосконалість використовуваних модельних мас та формувальних матеріалів. Внаслідок цього підприємства зазнають великих

виробничих втрат, тому розробка заходів для зменшення відсотку браку стає актуальною та необхідною. В зв'язку з цим необхідно розробити такі заходи, які спроможні вирішити дані проблеми. Всебічне дослідження та впровадження нових модельних мас, формувальних матеріалів, аналіз і вдосконалення процесів формування керамічних форм, а також покращення екологічного стану навколишнього середовища є одним із основних напрямків її вирішення.

Сучасні світові технології ливарного виробництва використовують 3D-друк моделей для виготовлення виливків в різних галузях промисловості, що дозволяє скоротити технологічний цикл і дає можливість виготовляти деталі з високою точністю. Тому розроблення технологічних процесів виготовлення керамічних оболонкових форм, саме для одержання лопаток ГТД, з використанням водних зв'язувальних компонентів за разовими моделями, що одержані за допомогою 3D-друку, є задачею, яка наразі потребує вирішення.

В технології лиття за моделями, що витоплюються (ЛВМ), одним із найскладніших етапів є виготовлення керамічних ливарних форм, якість яких значно впливає на властивості та якість виливків. Однак, за малої серійності його застосування є недоцільним через високу вартість оснащення для виготовлення моделей. Крім того воскові моделі не бажано застосовувати при точному литті, особливо для деталей з тонкою геометрією, які легко руйнуються або деформуються при обробці або зануренні у вогнетривку суспензію. Тому **актуальною** є розробка нових рішень, які б дозволяли зменшити виробничі витрати та підвищити ресурсоефективність технології ЛВМ.

**Мета роботи:** створення екологічно безпечної технології отримання керамічних форм для виробництва виливків з жароміцних сплавів на основі нікелю для лопаток ГТД нового покоління.

**Об'єктом досліджень** є керамічні оболонкові форми для виготовлення складнопрофільних деталей газотурбінних двигунів.

**Предмет досліджень** – технологічний процес виготовлення і дослідження властивостей керамічних оболонкових форм для лиття за моделями, що витоплюються.

Для досягнення мети у роботі поставлені задачі:

1. Провести аналіз властивостей керамічних оболонкових форм, визначити раціональні склади, які дозволять підвищити міцність виробів з неї.
2. Дослідити технологічні властивості водних суспензій електрокорунду, кварцу та дистен-силіманіту та виготовлення керамік з них.
3. Вибрати матеріал моделі для виготовлення 3D-друком керамічних оболонкових форм.
4. Вдосконалити технологію одержання керамічних оболонкових форм з використанням ЗК на водній основі за моделями на основі полімерів.
5. Визначити ступінь взаємодії жароміцного розплаву з матеріалом керамічної оболонкової форми, одержаної за вдосконаленою технологією.
6. Провести дослідно-промислову перевірку результатів досліджень на виробництві.

**Наукова новизна** роботи полягає в наступному:

1. Вперше розроблено технологію виготовлення керамічних оболонкових форм зі зв'язувальними компонентами на водній основі для лиття складнопрофільних виливків із жароміцних сплавів за полілактидними моделями методом 3D-друку. Розроблена технологія не потребує спеціальних умов сушіння та є екологічно безпечною.
2. Встановлено відмінність у міцності зразків керамічних оболонкових форм: кераміка на водних зв'язувальних компонентах з вогнетривким наповнювачем корундом має удвічі вищу міцність порівняно з аналогами на основі гідролізованого етилсилікату.
3. Вперше встановлено відмінність у газопроникності дослідної кераміки, яка суттєво залежить від форми, розмірів і характеру упаковки сферичних частинок вогнетривких компонентів. Різниця полягає в тому, що газопроникність кераміки, виготовленої з використанням водних

зв'язувальних компонентів, на 20% вища порівняно з аналогічною керамікою на основі гідролізованого етилсилікату. Це пояснюється тем, що при перетворенні  $\alpha$ -кварцу в  $\alpha$ -кристоболіт через  $\alpha$ -тридиміт протікає глибока структурна перебудова, яка супроводжується значним збільшенням елементарної комірки. При цьому об'єм матеріалу збільшується на 15 % і відповідно проходить зменшення щільності.

4. Встановлено, що керамічні оболонкові форми на основі корунду з використанням водних зв'язувальних компонентів в інтервалі температур від температури плавлення ( $1450^{\circ}\text{C}$ ) до  $1600^{\circ}\text{C}$  не взаємодіють з жароміцними розплавами. Це дозволяє мати високу чистоту поверхні у виливках, що сприяє зменшенню браку лопаток газотурбінних двигунів за пригаром.

5. Уперше розроблено моделі на основі полілактиду 3D-друком, призначені для виготовлення керамічних оболонкових форм з метою отримання виливків деталей газотурбінних двигунів. Експериментально визначено, що такі моделі мають мінімальну усадку  $\sim 0,4\%$ , екологічнобезпечні та їх використання сприяє скороченню робочого циклу.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Результати проведених досліджень були використані при розробці технологічних рекомендацій з удосконалення виготовлення керамічних оболонкових форм для одержання складнопрофільних деталей ГТД. При виконанні роботи запропоновано використання ЗК на водній основі замість етилсилікату для виготовлення керамічних форм, досліджено їх взаємодії з рідким металом. Розроблено технічні рекомендації щодо використання 3D моделей з екологічного пластику для виготовлення керамічних оболонкових форм для малосерійного виробництва лопаток ГТД.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, які були отримані в процесі виконання роботи перевірено на ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» (Акт дослідно-промислової перевірки від 18.09.2023 р. додається), а також можуть бути застосовані на вітчизняних підприємствах газотурбобудування.

**Особистий внесок здобувача** полягає в узагальненні результатів металографічних досліджень, створенні методики і проведенні досліджень керамічних суспензій з наповнювачами, розробці технологічного процесу одержання керамічних оболонкових форм для лиття робочих лопаток турбіни ГТД з використанням керамічних сумішей на основі водних зв'язувальних компонентів з метою підвищення якості виробів, скорочення часу деяких стадій технології та збереження навколишнього середовища.

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях та симпозіумах:

- Міжнародна конференція «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні - PolyWeld-2021» (27-28 травня 2021 р., м. Київ);
- Міжнародна наукова он-лайн конференція CAMPE-2021 (18-20 жовтня 2021 р., м. Харків);
- XVIII Міжнародна науково-практична конференція ЛИТВО 2022 XI Міжнародна науково-практична конференція МЕТАЛУРГІЯ 2022 (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ);
- XV Міжнародна науково-технічна конференція «Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (08-09 листопада 2022р., м. Запоріжжя);
- Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 12» (15 – 16 грудня 2022р., м. Київ);
- X Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (23-24 лютого 2023р., НУБіП України, м. Київ) – С.269-370;
- XXII Міжнародна онлайн-конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем



природокористування: конструювання та дизайн» (19-20 квітня 2023 року) – С. 15-17;

- XV Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (27-28 квітня 2023 року);
- IX науково-практична конференція молодих вчених України «Металеві матеріали, їх виробництво та перспективи застосування в сучасній промисловості» (18 травня 2023 року);
- IX міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» (25-27 вересня 2023 року);
- XIX міжнародна науково-практична конференція «Литво 2023» (10-12 жовтня 2023 року) – С. 102-104;
- XI Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 117-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (22-23 лютого 2024р., НУБіП України, м. Київ);
- XX ювілейна міжнародної науково-практичної конференції «Литво 2024» XIII міжнародної науково-практичної конференції «Металургія 2024», с. 131-135 (28-30 травня 2024р., Україна, Київ-Харків);
- VIIth International Conference on Welding and Related Technologies (WRT 2024, 7-10 October 2024, Yaremche, Ukraine).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами підтверджує її актуальність.** Дисертаційну роботу виконано в Фізико-технологічному інституті металів і сплавів НАН України в рамках науково-дослідної роботи згідно тем:

№: III-34-21-706 «Наукові та технологічні засади процесів одержання функціональних литих та композиційних виробів із багатокомпонентних сплавів з використанням полімерних моделей, що видаляються» (Постанова бюро ВФТПМ НАН України від 22.09.2020 №10, № державної реєстрації 0121U108734);

№: III-40-22-719 «Розроблення новітніх технологій для одержання захисних модулів багатофункціонального призначення» (Постанова бюро ВМ НАН України від 28.09.2021 №15, № державної реєстрації 0122U000662);

№: III-49-24-730 «Розроблення науково-обґрунтованих інноваційних технологічних процесів одержання литих виробів з використанням полімерних моделей» (Постанова бюро ВМ НАН України від 14.11.2023 №18, № державної реєстрації 0124U000578);

Наукового проєкту «Ефективні процеси виготовлення керамічних форм при малосерійному виробництві складнопрофільних литих деталей» (договір від 03.07.2023 №43-06/11-2023, № державної реєстрації 0123U102997).

### **Публікації.**

За темою дисертаційної роботи опубліковано 28 робіт, з них 9 у виданнях, включених або реферованих в міжнародних наукометричних базах даних «Scopus», 4 статей у фахових виданнях України, одна стаття одноосібна, 15 публікацій в матеріалах конференцій.

### **Структура і обсяг роботи.**

Дисертаційна робота містить вступ, 4 розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи – 140 сторінок машинописного тексту, в тому числі 50 рисунків, 15 таблиць і список використаних джерел зі 108 найменуваннями.

У **вступі** підкреслено актуальність дисертаційного дослідження, сформульовано основну мету та визначено ключові завдання. Детально охарактеризовано об'єкт, предмет і методи дослідження, а також розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Представлено інформацію про апробацію роботи, кількість опублікованих матеріалів із зазначенням внеску автора. Окремо наведено дані щодо структури та загального обсягу дисертації.

У **першому розділі** проаналізовано сучасні технології лиття виливків з жароміцних нікелевих сплавів для лопаток ГТД. На основі огляду літературних джерел та подальшого порівняння властивостей керамічних матеріалів проведено аналіз прийнятності їх використання для забезпечення

міцнісних властивостей оболонкових форм для плавки жароміцних сплавів. Технологічні методи підвищення властивостей формувальних композицій практично вичерпали себе. Одержання якісно нових властивостей керамічних форм може досягатися в тому числі за рахунок використання екологічнобезпечних ЗК. Проведено аналіз технології одержання ливарних форм для одержання виливків з жароміцних сплавів. Зазначено та проаналізовано методи забезпечення базових функціональних властивостей керамічних оболонкових форм та їх складових та сформульовані мета і задачі роботи.

**У другому розділі** обґрунтовано вибір матеріалів для виготовлення ливарних форм, дана характеристика цих матеріалів та жароміцних сплавів, застосовуваних для досліджень. Приведена методика досліджень визначення властивостей керамічних оболонкових форм та її складових, а саме міцності, просушеності, газопроникності форми, в'язкості та седиментаційної стійкості суспензії. Ретельно описано технологічний процес виготовлення керамічних форм з різними зв'язувальними компонентами. Також дано перелік обладнання для виготовлення полімерних моделей та видалення їх із керамічних оболонок. Розроблена методика досліджень впливу зовнішніх факторів на усадку, розширення і ступінь полімеризації разових моделей із полілактиду. Дано опис досліджень міжфазної взаємодії керамічна форма – жароміцний розплав, а саме, методики для дослідження поверхневих властивостей методом лежачої краплі.

Для перевірки керамічних форм на водному ЗК визначені жароміцний сплав та установка для плавлення складнопрофільних виливків. Приведено перелік і опис експериментальних досліджень, які забезпечують комплексний підхід до вивчення поставлених задач і дозволяють одержати експериментальні дані та висновки з високим ступенем вірогідності.

**У третьому розділі** представлені результати експериментальних досліджень властивостей керамічних оболонкових форм на основі електрокорунду, плавленого кварцу, дистенсиліманіту з ГРЕС та водними ЗК. Визначені технологічні властивості дослідних керамічних суспензій.

Проведено порівняльний аналіз порівняння механізмів сполучення частинок вогнетриву та вибір пластику моделі для 3-D друку. Також проведені дослідження міжфазної взаємодії зразків керамічних оболонкових форм на основі корунду з різними в'язучими та жароміцним розплавом. Зроблено висновки за результатами проведених досліджень.

**Четвертий розділ** присвячений дослідній перевірці керамічних оболонкових форм, отриманих за новою технологією для лиття лопаток ГТД. Розроблено технологічний процес одержання оболонкових форм на основі корунду з водним ЗК з використанням пластикової моделі, отриманої 3-D друком.

З метою перевірки нових керамічних оболонкових форм проведено повний комплекс робочого циклу одержання зразків і робочих лопаток II ступеню турбіни високого тиску ГТД методом СК з жароміцного корозійностійкого сплаву СМ88. Дослідна плавка виконувалась на ливарному агрегаті VIM-25-175С вертикального типу. Вивчено макро- і мікроструктуру дослідних зразків. Визначені механічні властивості, тривала і втомна міцність та корозійні властивості одержаних зразків.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЛИТТЯ ВИЛИВКІВ З ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ЛОПАТОК ГТД

#### 1.1 Аналіз сучасних технологічних схем виробництва та якості лопаток ГТД в Україні.

Найбільш критичними елементами високотемпературних турбін у сучасному газотурбобудуванні є робочі та направляючі лопатки. Для їх виготовлення використовують жароміцні сплави на основі нікелю, застосовуючи метод точного лиття за моделями, що витоплюються. Для лиття робочих лопаток ГТД застосовують вакуумні плавильні установки з підігрівом форм різних типів [1].

Виготовлення таких складних елементів газотурбінного двигуна, як робочі лопатки, є важким технологічним процесом через їх складну геометрію. Необхідно контролювати багато критичних поверхонь та досягати високої точності геометричних параметрів деталей. Крім того, хвилястість поверхні (відбитки форми у вигляді звивистих ліній, смужок та ділянок неправильної форми) не більше 0,1 мм дефектом не вважається [2]. Основними чинниками якості таких складнопрофільних деталей є точне налаштування технологічного процесу виплавлення лопаток і підбір керамічних матеріалів для форм, стрижнів і фільтрів, які б забезпечили отримання виливків високої геометричної точності.

Слід зазначити, що вогнетривкі матеріали для отримання лопаток з орієнтованою (спрямованою або монокристалічною) структурою повинні витримувати значно більш тривалий контакт з розплавом перегрітого металу порівняно з виробами, призначеними для деталей з полікристалічною рівноосною структурою (рис.1.1).

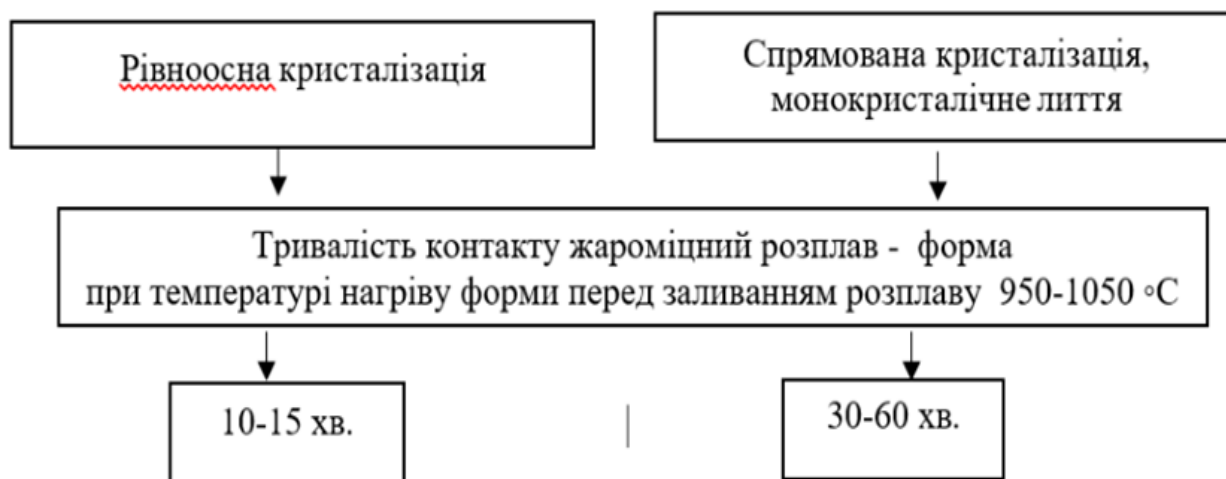


Рис. 1.1 – Схема порівняння контакту жароміцний розплав-форма в залежності від способу кристалізації [1]

Умовами одержання високоякісної кінцевої продукції – виливків жароміцних сплавів для складнопрофільних деталей є не тільки якісно виплавлений сплав, але і якісна ливарна форма, в яку він заливається. При цьому властивості форми повинні враховувати властивості жароміцних сплавів, для якої її використовують. Ливарна форма не повинна хімічно взаємодіяти з рідким сплавом, змінюватися в об'ємі під час виготовлення. [2].

На вітчизняних підприємствах-виробниках газотурбінних двигунів виготовлення керамічних оболонкових форм виконують наступним чином. Для виконання шарів керамічної форми на модельні блоки, що виготовлено за схемою (рис.1.2) наносять вогнетривкі суспензії, використовуючи спиртовий розчин ГрЕТС марки ЕТС-40. Пилоподібний наповнювач вогнетривкої суспензії – дистенсиліманіт або електрокорунд білий. Для поверхневого модифікування виливків із жароміцних нікелевих сплавів у вогнетривку суспензію лицьового шару вводять 2...7 % (за масою) порошкоподібного алюмінату кобальту. Для обсіпання шарів модельних блоків використовують крупнозернисті фракції електрокорунду білого або крихту високоглиноземистого шамоту.

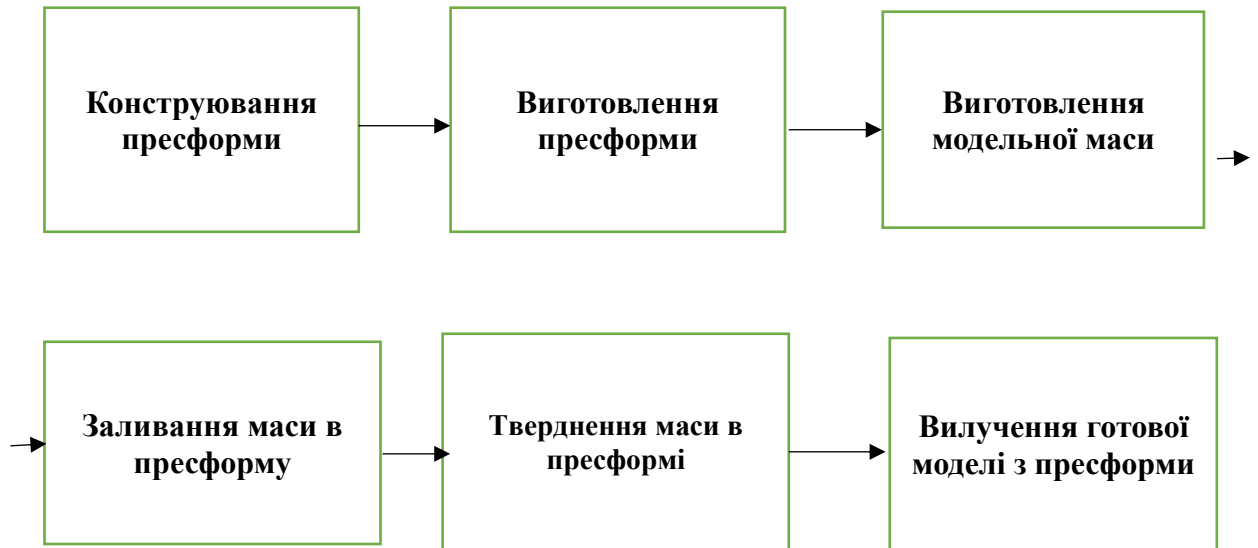


Рис. 1.2 – Схема виготовлення воскової моделі

Сушіння покриття на модельних блоках здійснюють у вакуумі, вакуумно-аміачному або повітряно-аміачному газовому середовищі або на повітрі. Після сушіння на модельному блоці останнього шару вогнетривкого покриття його витримують на повітрі протягом доби і в бойлерклаві проводять виплавлення з нього воскової моделі. Отримані керамічні форми готують під заливку, яка включає їх нагрівання і прожарювання при температурі 950 ... 1050 °C протягом 2 ... 5 год., вакуумують та заливають металом. В деяких випадках великогабаритні керамічні оболонкові форми піддають подвійному прожарюванню. Тобто форми прожарюють при температурі 760°C або 960 °C, охолоджують, промивають водою, просушують, повторно нагрівають до 950... 980°C і встановлюють в електрообігріваний муфель вакуумної плавильно-заливальної установки, де формують в опорний наповнювач - крихту шамотну або бій кераміки. Після прожарювання при 950...980 °C протягом 12...24 год форми переносять у вакуумну плавильно-заливальну установку, де через 20...40 хв в умовах вакууму заливають металом рис. 1.3. [3].

Як було зазначено вище, плавку і заливку в керамічні оболонкові форми проводять у вакуумних плавильно-заливальних установках. Для виплавки жароміцних нікелевих сплавів як шихту використовують мірні заготовки зі строго регламентованим хімічним складом. Заливку розплавом у форму здійснюють безпосередньо з плавильного тигля установки, після чого її

охладжують на відкритому повітрі, або перед цим її на 2...3 год поміщають у термостат з температурою 650...750 °С.

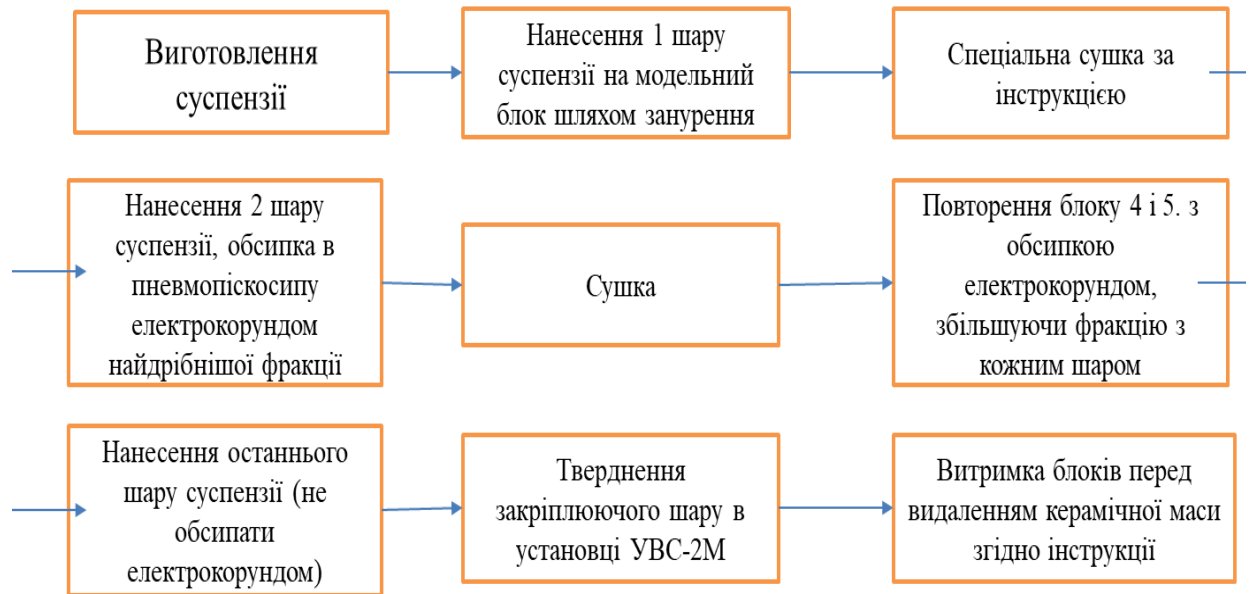


Рис. 1.3 – Схема виготовлення керамічної форми

Керамічні оболонкові форми, виготовлені за традиційною технологією виготовлення, мають недостатньо високу міцність і руйнуються в процесі лиття. Крім того, традиційний процес виготовлення форм вимагає тривалого часу та високих витрат. Отже, метою даного дослідження є аналіз і покращення як складу, так і технології виготовлення керамічних оболонкових форм, що використовуються для лиття складнопрофільних виливків з жароміцних сплавів, зокрема лопаток газотурбінних двигунів (ГТД).

## 1.2 Вогнетривкі матеріали керамічних ливарних форм.

Для виготовлення керамічних ливарних форм застосовуються вогнетривкі матеріали, що мають зернисту або пиловидну структуру, а також рідкі ЗК. На сучасному етапі найбільш поширеними є тугоплавкі оксиди металів і їх сполуки, які використовуються в якості матеріалів для виготовлення керамічних форм [3].



У роботах [4-6] описані основні матеріали, що використовувались для виготовлення багатошарових оболонкових форм при виготовленні виливків. Найбільше розповсюдження отримав білий електрокорунд, кварцовий пісок, беззалізний циркон та дистен-силіманіт.

Дослідження автора роботи [7] показує, що для виготовлення литих заготовок замість кварцового піску все частіше використовують зерна плавленого кварцу (кварцове скло, кварц аморфний), електрокорунду, дистен-силіманіту і високоглиноземистого шамоту.

Кварц отримують із кварцевого піску (99,8%  $\text{SiO}_2$ ) шляхом нагріву його до температури вище  $1713^\circ\text{C}$  з наступним охолодженням за спеціальним режимом. Його пилоподібні фракції можуть бути використані для виготовлення вогнетривких суспензій для створення оболонкових форм з високою термостійкістю. Згідно даних роботи [8] значною перевагою його використання є низький коефіцієнт термічного лінійного розширення (КТЛР) (рис.1.4). Це дозволяє отримувати виливки з високою точністю. Використання оболонкових форм із плавленого кварцу спрощує технологічний процес лиття заготовок, так як їх термостійкість дозволяє їх використання без опорного наповнювача.

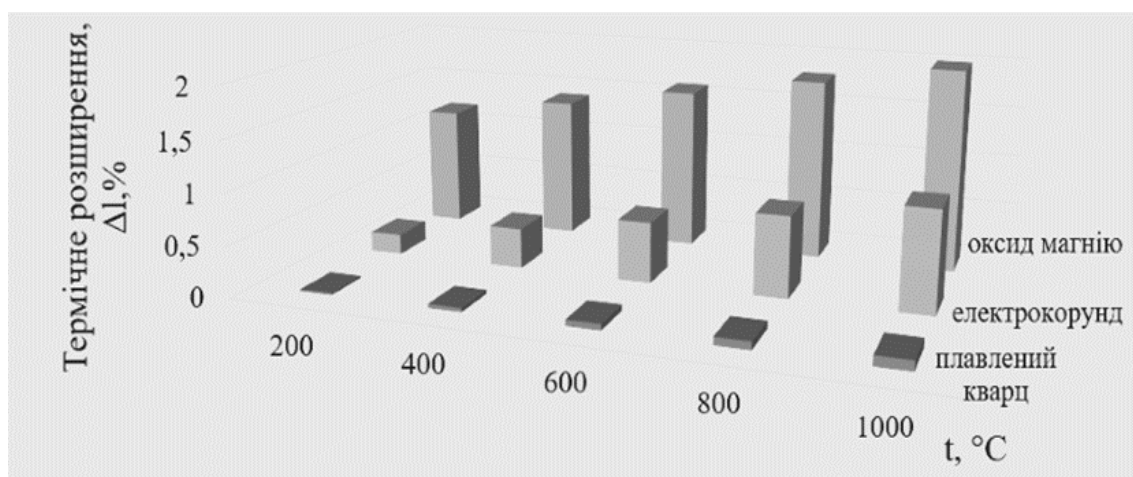


Рис. 1.4 – Температурна залежність коефіцієнта лінійного термічного розширення для деяких вогнетривів

Згідно роботи [9] електрокорунд є найбільш чистим за вмістом домішок вогнетривким матеріалом, який не потребує спеціальної підготовки. Його отримують в результаті проведення відновлювальної плавки бокситів. В залежності від вмісту шкідливих домішок, що знижують температуру, електрокорунд поділяється на чорний (нормальний) та білий. Для виготовлення керамічних форм використовують білий електрокорунд, але через його високу вартість в більшості його використовують для лицьових (1-2) шарів. Дрібні пилоподібні фракції можуть також використовуватись і для виготовлення суспензії. Враховуючи, що електрокорунд є дорогим і дефіцитним, то при ЛВМ він зазвичай застосовується для вакуумного лиття лопаток турбін із жароміцних сплавів.

Високоглиноземистий шамот отримують в результаті випалювання вогнетривких глин на спеціальних пічних агрегатах. До складу шамоту входить 30-70 % муліту. Вогнетривкість шамоту складає 1690-1770 °С. При нагріванні і охолодженні шамот не зазнає структурних перетворень. Керамічна вогнетривка оболонка, виготовлена з використанням шамоту, має хорошу термостійкість і міцнісні характеристики, а також витримує металевий розплав без опорного наповнювача [10].

Пісок дистен-силіманіту отримують в результаті його виділення із суміші мінералів природного алюмосилікату. В його склад входять два мінерали – дистен (кіаніт) і силіманіт. В більшості випадків він використовується в якості наповнювача для суспензій практично для всіх обсіпальних матеріалів [11]. В такому випадку, щоб надати керамічній оболонці необхідних властивостей, в суспензію додатково вводиться гранульований порошок алюмінію АСD-4. Міцність і термостійкість оболонкової форми забезпечує нагрівання форми до 1600 °С без руйнування.

### 1.3 Зв'язувальні компоненти для виготовлення керамічних форм.

Для виготовлення керамічних оболонкових форм використовують ЗК, які в результаті хімічних і фізичних процесів при сушінні шарів і прожарюванні форми перетворюються в плівки тугоплавких оксидів, що які міцно з'єднують зерна вогнетривкого наповнювача [2]. Такі оксиди утворюються з елементоорганічних сполук або неорганічних солей металів, а також цементуючої основи під час формування оболонки. Зазвичай для цих цілей використовують етилсилікат марки 40, що складається з суміші тетраетоксилаксану і алкоксилаксанів [12]. Дія цих речовин полягає в тому, що під час взаємодії з водою відбувається гідролітична поліконденсація, що призводить до утворення розгалужених і зшитих молекул з упорядкованою структурою. Процес починається з утворення золю кремнієвої кислоти (колоїдний розчин). Під час сушіння золь переходить у гель, який склеює частинки наповнювача, а потім утворює аморфний кремнезем.

У промисловості для розчинення етилсилікату використовують етиловий спирт та ацетон [13, 14]. Це пов'язано з тим, що етилсилікат не взаємодіє з водою і не розчиняється в ній. Гідроліз етилсилікату зазвичай проводять шляхом змішування його з розчинником та додаванням розбавленої кислоти.

Зв'язувальним компонентом в суспензіях є гідролізований розчин етилсилікату [14]. Ступінь гідролізу етилсилікату залежить в основному від складу етилсилікату і кількості води [14, 15]. Гідроліз ЕТС можуть здійснювати роздільним або суміщеним способом. При роздільному методі у гідролізер вводять розрахункову кількість води, соляної кислоти, спирту, етилсилікату, перемішують розчин до тих пір, поки він не охолоне. Процес гідролізу проводять протягом від 2 год до 18 год. Приготування вогнетривкої суспензії проводять після закінчення реакції гідролізу шляхом додавання пилоподібного наповнювача і перемішування в мішалках [16, 17].

За суміщеного способу гідроліз ведуть так: у гідролізер заливають етилсилікат і розчинник, перемішують від 1 хв до 2 хв, після чого вводять воду,

що підкислена  $\text{HCl}$  та пилоподібний матеріал. Для усунення шкідливого впливу на гідролізований розчин домішок, які містяться в зернах наповнювача, додають  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (у такій же кількості, як  $\text{HCl}$ ). Перемішування продовжують до охолодження отриманої суспензії ( $\sim 1$  год). Гідроліз за суміщеного способу здійснюється швидше. Оболонки із суспензій, приготованих цим методом, характеризуються вищою міцністю, ніж оболонки, приготовані роздільним способом.

Технологія виготовлення форм для лиття на основі ЕТС без органічних розчинників застосовується все ширше, зокрема для ЛВМ. У суспензіях, де ЗК отриманий без органічних розчинників, для поліпшення змочування використовують неіоногенні поверхнево-активні речовини, такі як ОП-7, ОП-10, сульфанол, а також речовини з комплексною пластифікуючою, емульгуючою та змочувальною дією. Технологія вимагає суворого контролю параметрів сушіння, зокрема температури і вологості повітря [18]. ЗК без органічних розчинників є технологічними, не токсичними і пожежобезпечними. Оболонки, отримані за оптимальним режимом твердіння, відзначаються підвищеними механічними властивостями.

Наразі на ринку ливарних матеріалів існують готові до використання ЗК на основі ЕТС, наприклад, Wacker Silester XAR [19]. Розчинником у Wacker Silester XAR є суміш етанолу та 2-пропанолу, його ступінь гідролізу та рН оптимізовані таким чином, щоб забезпечити необхідну реакційну здатність і належну стабільність при зберіганні. Інші спеціально розроблені як готові до використання ЗК є попередньо гідролізовані етилсилікати (PES) REMET®, які доступні у трьох стандартних концентраціях кремнезему – 18 %, 20 % і 25 % [20]. Завдяки спеціальному складу та технології виробництва гібридні ЗК мають дуже хороші властивості при зберіганні та обробці. Перевагою ЗК на спиртовій основі є швидке тверднення в ам'ячній атмосфері, в такому випадку час між нанесенням шарів може складати декілька хвилин, що ефективно для роботизованого виробництва при нанесенні опорних шарів кераміки [21].

Для виготовлення керамічних оболонкових форм крім етилсилікатів використовується готовий ЗК типу ГС, ЗК алюмохромофосфатного типу, ЗК

на основі рідкого скла і кремнезоль. Ці ЗК значно спрощують процес виготовлення керамічних оболонкових форм, процеси їх використання при приготуванні суспензій описані в роботах [22, 23].

ЗК типу ГС виготовляється і постачається на виробництво в готовому гідролізованому вигляді, а процес приготування суспензії полягає у вмішуванні в нього матеріалу до отримання необхідної в'язкості з попереднім введенням необхідної кількості сірчаної і ортофосфатної кислоти для нейтралізації заліза, що присутнє в порошковому матеріалі [24].

Згідно патенту [25], ЗК на основі алюмохромофосфатів використовується у випадках, коли необхідна підвищена міцність керамічних форм. Ці суспензії в більшості випадків використовуються в поєднанні з шарами рідини на основі рідкого скла, яку готують на основі кремнезоль. Об'єднані шари керамічної форми отримують в результаті поперемінного нанесення на модельний блок суспензій з різними ЗК [26]. При використанні алюмохромофосфату додають борну кислоту  $\text{H}_3\text{BO}_4$  в кількості 2-3 % від маси рідких складових з метою підвищення міцності керамічних оболонкових форм в прожареному стані [27-29].

Колоїдний кремнезем має високу питому поверхню і тому він погано змочує воскову поверхню, що приводить до нерівномірного її покриття. Для підвищення змочування до її складу вводять поверхнево-активні речовини та протипінні добавки. Недоліком даного матеріалу є те, що через водну основу керамічні форми на колоїдному кремнеземі повільніше сохнуть. Скоротити час висихання між наступним нанесенням шару та остаточним часом висихання за рахунок температури, вологості та швидкості руху повітря, або рН суспензії. Окрім «екологічності» такого типу матеріал має й інші переваги. Однією з найважливіших його особливостей є довгий термін служби суспензій на його основі та відсутність переходу в гелеву фазу (на відміну від ЕТС). Керамічні форми, виготовлені з використанням колоїдного кремнезему, мають вищу розмірну точність, ніж форми на етилсилікаті. Вони характеризуються високими вогнетривкістю, термостійкістю, стійкістю до термічного удару та мають невелику усадку [30].

Сучасні водні зв'язувальні компоненти, наприклад, Remasol, LUDOX та інші мають тривалість сушіння шарів форми на рівні з ЕТС і забезпечують високу міцність керамічних оболонок у сирому стані та після прожарювання [31].

Керамічні форми, виготовлені з використанням водних ЗК, забезпечують хорошу газопроникність [32]. Наприклад, кераміка, яка виготовлена з водного ЗК Remasol, має вищу газопроникність у діапазоні температур від 25 до 950 °С порівняно з матеріалом для одержання якого використовували спиртово-водний ЗК. Це пов'язано з більш високим відсотком відкритої пористості у керамічних зразках, які виготовлено із застосуванням Remasol.

Використання ЗК на основі кремнезоль значно спрощує технологічний процес виготовлення суспензій, тому що проводиться змішування вихідних компонентів в мішалках без охолодження. Для підвищення їх властивостей додають поверхнево-активні речовини [33]. Крім того в практиці виготовлення оболонкових форм часто використовують суспензії на основі комбінованих ЗК, таких як: етилсилікат і кремнезоль (ВС-1к), етилсилікат і фосфорна кислота (ВС-2-ф). Такі комбінації пов'язані з економією етилсилікату, і їх використання обґрунтовано тільки для простих деталей із невисокими вимогами до якості.

Але суттєвим недоліком є невисока міцність в непрожареному стані, що впливає на його широке використання. Також ЗК на водній основі повинен зберігатися при температурі не нижче +5°C. Таке обмеження зберігання кремнезоль пояснюються тим, що при температурі нижче вимог зберігання кремнезоль кристалізується (замерзає) і після розморожування втрачає в'язучі властивості [3]. Тому в даній роботі потрібно провести порівнянні дослідження міцності в сирому та прожареному стані керамічних оболонкових форм, отриманих з використанням ГРЕС і з водними ЗК.

#### **1.4 Модельні матеріали для точного лиття.**

Для виготовлення моделей, які витоплюють, використовують модельні системи на основі парафіну, стеарину [34]. До них пред'являють наступні

вимоги: легкоплавкість в межах від 60 °С до 100 °С, температура початку розм'якшування вища за температуру робочого приміщення на 35-45 °С, мінімальна і стабільна усадка, мінімальне об'ємне і лінійне розширення, оптимальна рідкоплинність, мінімальна зольність, хімічна інертність по відношенню до матеріалу прес-форми і вогнетривкого покриття, можливість багаторазового використання тощо [35]. Такі модельні композиції готують у термостатах шляхом розплавлення і перемішування парафіну і стеарину. Моделі виготовляють методом заливки (за температури від 60 °С до 70 °С) або запресовки пастоподібної композиції у прес-форму. Пастоподібну композицію безперервно перемішують і охолоджують до температури 42-45 °С. Подача пастоподібного модельного матеріалу в робочу порожнину прес-форми є основним способом виготовлення моделей. Даний процес забезпечує високу точність за рахунок зменшення усадки модельного матеріалу і підвищує продуктивність через зменшення часу охолодження моделі та прес-форми.

В процесі одержання модельних композицій спочатку прес-форми очищують, а потім наносять покриття для зменшення адгезії. В якості покриття використовують трансформаторну або касторову олію в суміші з етиловим спиртом у співвідношенні 1:1. В умовах масового виробництва виготовляють моделі і елементи ливникової системи разом в одній прес-формі. Потім їх збирають у блоки і передають на подальші операції. Але так як розм'якшення восковмісних модельних мас виникає при низькій температурі 60-70°C, то моделі під час виготовлення і користування не завжди забезпечують необхідну розмірну та масову точність. Це стає особливо критичним у випадках, коли йдеться про виготовлення виливків складної форми [36].

Важливим фактором у підвищенні та стабілізації точності параметрів моделі на основі воску є її хімічний склад. Оптимізацію її складу проводять за показником лінійної усадки і теплостійкості, плинності модельної маси в пастоподібному стані, рідкоплинності, межі міцності на вигин при 20 °С, вартості, коефіцієнту термічного лінійного розширення та інш. [11, 12].

Для розробки нових конструкцій або вдосконалення газотурбінних двигунів необхідно виготовляти дослідні партії лопаток, що наразі потребує значних затрат і часу. Тому актуальним є розробка нових рішень, які б дозволяли зменшити виробничі витрати та підвищити ресурсоефективність технології лиття за моделями, що витоплюються. Вирішенням цієї проблеми є використання адитивних технологій для створення разових моделей замість воскових. Суть такого виробництва полягає в створенні CAD-моделі з подальшим виготовленням її за допомогою 3D-друку. 3D-друк значно скорочує тривалість процесу одержання виробу. При цьому значно зменшується трудомісткість, матеріалоємність і енергоємність виробництва. Таким чином, використання такої технології дозволяє створювати кінцеві функціональні вироби безпосередньо від конструктора або інженера за допомогою комп'ютера і принтера, без необхідності додаткових технологічних операцій [13, 14, 15, 17]. Використання такого методу дозволяє виготовляти деталі з великою точністю, яка може досягати 70 мкм. Оболонкові керамічні форми, які виготовлено за допомогою 3D-технологій, дозволяють одержувати найточніші ливарні металовироби з високою якістю поверхні.

Приклади застосування таких пластиків в якості разових моделей [37-39] показують, що існує проблема розтріскування керамічної оболонки під час видалення моделей шляхом випалювання внаслідок підвищеного термічного розширення матеріалу моделей та неконтрольованого тиску газів під час їх газифікації, а також можливість утворення зольного залишку.

В роботі [40] запропоновано вирішення проблеми розтріскування керамічних форм шляхом підбору оптимальних режимів випалювання пластикових моделей з керамічних оболонкових форм, що забезпечують цілісність оболонкових форм та отримання виливків необхідної якості.

Виходячи зі сказаного, в роботі потрібно вибрати та всебічно дослідити використання пластикових моделей для одержання керамічних оболонкових форм.



## 1.5 Вимоги до керамічних форм для лиття деталей ГТД, технологічні властивості суспензій та керамічних оболонок.

Відомо, що керамічні форми, які виготовлено з матеріалів, що змінюють свій об'єм при нагріванні, не бажано використовувати для одержання виливків з високою розмірною точністю. В них при прожарюванні часто виникають тріщини від навантажень.

Однією з вимог до формувальних матеріалів є відсутність або мінімальний шар зміненої зони матеріалу форми з розплавом жароміцного сплаву. Встановлено, що руйнування стінок форми відбувається через процеси обміну складових сплаву та кераміки, дифузії компонентів вогнетриву через міжфазний шар в розплаві і, з іншого боку, розчинення вогнетриву розплавом і перенесення розчинених речовин в його склад. У випадку взаємодії керамічної форми зі сплавом утворюється пригар, тому вогнетривкі матеріали форми мають бути інертними до розплаву.

На основі літературного аналізу, робіт виробників газотурбінних двигунів сформульовані загальні та спеціальні вимоги, що пред'являються до матеріалів формувальних сумішей та ЗК для виготовлення деталей з нікелевих жароміцних сплавів [1, 3, 18, 16, 11, 41-43].

Вогнетривкі матеріали повинні відповідати наступним критеріям:

- хімічна інертність по відношенню до рідкого металу, а саме: мінімальний вміст шкідливих домішок, лужних та лужноземельних металів, оксидів заліза тощо;
- відсутність об'ємних змін при нагріванні внаслідок перекристалізації матеріалу;
- коефіцієнт лінійного термічного розширення не більше  $5 \div 6 \times 10^{-6}$  мм/град.;
- однорідність матеріалу за формою частинок і хімічним складом;
- високі показники міцності на згинання.

Зв'язувальні компоненти:

- стабільність за складом вихідних матеріалів;

- стабільність за фізико-хімічними властивостями об'ємом до 2000м<sup>3</sup>;
- централізоване виготовлення та постачання готового зв'язувального матеріалу;
- час приготування суспензії на основі електрокорунду та плавленого кварцу не більше однієї години;
- час сушіння вогнетривкого покриття;
- можливість контролю якості суспензії та вогнетривкого покриття;
- забезпечення міцності керамічних форм при згинанні;
- збереження геометричних розмірів ливарної форми при видаленні модельного складу після прожарювання та заливання металом до температури 1750 – 1800°C;
- високі характеристики змочування суспензією модельного матеріалу та відсутність взаємодії з жароміцними сплавами.

Таким чином, для отримання високоякісних виробів зі жароміцних сплавів, керамічна форма повинна відповідати наступним критеріям [42]:

1. Достатньо міцна, щоб витримувати динамічні та статичні навантаження на усіх етапах процесу.
2. Хімічно інертна до модельної маси та матеріалу виливка.
3. Достатньо піддатлива, щоб не перешкоджати усадці сплаву під час тверднення.
4. Має забезпечувати отримання виливків із необхідною шорсткістю поверхні, точністю розмірів та формою.
5. Мати високу або достатню газопроникність.

Висунуті вимоги відіграють ключову роль у забезпеченні високої якості та точності литих деталей, особливо для робочих лопаток газотурбінних двигунів. При цьому керамічна форма повинна забезпечувати збереження своєї структури та форми протягом усього технологічного процесу [43].

Відомо, що властивості керамічної форми залежать від матеріалів, з яких вона виготовляється та технології її одержання. В зв'язку з цим в процесі приготування суспензії, нанесення її на модельний блок, обсіпки

та сушіння необхідно контролювати її текучість, гранулометричний склад пилоподібного вогнетриву, обсіпку та інш. Крім того, важливими її параметрами є густина, температура, в'язкість, швидкість тверднення та інш. Також важливою властивістю є живучість та седиментаційна стійкість. Остання суттєво залежить від густини частинок вогнетривкого наповнювача та їх розміру і яку можна підвищити за рахунок введення спеціальних добавок.

Відомо, що однією з властивостей кераміки є її міцність. Вона важлива не тільки для того, щоб оболонка не руйнувалася в процесі заливки, але і на всіх етапах її виготовлення. Тому в процесі виробництва міцність контролюють в сирому стані, після прожарювання і при робочих температурах [44, 45].

Керамічні форми повинні мати, як уже зазначалося, високу хімічну стійкість. Відомо, що при контакті розплаву відбувається його взаємодія з вогнетривкими оксидами оболонки. Це може привести до того, що можуть утворюватися легкоплавкі евтектики, які формуватимуть ливарні дефекти на поверхні виливка. Тому необхідно дуже якісно контролювати весь технологічний процес.

### **1.6. Мета та задачі дослідження.**

Мета дисертаційної роботи полягала у розробці технології одержання керамічної форми на водній основі для виробництва деталей газотурбінних двигунів.

Таким чином, на основі проведеного вище аналізу для досягнення сформульованої мети в роботі поставлені наступні **задачі** дослідження:

- провести аналіз властивостей керамічних оболонкових форм, визначити раціональні склади, які дозволять підвищити міцність виробів з неї.
- дослідити технологічні властивості водних суспензій електрокорунду, кварцу та дистен-силіманіту та виготовлення керамік з них. Провести їх порівняння з відповідними суспензіями і кераміками, що виготовлені з

використанням ЕТС.

- вибрати матеріал моделі для виготовлення 3D-друком керамічних оболонкових форм.
- розробити технологічну схему одержання керамічних оболонкових форм з використанням ЗК на водній основі за PLA моделями.
- провести дослідну перевірку керамічних форм шляхом заливання жароміцним розплавом та визначити якість одержаних виливків.
- провести дослідно-промислову перевірку результатів досліджень на виробництві.

## РОЗДІЛ 2

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 2.1 Методика досліджень визначення властивостей керамічних оболонкових форм.

Технологічні властивості суспензії в кінцевому результаті визначають властивості керамічної оболонки (КО). Тому щоб знати їх залежність і відповідно впливати на якість керамічних форм на протязі технологічного процесу їх виготовлення необхідно контролювати основні властивості суспензії.

Для вимірювання умовної в'язкості буде використано ліжку ВЗ-4, яку представлено на рис. 2.1. Для проведення вимірювань отвір закривають знизу, наливають суспензію у віскозиметр до рівня верхніх країв. Під віскозиметром розташовують іншу ємність, відкривають отвір та одночасно вмикають секундомір. Зупиняють секундомір в момент першої появи переривчастого струменя. За умовну в'язкість приймається час витікання в секундах через каліброване сопло віскозиметра.

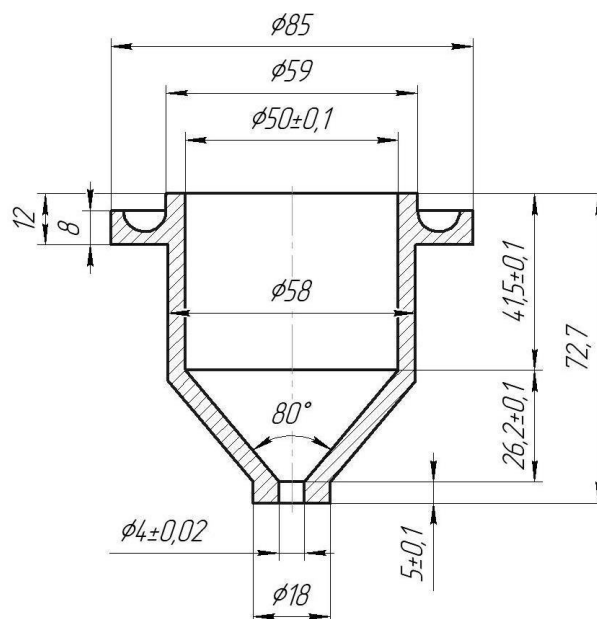


Рис. 2.1 – Креслення віскозиметра ВЗ-4

Густина суспензії вимірюється з використанням лабораторних вагів з дискретністю 0,01 г та мірної скляної ємності об'ємом 250 мл. Також використовуються стандартні ареометри (1,2 – 2,5 г/см<sup>3</sup>).

Для вимірювань седиментаційної стійкості суспензію необхідної густини наливають в калориметричний циліндр до верхньої позначки (30 см<sup>3</sup>) і залишають в спокої на 7 годин. Після закінчення вказаного часу заміряють шар рідкого зв'язувального компоненту в см. Розраховують седиментаційну стійкість за допомогою наступної формули:

$$H = H_1 \cdot 100\% / H_0, \quad (2.1)$$

де  $H_1$  – висота стовпа «відстою», см;

$H_0$  – загальна висота стовпа суспензії, см.

Для оцінки якості керамічних оболонок, виготовлених із різних суспензій, необхідно провести аналіз властивостей готових зразків. У цехах лиття за моделями, що виплавляються, якість керамічної оболонки, крім візуального огляду на предмет цілісності, оцінюють за величиною межі міцності при статичному вигині (при кімнатній і підвищеній температурі), газопроникності та газотвірної здатності. Значно рідше КО перевіряють на вміст в них води (просушеність), термостійкість, тривалу жаростійкість, чистоту поверхні та ін. За кордоном якість оболонок контролюють на міцність при розриві, згинанні та розколюванні, а також визначають газопроникність [32]. При цьому для визначення газопроникності та міцності КО використовують порожнисті зразки сферичної або циліндричної форми.

Контроль просушеності шарів здійснюють з метою визначення можливості нанесення наступного шару вогнетривкого покриття на блок або готовності оболонки до операції виплавлення з неї модельного складу. Для кількісної оцінки вмісту води в готовій формі використовують метод зважування зразка до і після його сушіння.

Для випробування використовують зразок КО масою 5-10 г. Сушіння

зразка проводять при температурі 100-110 °С протягом 1,5 год. Дослідження проводять не менше ніж на трьох зразках. Вміст вологи у досліджуваному зразку розраховують за формулою (%):

$$m_v = 100 \cdot (m_1 - m_2) / m_2, \quad (2.2)$$

де  $m_1$ , і  $m_2$  - маса зразка керамічної оболонки до і після його сушіння, відповідно, г.

За справжнє приймають середнє арифметичне значення трьох величин  $m_v$ .

Міцність є важливим параметром оболонкових форм, і вимоги до неї змінюються на різних етапах виготовлення виливки [46]. Під час формування, обпалювання та заливання металом форма повинна бути достатньо міцною, але для полегшення видалення форми після заливки міцність оболонки повинна бути мінімальною.

Різноманітні технологічні схеми виготовлення виливків за допомогою виплавлюваних моделей призвели до необхідності контролю міцності "сирих" оболонок при температурі 20-25 °С, оболонок, нагрітих до температури 900- 1000 °С, і оболонок, які використовуються для отримання відливок методом спрямованої кристалізації додатково визначають міцність при 1450 °С.

Для одержання плоских зразків кераміки для визначення міцності на вигин виготовлені воскові і пластикові разові моделі. На разову модель із заглибленням, яка дозволяє отримувати 4 зразки (рис. 2.2), по черзі наносять шар вогнетривкої суспензії із заданою в'язкістю, обсипають зернистим матеріалом і сушать. Після нанесення кожного шару зовнішню площину моделей очищають від обмазки (рис. 2.3). Вказані операції повторюють до отримання зразків завтовшки 3 мм. Після закінчення сушіння моделі витоплюють (випалюють), зразки вилучають. «Сиру» міцність визначають на зразках кераміки, які просушені протягом не менше 12 годин після нанесення останнього шару. Інші зразки прожарюють за температури 900-1050 °С протягом 2 годин, а після охолодження піддають випробуванням на статичний вигин із використанням приладу моделі 04116.



а

б

Рис. 2.2 – Воскова (а) та пластикова (б) моделі для виготовлення плоских зразків кераміки

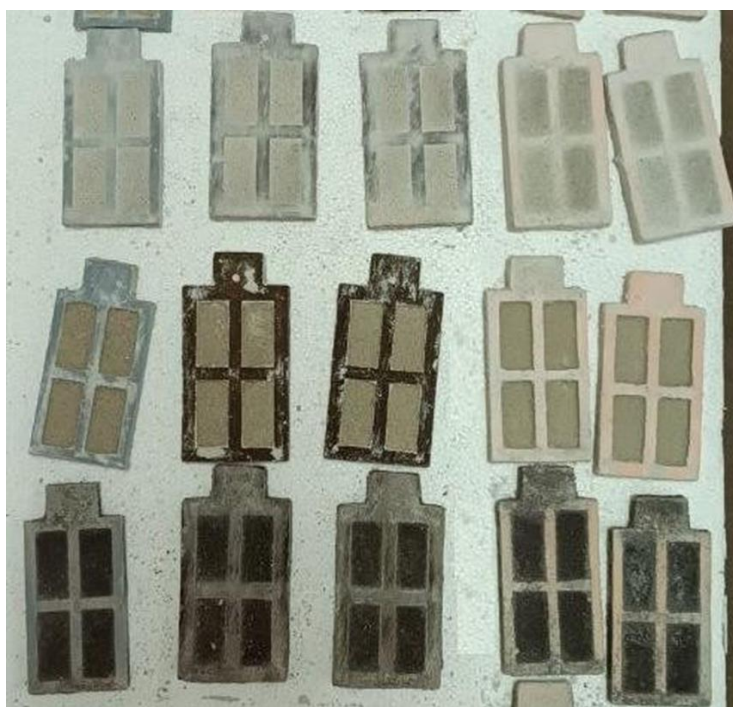


Рис. 2.3 – Моделі після нанесення декількох шарів кераміки

Показником міцності оболонкової форми є результати її випробувань на статичний вигин за триточною схемою (рис. 2.4). Випробовуванням піддаються зразки розмірами приблизно 40x20x3мм. Міцність керамічних зразків розраховують за формулою:

$$\sigma_{\text{виг}} = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.3)$$

де  $P$  - навантаження, при якому зруйнувався зразок,



$H$ ;  $l$  - відстань між опорами, м;

$b$  і  $h$  - ширина та товщина зразка у місці його руйнування при випробуванні, м.

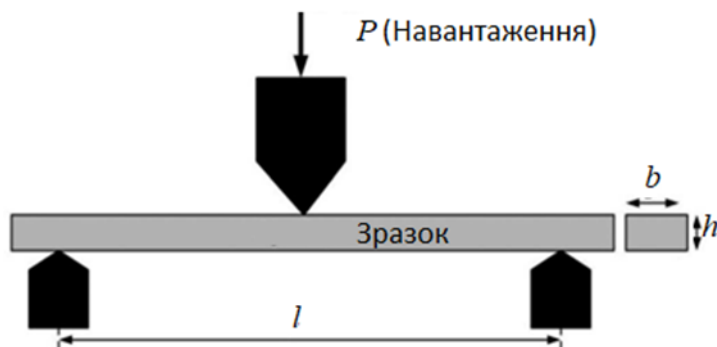


Рис. 2.4 – Схема випробувань на статичний вигин

Також для визначення міцності КО проводити випробування на розтяг. Керамічні зразки виготовляли так само, як і плоскі зразки для випробувань на вигин, для чого використовували пінополістиролові моделі з заглибленням 4 мм у формі стандартної «вісімки» (рис. 2.5).



Рис. 2.5 – Моделі «вісімок» в процесі виготовлення

Для визначення міцності при розриванні застосовували прилад, фото та схема якого показана на рис. 2.6. На станині 1 приладу змонтовані стійки 9 і 10. З переднього боку стійки 9 розташована радіальна шкала 2 із стрілкою, а із зворотного боку – важіль із вантажем 11. Важіль з'єднаний із сережкою 4, на якій підвішено верхній затискач 5. На стійці 10 розташований нижній затискач 6 і рукоятка 8. При обертанні цієї рукоятки нижній затискач може переміщуватися у вертикальному напрямку завдяки гвинтовому пристрою 7, розташованому всередині стійки 10 [22].

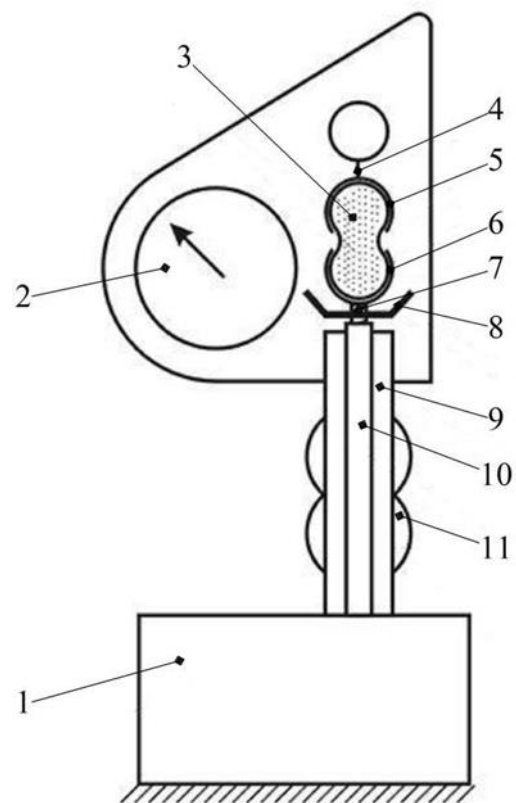


Рис. 2.6 – Загальний вид та схема [22] приладу для вимірювання міцності зразків при розриванні: 1 – станина; 2 – радіальна шкала; 3 – зразок; 4 – сережка; 5, 6 – затискачі; 7 – гвинтовий пристрій; 8 – рукоятка; 9, 10 – стійки; 11 – вантаж

Після встановлення зразка 3 у затискачі при обертанні рукоятки 8 за годинниковою стрілкою зусилля передається через зразок на верхній затискач 5 і далі на важіль, який відхиляється від вертикального положення, при цьому вантаж 11 створює розтягувальне зусилля на зразок. У момент

розривання міцність зразка фіксується стрілкою на шкалі 2.

За кордоном для перевірки найслабшої частини оболонки використовується тест на кутову міцність. Для випробування підготовлюють V-подібні зразки довжиною 20 мм і шириною 10 мм з кутом  $12^\circ$  [47]. При випробуванні клиноподібний металевий блок вдавлюється в досліджувані зразки з постійною швидкістю. Проте такий метод потребує спеціального обладнання, тому використовується не часто.

Газопроникність керамічної оболонки залежить від розмірів і кількості наскрізних капілярних каналів у її тілі (стінках), в'язкості газу, що фільтрується через ці капіляри та його концентрації в вогнетривкій суспензії, типу використовуваного розчинника в вогнетривкій суспензії, коефіцієнта наповнення вогнетривкої суспензії, умов сушіння, природи використовуваного вогнетривкого матеріалу для обсіпання шарів, режиму прожарювання КО і т.д. [48, 49].

Газопроникність прожарених КО знаходиться в межах від 0,02 до 0,5 од. і зменшується зі збільшенням вмісту води у ЗК. Для значного підвищення газопроникності КО в суспензію і зернистий вогнетривкий матеріал можуть вводити добавки, які вигоряють при прожарюванні форми.

В основному, величину газопроникності кераміки на підприємствах визначають за кімнатної температури на зразках, що мають діаметр 50 мм і товщину 3,5 мм. Їх виготовляють так як і плоскі зразки кераміки в разових моделях із заглибленням. Зразки випробовують як у «сирому» стані (висушеному при  $150-250^\circ\text{C}$ ), так і в прожареному стані на стандартному приладі моделі 042.

## **2.2. Вибір вогнетривких матеріалів і зв'язувальних компонентів для виготовлення керамічних форм.**

При виборі вогнетривких наповнювачів враховували їх доступність, вартість, поширення та їх властивості. Серед проаналізованих матеріалів найбільш підходящими вогнетривками для лиття жароміцних сплавів є

кварц, дистен-силіманіт і електрокорунд.

Кварц (кварцовий пісок, маршаліт) є найпоширенішим і найдешевшим матеріалом для виготовлення керамічних форм. В якості наповнювача для суспензії застосовують мелений кварцовий пісок (маршаліт), при цьому розмір зерна повинен бути менше 50 мкм. В якості обсіпочного матеріалу застосовують кварцовий пісок з розміром зерна 0,16 – 0,20 мм для першого шару і 0,315 – 0,40 мм для наступних шарів. Температура плавлення кварцу становить 1713 °С, при нагріванні зазнає ряд поліморфних перетворень, що супроводжується зміною його об'єму. Менше розширення при нагріванні мають плавлені матеріали (електрокорунд, плавлений кварц) і вогнетриви, які складаються з подвійних оксидів: дистенсиліманіт, циркон, високо глиноземистий шамот (рис. 2.7.)

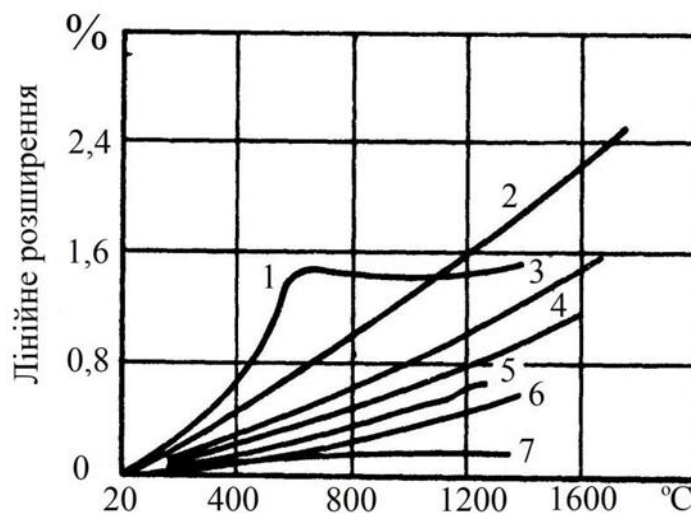


Рис. 2.7 – Лінійне розширення вогнетривкої основи КО [6]:

1 – кварц кристалічний; 2 – магнезит; 3 – електрокорунд; 4 – дистен-силіманіт; 5 – шамот; 6 – циркон; 7 – кристалічний кварц

Дистенсиліманіт – алюмосилікат з температурою плавлення 1545 °С, складається з мінералів кіаніту і силіманіту, які є алотропними різновидами  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ . Використовують дистен-силіманітовий концентрат марок КДСЗ (зернистий) і КДСП (порошкоподібний) з вмістом  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не менше 57%.

Корунд є найбільш чистим по домішках вогнетривкий матеріал, його

одержують розплавлюванням у відновлюваному середовищі кальцинованого бокситу (з масовою часткою  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до 98 %), корунд одержують розплавлюванням кальцинованого глинозему і він містить 99,6 % масової частки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Робоча температура корунду не перевищує  $1950^\circ\text{C}$ . Електрокорунд білий доцільно використовувати в якості наповнювача суспензії і як зернистий матеріал для обсіпки при виробництві виливків із жароміцних нікелевих, кобальтових сплавів, високолегованих хромонікелевих сталей.

Властивості вогнетривких матеріалів, які було використані в дослідженнях, наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

## Властивості вогнетривких матеріалів

Матеріал і хімічна формула	Фізико-хімічні властивості			
	хімічні	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	КТЛР, $1/^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$
Кварц $\text{SiO}_2$ (кварцовий пісок)	кислий	1713	2650	13,7
Електрокорунд білий $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$	амфотерний	2050	3990	8,8
Дистен-силіманіт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	слабо-кислий	1545	3250	4,5-5,5

Для досліджень використовували електрокорунд зернистістю 50 (F30), 25 (F60), 16 (F80), M40 (F280), M20 (F400), M7 (F800).

Перед використанням зернисті вогнетривкі матеріали природного походження сушать до вмісту води не більше 0,1 % (за масою) і просіюють через сито №063.

Зв'язувальні компоненти. Для проведення дослідів вибрано зв'язувальні компоненти Remasol на водній основі. ЗК REMASOL® Colloidal Silica є водними колоїдними дисперсіями частинок кремнезему.

Частинки кремнезему в REMASOL® є некристалічними, мають високу питому поверхню (один грам колоїдного кремнезему REMASOL® має площу поверхні від 100 до 400 квадратних метрів) і є негативно зарядженими частинками, стабілізованими гідроксидом натрію.

Комерційний зв'язувальний компонент Remasol Premium Plus (виробник REMET, Великобританія) містить добавки для покращення технологічних властивостей – компонент для підвищення змочування та антиспінювач. Інші характеристики Remasol Premium Plus представлені в табл. 2.2.

Іншим ЗК на водній основі, який використовували в дослідях, був Silica Sol (кремнезоль) марки JN-30 (виробник JIYIDA, Китай), характеристики якого також представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Склад і властивості ЗК на водній основі

Характеристика	Remasol Premium Plus	Silica Sol JN-30
SiO <sub>2</sub> , %	28,0	30,5
Na <sub>2</sub> O, %	0,36	0,22
pH	10,1	9,5
Густина, г/м <sup>3</sup> (при 25°C)	1166	1,196
Розмір частинок, нм	8-10	10-16

Для виготовлення контрольних зразків кераміки як ЗК використовували гідролізований ЕТС-40 [50], який у вихідному стані не володіє зв'язуючими властивостями. Для цього його піддають гідролізу. Підготовку гідролізованого розчину етилсилікату (гідролізату) проводили наступним чином. Спочатку розраховували кількість складових:

- Етилсилікат марки ЕТС-40 – 1 л;
- Розчинник – спирт етиловий (96%) технічний [51] – 1,36 л;
- Вода дистильована – 140 см<sup>3</sup>;

- Каталізатор – соляна кислота синтетична технічна [52] – 9 см<sup>3</sup>.

У воду добавляли соляну кислоту, а потім в розчинник додавали підкислену воду, перемішували і вводили етилсилікат. Перемішування складових відбувалося ручним методом в скляних посудинах ємністю 3 або 5 літрів. Після нагріву посудини, що засвідчує про початок реакції гідролізу, його занурювали у проточну воду. Гідролізований розчин використовували через 20 годин після закінчення процесу гідролізу.

### **2.3. Процес виготовлення керамічних форм з водними зв'язувальними компонентами.**

Зв'язувальні компоненти на водній основі мають знижену в'язкість і здатні поєднуватися практично з будь-якими вогнетривкими наповнювачами, що використовуються при ЛВМ. Низька в'язкість також дає можливість введення більшої кількості наповнювача. Розрахунок компонентів суспензії ведеться щодо її маси. Наприклад, при приготуванні першого шару необхідно ввести до 70 % мас. наповнювача щодо загальної маси суспензії. Приклад: на 1 кг суспензії – 0,3 кг ЗК на 0,7 кг наповнювача. Ці кількості компонентів є лише рекомендованими, оскільки максимальна кількість наповнювача визначається в'язкістю отриманої суміші. Вводиться наповнювач наступним чином: спочатку 50 % мас. від необхідної кількості з поступовим змочуванням, а потім додають кількість, що залишилася і отримують необхідну в'язкість суспензії. Закінченням процесу вважається час, коли утворилася рівномірна суспензія без грудок, і в'язкість якої залишається постійною протягом тривалого часу.

Аналогічний підхід застосовують при виготовленні суспензії опорних шарів. Різниця лише в кількості введенного наповнювача – 60 % мас. від маси суспензії залежно від в'язкості (на 1 кг суспензії – 0,4 кг ЗК та 0,6 кг наповнювача). Перемішування – аналогічно. В'язкість суспензії лицьового шару на Remasol Premium Plus повинна бути на 10 секунд більша, ніж аналогічної на ЕТС. Взагалі підбір в'язкості суспензії полягає у знаходженні

оптимального співвідношення змочування поверхні моделі з найкоротшим часом стікання її надлишків з поверхні моделі.

Перед нанесенням шарів на воскову модель необхідно провести процес змочування поверхні моделі суспензією. За необхідності поверхня моделей знежирюється, особливо якщо для видалення моделей з прес-форми використовуються силікон. Занурення моделей в суспензію проводять під кутом приблизно 30 град., щоб уникнути утворення бульбашок на поверхні моделі і для рівномірного покриття внутрішніх частин моделі. Після вилучення моделі з ємності з суспензією дають змогу повністю стекти надлишкам суспензії, після чого відразу приступають до обсипання.

Обсипання. При обсипанні необхідно повільно обертати модель для побудови оболонки з рівномірною товщиною. Для обсипки першого шару застосовували фракції 0,16-0,25 мм, для другого – п'ятого шарів – 0,315 – 0,63 мм. Залишки вогнетривкого матеріалу з поверхні блоку видаляли поворотом блоку зі сторони в сторону.

Сушіння кожного шару проводиться в умовах, коли не спостерігається руйнування обсипки. Вона повинна бути міцною на поверхні, а матеріал – сухий на дотик. Однак для забезпечення рівномірного нанесення опорних шарів один на одного необхідно позбутися частинок обсипки струшуванням, що адгезійно не провзаємодіяли з поверхнею попереднього шару.

Рекомендовані режими сушіння для суспензій з водним ЗК:

- Перший шар – при відносній вологості повітря 50 %, 20 °С, без руху повітря протягом 4 годин;
- Опорні шари – при відносній вологості повітря 50%, 20 °С, рух повітря 1 м/с становить 2 години на шар. При збільшенні температури (макс. до 30 °С) і швидкості обдування повітрям опорних шарів можливе зниження часу сушіння до 1 годин;
- Останній шар суспензії на формі не обсипається, оскільки він є закріплюючим. Перед видаленням моделі керамічні оболонки



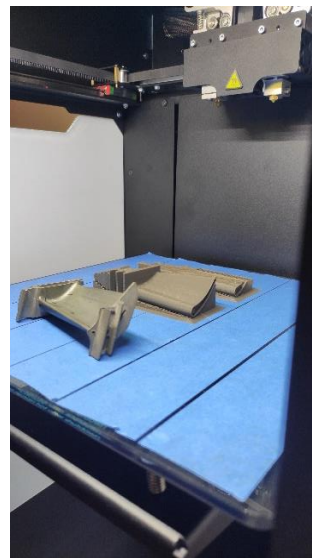
витримують не менше 12 годин після нанесення закріплюючого шару.

#### **2.4. Обладнання для виготовлення полімерних моделей та видалення їх із керамічних оболонок.**

Виготовлення моделей із заглибленнями для складнопрофільних виливків та плоских зразків керамік для досліджень проводили за допомогою технології FDM на 3D-принтері KLEMA 250 TWIN з робочою областю друку 250 x 250 x 350 мм (рис. 2.8). Останній обладнаний двома екструдерами, які дозволяють друкувати двома видами або кольорами пластику одночасно. Акрилові вставки повністю ізолюють корпус та забезпечують рівномірний температурний режим під час 3D-друку. Платформа оснащена пристроєм підігріву, що, в багатьох випадках, необхідно для друку пластиків з високою усадкою. Крім того присутність надійних рейкових напрямних забезпечує високу точність – до 30 мікрон. Для друку використовується пластиковий дріт діаметром 1,75 мм.



а



б

Рис. 2.8 – Зовнішній вигляд 3D-принтера KLEMA 250 TWIN (а) та процесу виготовлення моделі лопаток турбодвигунів (б)

Відомо, що модельні матеріали в процесі виготовлення керамічних форм видаляють різними методами. Наприклад, воскові, які виготовлено з

парафіно-стеаринової суміші – за допомогою розчинення гарячою водою, а пластикові випалюються в термічних печах.

В даній роботі просушування вогнетривів та низькотемпературне випалювання разових моделей з керамічних форм виконували в лабораторній сушильній електрошафі СНОЛ 67/350 з діапазоном автоматичного регулювання температури в інтервалі від 50 °С до 350 °С. Щодо високотемпературного прожарювання, його проводили в муфельній печі марки СНОЛ- 2.4.2/12,5-И1 під витяжною парасолею (рис. 2.9).



Рис. 2.9 – Загальний вигляд розміщення сушильної шафи та муфельної печі

## **2.5. Методика визначення усадки матеріалу моделі, що виготовляється 3D-друком.**

Дослідження впливу зовнішніх факторів на усадку, розширення і ступінь полімеризації разових моделей із полілактиду проводили в боксі в процесі друку. Для цього виготовляли на 3D-принтері KLEMA 250 TWIN кубічні моделі з висотою стінок 70 мм та їх товщиною 3 мм.

Усадку та розширення зразків проводили за допомогою пристрою УД- 40 і плиток Юхансона (рис.2.10 а), ціна поділки 0,01, при температурі 25 °С і вологості повітря 40 %.



а



б

Рис. 2.10 – Зовнішній вигляд: а - пристрою для вимірювання усадки УБ-40; б- зразків для визначення усадки пластику

Для вимірювання об'ємної усадки використовували 7 зразків і дослідження проводили протягом 9 діб (один раз на добу на трьох поверхнях – двох бічних та одній торцевій) (рис. 2.10 б). За допомогою індикатора пристрою фіксували зміну висоти кубічного зразку в декількох точках обраної поверхні і визначали середнє значення вихідного показника. Усадку ДН розраховували як зміну висоти зразку за кожен день в порівнянні з вихідним показником за перший день.

$$\text{ДН} = H_0 - H \quad (2.4),$$

де:  $H_0$  — початкова висота (мм),  $H$  — кінцева висота (мм).

## **2.6. Установка та методика для вимірювання міжфазних властивостей високотемпературних розплавів з вогнетривкою керамікою ливарних форм методом лежачої краплі.**

Метод лежачої краплі часто застосовують для аналізу міжфазної взаємодії в системах металевий розплав–вогнетрив, оскільки він добре відомий та науково обґрунтований [53]. Для дослідження міжфазних властивостей жароміцного розплаву з вогнетривами було використано оригінальну установку, схема якої зображено на рис. 2.11 [54]. Установка містить камеру нагріву, яка виконана в цільному металічному корпусі з водяним охолодженням та вікнами для освітлення та фотографування. В середині камери нагріву встановлена піч, що містить нагрівач 1, виготовлений з молібдену і оточений набором молібденових екранів 2. На столику 3, зробленому з ніобію, встановлюється підложка з досліджуваного матеріалу 4. На підложці розміщується крапля розплаву 5. Для захисту дзеркальної поверхні краплі від відбиття в ній оточуючих деталей встановлений допоміжний керамічний екран 6 з двома протилежними вікнами.

Для фотографування зображення профілю краплі використовували освітлювач 7 та цифрову відеокамеру 8 марки: GR-DVL 9600.

Столик з краплею обладнаний механізмом повороту на  $90^\circ$ . Це дозволяє знімати краплю з двох взаємно перпендикулярних сторін. Горизонтальна установка камери здійснюється за допомогою юстировочного столику.

Для проведення вимірів на столику розміщували підложку зі зразком вагою  $0,6 - 1,2$  г з досліджуваного матеріалу. За допомогою юстировочних гвинтів камеру нагріву встановлювали в горизонтальне положення і після герметизації печі вмикали вакуумну систему. Після досягнення заданого вакууму ( $P=10^2 - 10^3$  Па) і заповнення камери інертним газом проводили нагрів. Температуру вимірювали за допомогою термопари ПП1, гарячий спай якої знаходився поблизу зони контакту підложки з розплавом.

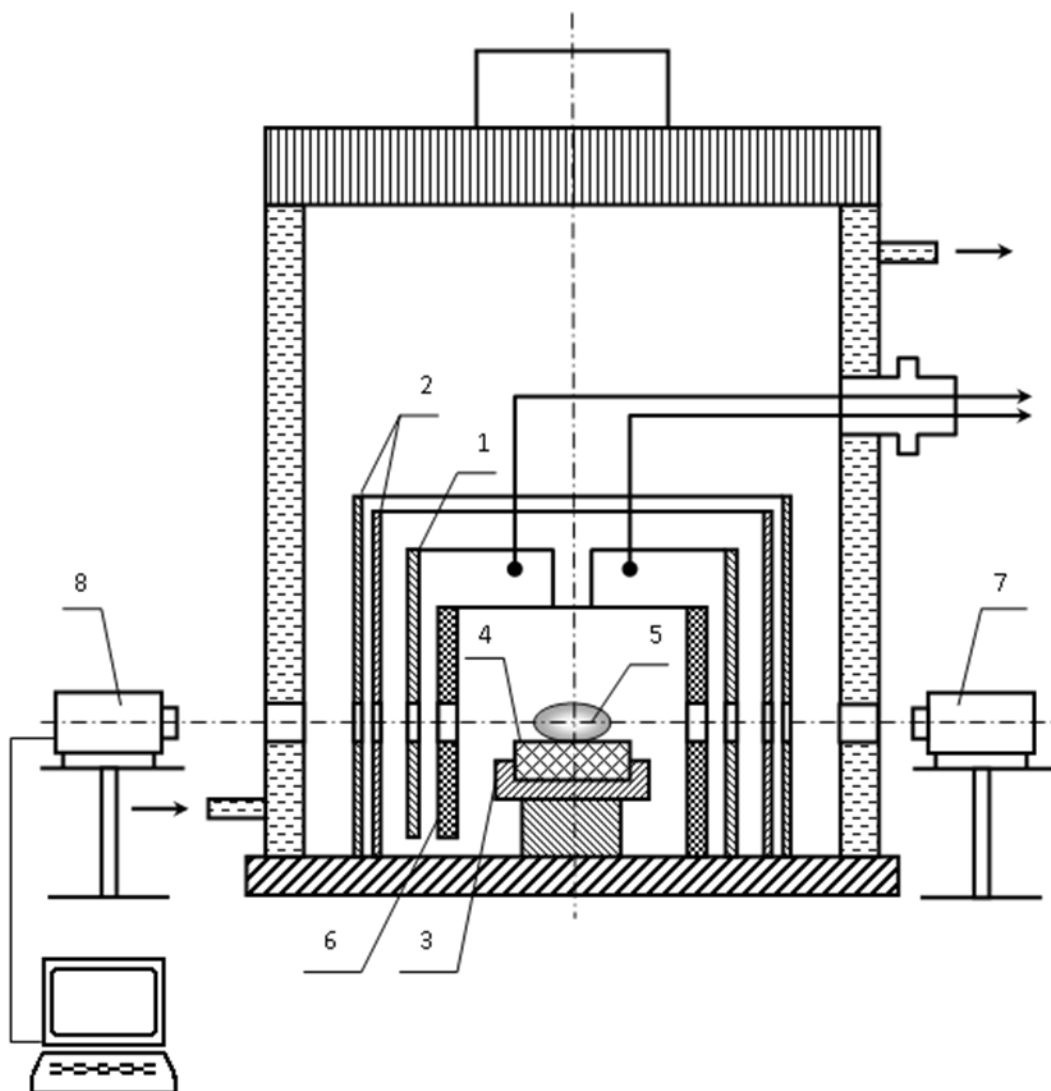


Рис. 2.11 – Схема герметичної камери високотемпературної установки для дослідження поверхневих властивостей розплавів методом лежачої краплі.

Регулювання температури здійснювали високоточним регулятором температури ВРТ-3 з точністю  $\pm 1.0$  °С. Робочу зону печі нагрівали зі швидкістю 100–150 град./хв. Досягнувши заданої температури, рідку краплю витримували на протязі 10 хвилин і знімали зображення за допомогою цифрової відеокамери.

Кут змочування  $\theta$  називають крайовим кутом змочування розплавом поверхні твердого тіла, у нашому випадку, пластин кераміки. Величина  $\cos \theta$  – називають змочуванням. Рідина змочує поверхню, якщо  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ., тобто чим менше  $\theta$ , тим вище змочування, відповідно якщо  $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  - змочування відсутнє [55]. Зазвичай виміри проводять при краєвому куті змочування  $\theta > 90$  град. Виміри при  $\theta \leq 90$  град. менш точні, але їх також можна використовувати для вимірювання поверхневого натягу. Переважно використовуються дві методики вимірювання параметрів рідкої краплі на підложці. За першою вимірюють екваторіальний радіус  $r$  і відстань від вершини до екваторіальної площини  $H$ . В цьому випадку розрахунки капілярної сталої проводяться за емпіричною формулою Портера [53]. В іншому варіанті проводяться дотичні до профілю краплі під кутом 45 град. і вимірюють максимальний діаметр краплі  $2r$  та відрізок  $C$ , що дорівнює відстані від вершини краплі до вершини кута  $\phi$ , утвореного дотичними, з бісектрисою, що співпадає з віссю обертання краплі. Тут капілярна стала розраховується з таблиць або за формулою Дорсея [53-55].

Маса зазвичай визначається зважуванням твердого зразка до і після досліду і береться середня величина.

Капілярну сталу в наших дослідження визначали за допомогою рівняння Лапласа (2.1), яке розв'язувалось спеціальною програмою:

$$\frac{Z''}{(1 + Z'^2)^{3/2}} + \frac{Z'}{\chi(1 + Z'^2)^{1/2}} = \frac{Z}{a^2} + \frac{2}{h}, \quad (2.5)$$

де  $Z, \chi$  – координати профілю краплі;

$a^2$  – капілярна стала;

$h$  – радіус кривизни профілю при вершині.

Крім того ця програма дозволяє знайти густину розплаву на межі рідина – газ, контактні кути змочування. Поверхневий натяг  $\sigma_{pg}$  з отриманих даних визначається за формулою (2.6):

$$\sigma_{pg} = \alpha^2 \cdot g \cdot \Delta\rho, \quad (2.6)$$

де  $\alpha^2$  – капілярна постійна;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $m^2/s$ ;

$\Delta\rho$  – різниця густини між рідкою та газоподібною фазами,  $kg/m^3$ .

Енергія адгезії  $W_\alpha$  (мДж/м<sup>2</sup>) визначається за рівнянням Дюпре:

$$W_\alpha = \sigma_{pg}(1 + \cos\theta), \quad (2.7)$$

Для досліджень використовували жароміцний корозійностійкий сплав СМ88. Вогнетривами слугували зразки форм на основі корунду, а в якості сполучного застосовували гідролізований етилсилікат та двох водних сполучних, а саме Remasol Premium Plus та кремнезоль JN-30. Випалювання вогнетривів на основі корунду проводили при температурі 1600 °С протягом двох годин. Експерименти для визначення міжфазових характеристик проводили в індукційній печі у вакуумі ( $P = 10^{-3}$  МПа). На підкладки зразків різної дослідної кераміки поміщали для дослідження метал (жароміцний сплав СМ88). Так як температура плавки жароміцного сплаву СМ88 складає 1450°С, зразки з металом нагрівали при температурі до 1600 °С. Заміри кута змочування заміряли за допомогою біноккулярного мікроскопу.

## 2.7. Матеріали і обладнання складнопрофільних виливків

Для дослідних плавок використовувався стандартний жароміцний корозійностійкий сплав на основі нікелю (СМ88) (таблиця 2.3). Кількість основних елементів та домішок визначали хімічним методом за стандартними методиками, мікролегувальні добавки рідкісноземельних металів контролювали спектральним методом з відносною похибкою  $\pm 0,001\%$ .

Таблиця 2.3.

Хімічний склад жароміцного корозійностійкого сплаву на основі нікелю

Сплав	Вміст елементів, % мас.														
	C	Cr	Co	Mo	Ti	Al	W	Nb	Fe	Hf	B	Ce	Si	P	S
CM88	0,9	15,6	10,2	2,0	4,2	3,8	5,9	0,2	4,1	0,2	0,07	0,01 5	0,10	0,00 4	0,00 3
Межі [56]	0,06 – 0,12	15,0 – 16,2	10,0 – 11,5	1,6– 2,3	4,2– 5,2	2,8– 3,3	4,7– 5,9	0,1– 0,2	3,7– 4,3	0,30 – 0,60	0,01– 0,16	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,00 8	≤ 0,00 8

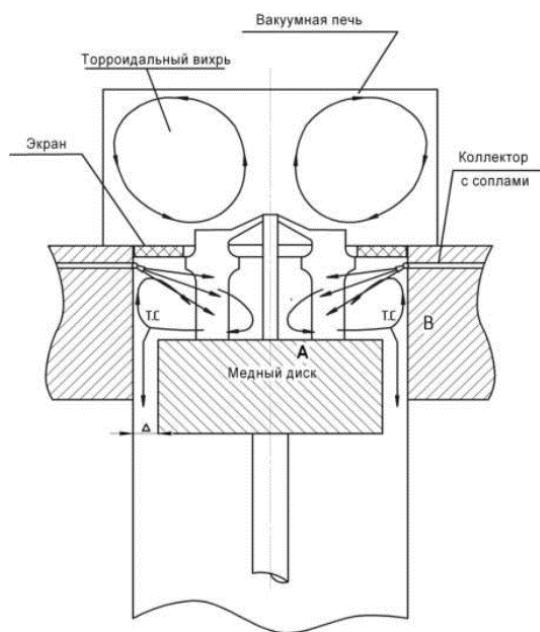
Плавку і заливку проводили в вакуумній печі VIM-25-175C вертикального типу, в якій реалізовано процес кристалізації згідно методу GCC (рисунок 2.11а) [57]. У даній установці місткість тигля для плавлення металу складала 15 кг. Для газового охолодження форм з розплавом використовували аргон чистотою 99,98%. Для забезпечення високого градієнта температур використовували надзвукові сопла  $M = 2,8$  з критичним діаметром сопел від 0,7 мм до 5,0 мм., які було зібрано в кільцевому колекторі. Сопла мали можливість змінювати напрямок подачі охолоджуючого газу та розміщуватися поряд, тобто на відстані від 45 до 75 мм від нижньої поверхні термоізоляційного екрану. Кут нахилу вісі сопел до низу від горизонтальної площини становить  $20^\circ$ . Застосування такого методу охолодження сприяло активізації процесу кристалізації розплаву. При цьому змінювався градієнт температури на фронті кристалізації порівняно з конвективним охолодженням у вакуумі завдяки присутності мідного кристалізатора (рис. 2.11 б). За рахунок щільного радіального розташування лопаток у поєднанні з вищою швидкістю охолодження процес спрямованої кристалізації для лиття лопаток ГТД може підвищити продуктивність порівняно з процесом Бріджмена-Стокбаргера в 18-20 рази (рис. 2.12).

Локальні значення параметрів процесу спрямованої кристалізації протягом плавок розраховували за розподілом температури в об'ємі виливків,



яка вимірювалась експериментально в п'яти точках вздовж осі виливки за допомогою вольфрам–ренієвих термопар. За технологією отримання лопаток турбін зі спрямованою структурою з кристалографічною орієнтацією [001] для кожного зразка в зону зародження кристала на дно керамічної форми було поставлено затравку зі сплаву Ni– 65% мас. W –35% мас. Час, необхідний для досягнення робочого вакууму на рівні  $7 \times 10^{-2}$  Па у камері перед початком процесу лиття після завантаження сировини, становив 2,0 хв.

Одержані зразки та виливки дослідних сплавів термообробляли у вакуумній установці фірми “TAV” (Італія). Для забезпечення швидкості охолодження за термообробки піч обладнана вентилятором, який спрямовує інертний газ на кошик з виливками [58, 59].



а



б

Рис. 2.12 – Схема потоків в зоні газового охолодження блока (а) і загальний вигляд мідного кристалізатора вакуумної установки VIM-25-175C (б)

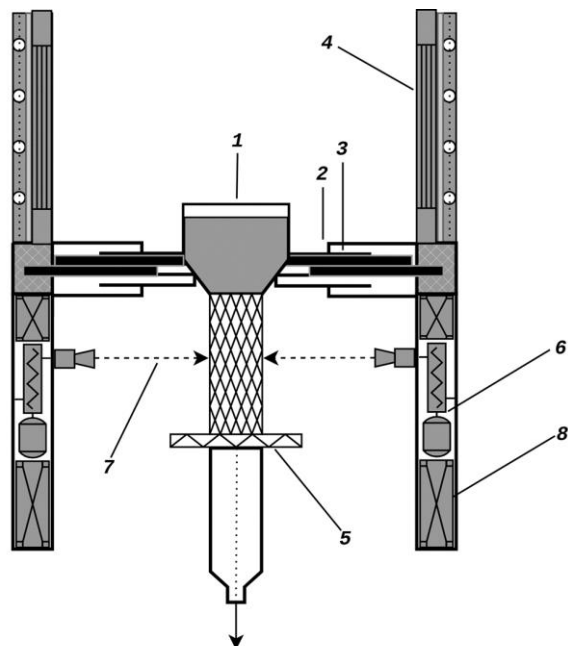


Рис. 2.13 – Схема ливарної установки VIM-25-175C: 1. Виливоч; 2. М'який теплозахисний екран; 3. Твердий теплозахисний екран; 4. Піч підігріву форм; 5. Кристалізатор; 6. Колектор аргону; 7. Струми аргону; 8. Зона охолодження

## 2.8. Методика досліджень макро- та мікроструктури, структурно-фазового стану дослідних зразків зі спрямованою структурою.

Мікроструктуру зразків, структурні особливості приповерхневої зони та глибину зони зразків сплаву та розподіл легувальних елементів між фазами вивчали за допомогою оптичного мікроскопу Neofot-2, растрового електронного мікроскопу Tescan Mira 3 LMU, основні характеристики якого наступні: просторова роздільна здатність: 1 нм @ 30 кВ, 2 нм @ 3 кВ; прискорююча напруга: 200 В – 30 кВ; робочий тиск в камері: режим високого вакууму  $\approx 9 \cdot 10^{-3}$  Па; режим низького вакууму 7 – 150 Па. Фазовий аналіз сплавів та параметри кристалічних решіток фаз визначали на установці ДРОН-3М ( $\text{CuK}\alpha$ -випромінювання,  $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 0,154187$  nm). Металографічні шліфи обробляли хімічним травленням за допомогою реактиву Марбле (хімічний склад: 4 г  $\text{CuSO}_4$ , 20 мл  $\text{HCl}$  та 20 мл  $\text{H}_2\text{O}$ ).

## 2.9. Методика визначення механічних та спеціальних властивостей зразків жароміцних сплавів зі спрямованою структурою.

Дослідження проводили на виплавлених стандартних зразках сплаву (рис.2.14).



Рис. 2.14. – Зовнішній вигляд дослідного зразка [1]

Короткочасну та тривалу міцність сплавів встановлювали на стандартних циліндричних зразках, після термічної обробки за стандартним режимом:  $1170 \pm 10^\circ\text{C}$ , 4 год., охолодження на повітрі;  $1050 \pm 10^\circ\text{C}$ , 4 год., охолодження на повітрі та  $850 \pm 10^\circ\text{C}$ , 16 год., охолодження на повітрі. з робочими частинами діаметром 5 та 10 mm відповідно і довжиною 25 mm при  $900^\circ\text{C}$ . Після механічних випробувань визначали макро- і мікроструктуру на голівці та у робочій зоні поблизу зламу на поперечних шліфах.

Дослідження втомної міцності виконували відповідно [60]. Після стандартної термічної обробки на поверхню дослідних зразків наносили двошарове електронно-променеове покриття на установці UE175: перший шар складу Co–Cr–Al–Y завтовшки 50...100 нм, другий шар – металеве покриття  $\text{ZrO}_2$  завтовшки 60...70 нм [61]. Після нанесення кожного шару виконували рекристалізаційний відпал при температурі  $1050^\circ\text{C}$  впродовж 2,5...3 годин у вакуумі.

Випробування на витривалість обраних методом випадкової вибірки лопаток турбіни ГТД проводили на спеціальному стенді УВЭ 10/5000 методом збудження резонансних механічних коливань профільної частини пера лопатки за консольного її затискання за хвостовик симетричним циклом напруження. За границю витривалості брали найбільше значення напруження, за якого напрацьовано базу випробувань без руйнування. Критерієм початку

руйнування лопатки для визначення руйнівального напруження (утворення втомної тріщини) є зниження власної частоти коливань більш ніж на 3 % від початкового значення. Кількість циклів, які напрацьовані лопаткою, визначали за частотою її коливань і тривалості випробувань. Амплітуду коливань периферійного перетину пера лопатки вимірювали за допомогою мікроскопа МПБ-2 кожні 30 хв.

База випробувань становила  $1 \cdot 10^7$  циклів з частотою 310...320 Hz і напруженнями від 160 до 260 МПа з кроком 20 МПа. Порізку зразків для досліджень шарів захисних покриттів здійснювали на відрізному станку фірми “Лесо” за спеціально розробленою методикою. Мікроструктуру вивчали за допомогою оптичного мікроскопа Neofot-3М, точність вимірювання 0,5...1 мм. Для вивчення корозійних властивостей відливали циліндричні зразки діаметром 8 мм, які піддавали термічній обробці за стандартним режимом:  $1170 \pm 10^\circ\text{C}$ , 4 год., охолодження на повітрі;  $1050 \pm 10^\circ\text{C}$ , 4 год., охолодження на повітрі та  $850 \pm 10^\circ\text{C}$ , 16 год., охолодження на повітрі. Розміри зразків визначали за допомогою мікрометра МК 50–1 з точністю  $\pm 5$  мкм. Досліджувані матеріали знежирювали шляхом триразового промивання в етиловому спирті або ацетоні. Після цього їх сушили на повітрі протягом 20 хв. Потім зважували на аналітичних терезах ВЛР-200 з точністю  $\pm 5$  мкг. У висушені корундові тиглі поміщали металеві зразки і засипали до верху «на конус» сумішшю солей 25% NaCl + 75% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Кількість цієї суміші (Q) розраховували за відомою формулою [62].

$$Q = h \cdot \rho (S_T - S_o), \quad (2.8),$$

де  $h$  – висота розплаву солі;  $\rho$  – густина солі (для даної суміші  $\rho = 2,5$  г/см<sup>3</sup>);  $S_T$  – площа внутрішнього перерізу дна тигля;  $S_o$  – загальна площа торця зразка, м<sup>2</sup>.

Тиглі зі зразками поміщали в металевий контейнер з кришкою, який виготовлений з жаростійкого сплаву типу ХН60ВТ (EI 868).

Випробування проводили при температурі 900 °С в розплаві солей протягом 30 годин в печі опору типу СНОЛ-2,5.1,6.1/9. Після цього зразки витягували з розплаву солей за допомогою пінцета і промивали під проточною водою протягом 15 хв. Очищені таким чином зразки потім кип'ятили протягом однієї години в термостійких склянках для відділення окалини і солі з їх поверхні. Знову промивали під проточною водою протягом 10 хв і сушили при температурі 120 °С протягом 10 хв. Остаточне видалення окалини з поверхні зразків проводили в розплаві наступного складу: 70 % NaOH, 25 % NaNO<sub>3</sub>, 5 % NaCl при температурі 450 °С, протягом 1,5 год. Після цього зразки виймали з тиглів, охолоджували і ретельно промивали розчином кальцинованої соди (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) протягом 15 хвилин. Остаточне зняття оксидної плівки з поверхні зразка проводили в розчині наступного складу: 20 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1,5 % HNO<sub>3</sub>, 2,5 % NaCl, решта дистильована H<sub>2</sub>O при кімнатній температурі протягом 3–5 хв. Після цього зразки сушили, остаточно знежирювали і зважували [63].

Стійкість сплавів до високотемпературної сольової корозії визначалася на підставі втрати маси і даних металографічних досліджень (глибина поширення корозії в метал). Після видалення продуктів корозії визначали масу зразків на аналітичних вагах з точністю до 0,0001 г. Величину питомої втрати маси розраховували за формулою:

$$q = \frac{m_0 - m}{S}, \quad (2.9),$$

де  $m_0$  – маса зразка до корозійного випробування,  $m$  – маса того самого зразка після видалення продуктів корозії,  $S$  – початкова площа поверхні зразка. Для розрахунку швидкості корозії використовували відому формулу [16]:

$$Vq = \Delta m / S \cdot \tau, \quad (2.10),$$

де  $Vq$  – середня швидкість корозії;  $\Delta m = m_0 - m_k$ ;  $m_0$  – початкова маса зразка;  $m_k$  – маса зразка після випробувань;  $S$  – загальна фронтальна площа корозійних пошкоджень;  $\tau$  – час витримки.

Глибину корозійних пошкоджень поверхні зразків вивчали за допомогою оптичного мікроскопа Neofot-3М. Глибину зовнішньої корозії, визначали напіврізницею початкового і кінцевого діаметрів зразку:

$$d = (d_0 - d_k)/2, \quad (2.11),$$

де  $d$  – глибина зовнішньої корозії;  $d_0$  – початковий діаметр зразку, м;  $d_k$  – діаметр зразку після випробувань, м.

Глибину внутрішньої корозії  $h$  визначали металографічним шляхом.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ ФОРМ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

#### 3.1 Визначення технологічних властивостей керамічних суспензій

Для приготування суспензій було обрано вогнетривкі наповнювачі – електрокорунд, пилоподібний кварц і дистен-силіманіт – матеріали, які найширше застосовуються при литті жароміцних сплавів для лопаток ГТД. В якості ЗК використовували гідролізований ЕТС і матеріали на водній основі -Remasol Premium Plus та Silica Sol JN-30. Останні два ЗК є готовими до використання, а ЕТС-40 додатково піддавали гідролізу. При цьому розраховували необхідну кількість води та розчинника (етилового спирту) за формулами, які запропоновано В.А. Озеровим [16]. Модуль розчину гідролізованого ЕТС становив 0,65, що відповідало типу Орг-2, вміст  $\text{SiO}_2$  в розчині – 18%.

Під час приготування суспензій контролювали їх умовну в'язкість віскозиметром ВЗ-4. Результати вимірювань в'язкості досліджуваних суспензій представлені в табл. 3.1. Консистенція суспензій підбиралася такою, щоб забезпечити рівномірне покриття нею моделі без утворення товстого шару чи надто тонкого. Як видно із отриманих результатів, що в'язкість суспензій на основі Remasol Premium Plus вища на 5-10 с в порівнянні з аналогічною з ЕТС. Різниця у в'язкості обумовлена тим, що сам зв'язувальний компонент Remasol Premium Plus має нижчу в'язкість ніж гідролізований ЕТС. Для приготування первинної суспензії з Remasol вводили 65% мас. пилоподібного кварцу, а для приготування - з ЕТС кількість наповнювача складала 55% мас. Суспензії з водними зв'язувальними компонентами хоча і мають вищу умовну в'язкість, проте введення більшої кількості наповнювача забезпечує оптимальне співвідношення змочування поверхні моделі з найкоротшим часом стікання її надлишків з поверхні моделі.

Таблиця 3.1

## Результати досліджень суспензій на в'язкість

Суспензія		В'язкість суспензії по ВЗ-4, с		
Наповнювач	Зв'язувальний компонент	для 1го шару	для 2го шару	для 3-5 шарів
Електрокорунд білий	ETC	35	24	18
	Remasol Premium Plus	45	34	27
	Silica Sol JN-30	38	30	25
Пилеподібний кварц	ETC	46	42	35
	Remasol Premium Plus	53	50	42
	Silica Sol JN-30	48	45	36
Порошкоподібний дистен-силіманіт	ETC	50	41	30
	Remasol Premium Plus	55	50	41
	Silica Sol JN-30	52	44	34

Покривну здатність суспензій оцінювали візуально для двох типів модельних матеріалів: воскових і пластикових. Рідкі суміші на основі ETC демонстрували найкращу покривну здатність для всіх видів моделей, тоді як суспензії, що містили Remasol Premium Plus, проявили дещо гіршу дію. Наряду з цим суміші, які містили кремнезоль, проявили найгіршу покривну здатність. При чому це спостерігалось при нанесенні покриття на воскові моделі. В деяких випадках не забезпечувалась рівномірність нанесення першого шару (рис. 3.1). Це призводило до формування на зразках видимих меж сполучення першого і другого шарів (рис. 3.2). На нашу думку, даний факт пов'язаний з процесами змочування кремнезолью моделей на основі воску. Для підвищення розтікання суспензії, тобто зменшення кута



змочування, на практиці додають різні поверхнево-активні речовини.

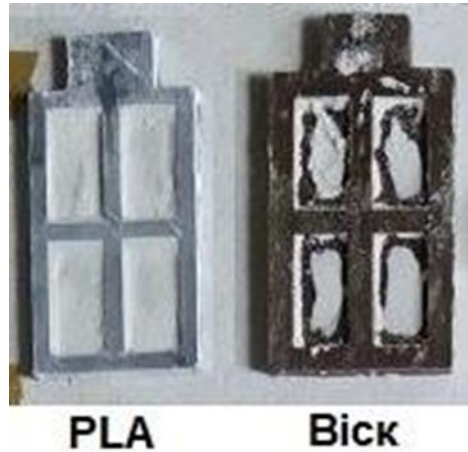


Рис. 3.1 – Моделі після нанесення першого шару суспензії з кремнеземом

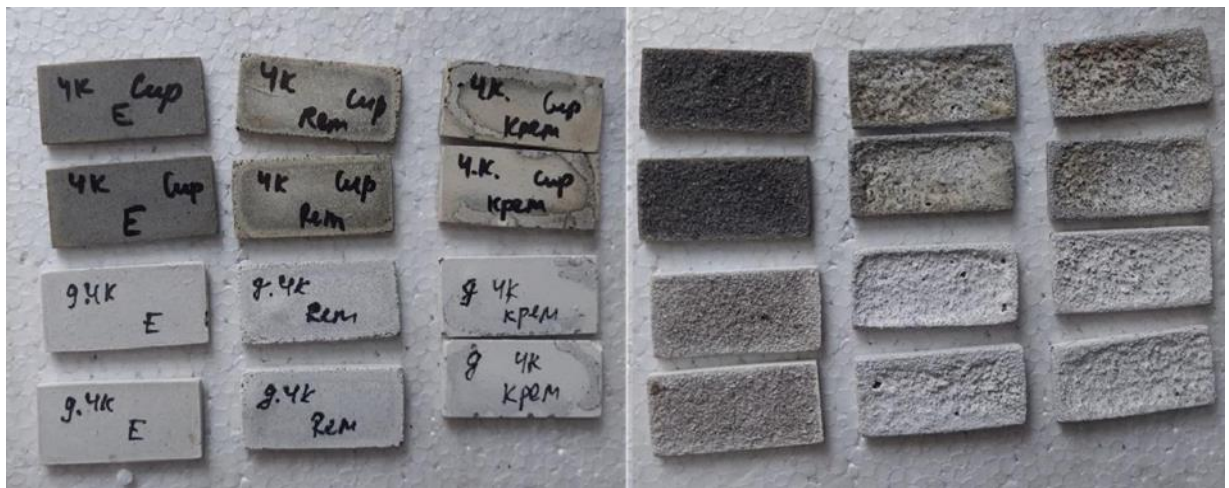


Рис. 3.2 – Дослідні зразки, одержані за восковими моделями

Крім того показано, що живучість суспензій на основі ЕТС незалежно від вогнетривкого наповнювача склала 5-6 діб, тоді як рідкі суміші зі зв'язувальними компонентами на водній основі зберігали свої властивості протягом 30 діб [64].

### 3.2 Визначення властивостей керамічних оболонок

В роботі проведені експериментальні дослідження по визначенню міцності на вигин, на розтяг та газопроникності дослідних зразків керамічних оболонкових форм [49].

Процес обсіпання моделей, які оброблені суспензіями, що містили кварц, проводили кварцовим піском, а електрокорунд – зернистим електрокорундом. Що стосується дистен-силіманіту, то використовували корунд нормальний і шамот, через відсутність дистен-силіманітового піску з фракцією більше 0,16 мм. Для нанесення першого шару застосовували фракції зернистих вогнетривів 0,16-0,20 мм, для другого – 0,200- 0,315 мм, а для 3-5-го шарів – 0,315 – 0,630 мм. Загальний склад керамік вказаний в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

## Загальний склад дослідних керамік

Зв'язувальний компонент	Наповнювач суспензії	Обсіпка
ETC	Електрокорунд білий, F400	Електрокорунд білий
Remasol Premium Plus		
Silica Sol JN-30		
ETC	Пилоподібний кварц, ПКМ-050-80	Кварцовий пісок
Remasol Premium Plus		
Silica Sol JN-30		
ETC	Порошкоподібний дистен-силіманіт, КДСП	Електрокорунд нормальний
Remasol Premium Plus		
Silica Sol JN-30		
ETC		Вогнетривкий шамот
Remasol Premium Plus		
Silica Sol JN-30		

Сушіння керамік з ETC проводили у вологому повітрі (відносна вологість 75%), перший шар – протягом 6 год., другий-п'ятий – 3 год., а після шостого нанесення – протягом 24 год. Щодо кераміки зі ЗК Remasol та Silica Sol JN-30, то для її сушіння використовували сухе повітря (відносна

вологість 50 %). Перший шар – при температурі 20 °С у спокійній атмосфері протягом 4-5 год., опорні шари при – 25 °С і при русі повітря 1 м/с – 2-3 год..

Модельні матеріали з кераміки видаляли наступним чином: віск витоплювали у ємності з гарячою водою, а пластик випалювали в лабораторних сушильних пічках. Для досліджень відбирали зразки, що не мали тріщин, вм'ятин, сколів (рис. 3.3). Їх частину прожарювали в муфельній печі за температури 1050 °С.



Рис. 3.3 – Плоскі керамічні зразки для випробування на вигин

Міцність на вигин дослідних зразків кераміки визначали за допомогою приладу моделі 04116 за триточковою схемою і розраховували за формулою (2.3) (див. розділ 2). При цьому фіксували навантаження, при якому руйнувався зразок, вимірювали його ширину і товщину. Показники міцності на вигин досліджуваних керамік в сирому стані та після прожарювання наведено в табл. 3.3 та рис. 3.4-3.6.

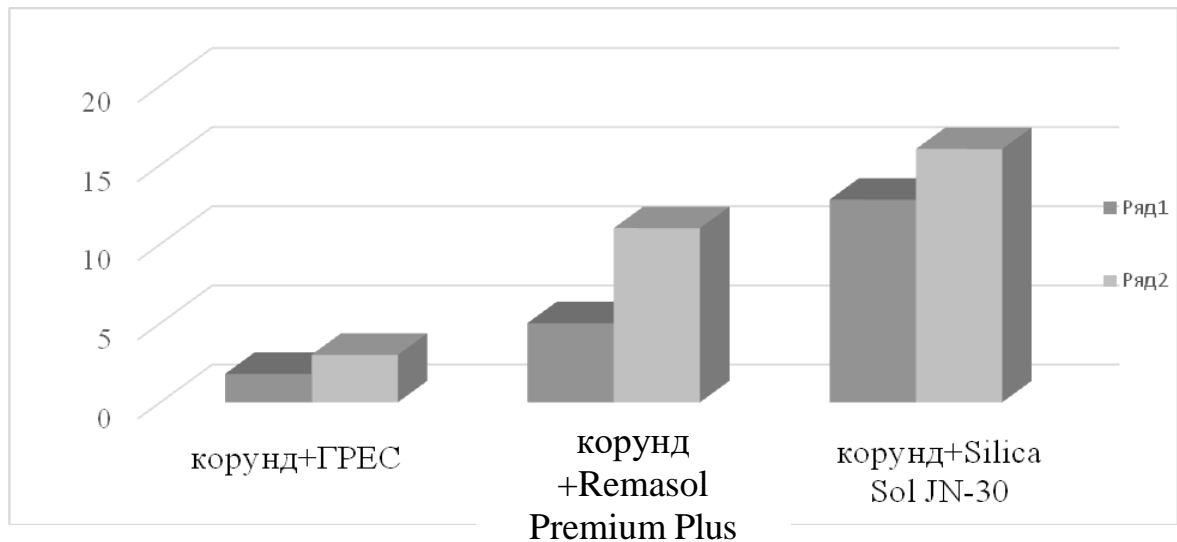
$\sigma_{\text{виг}}, \text{МПа}$ 

Рис. 3.4 – Міцність на вигин зразків керамічної форми на основі електрокорунду з різними в'язучими в сирому (а) і прожареному (б) станах

Таблиця 3.3

#### Результати випробувань міцності на вигин зразків кераміки

Складові дослідних керамік			$\sigma_{\text{виг}}, \text{МПа}$	
Зв'язувальний компонент	Наповнювач суспензії	Обсипка	В сирому стані	Після прожарювання
ETC	Електрокорунд білий, F400	Електрокорунд білий	1,87	1,34
Remasol Premium Plus			3,34	12,2
Silica Sol JN-30			1,43	1,14
ETC	Пилоподібний кварц, ПКМ-050-80	Кварцовий пісок	1,42	0,36
Remasol Premium Plus			1,23	1,30
Silica Sol JN-30			0,59	0,65
ETC	Порошкоподібний дистен-силіманіт, КДСП	Електрокорунд звичайний	1,58	0,90
Remasol Premium Plus			3,14	7,02
Silica Sol JN-30			3,80	3,46

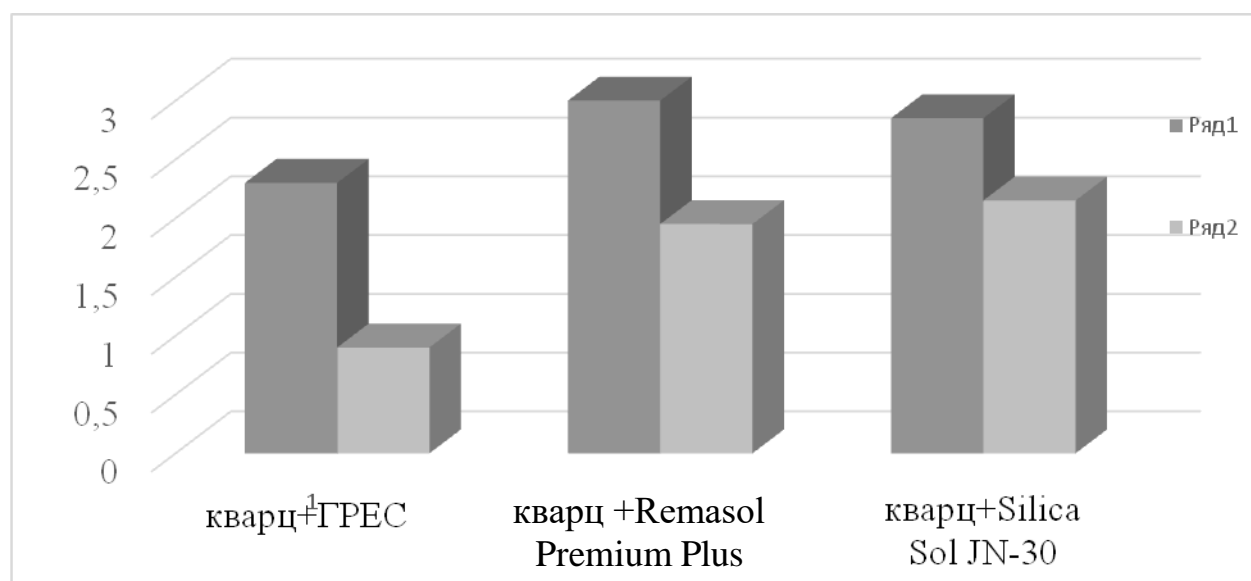
$\sigma_{\text{виг}}, \text{МПа}$ 

Рис. 3.5 – Міцність на вигин (середнє значення) зразків керамічної форми на основі кварцу з різними ЗК в сирому (а) і прожареному (б) станах

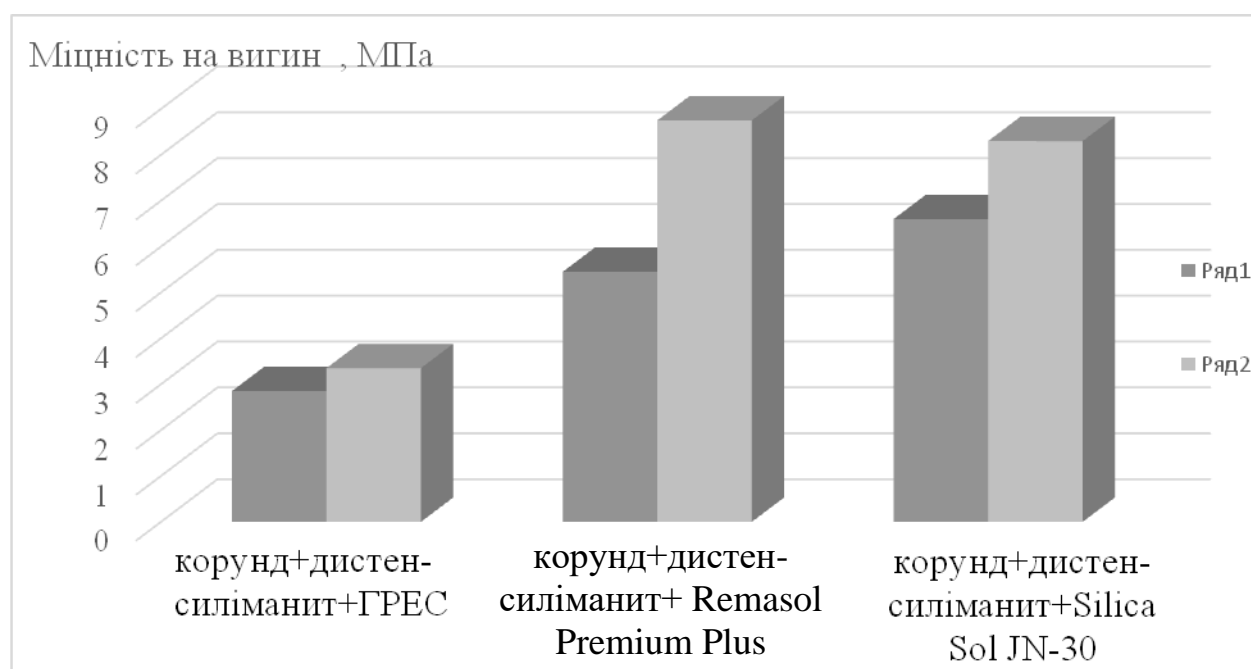
 $\sigma_{\text{виг}}, \text{МПа}$ 

Рис. 3.6 – Міцність на вигин зразків керамічної форми на основі електрокорунду+ дистен-силіманіт, з різними ЗК в сирому (а) і прожареному (б) станах

Встановлено, що кераміки на основі електрокорунду з водними ЗК мають високі показники міцності в сирому стані (3,8-6,1 МПа та 5,3-7,5 МПа), що в 2,5-3,5 рази вище, ніж матеріали на основі ЕТС. Після прожарювання міцність кераміки ЗК зросла більше ніж у 2 рази і склала 10,1-12,0 МПа і 13,2-19,3 МПа, відповідно. Щодо міцності кераміки з електрокорунду та ЕТС, то вона також підвищилася, але залишилися на невисокому рівні (2,4-3,7 МПа).

Кераміки на основі кварцу характеризувалися невисокою міцністю в сирому стані: з ЕТС на рівні 1,7-2,9 МПа, з Remasol Premium Plus – 1,23-1,30 МПа, з Silica Sol – 1,9-3,8 МПа. Видно, що міцність керамік з водними ЗК в середньому на 20% вища, ніж з ЕТС. Однак після прожарювання характеристики міцності цих матеріалів зменшилися. Зразки з ЕТС мали міцність 0,6-1,2 МПа, з водними ЗК відповідно – 1,4-2,5 МПа, – 1,8-2,5 МПа. Це, напевно, пов'язано з поліморфними перетвореннями кварцу, які відбуваються при температурах 573°C і 870°C, що і призводять до різкої зміни об'єму. Останнє викликає формування мікротріщин у зразках, що відповідно ведуть до зменшення міцності кераміки на основі кварцу. Підтвердженням цього факту є різка зміна форми кривої 1 на рис. 2.8. Видно, що кут нахилу кривої лінійного розширення кварцу приблизно вдвічі більший за його значення для електрокорунду і дистен-силіманіту.

Також показано, що міцність керамік з дистен-силіманітовим наповнювачем відрізняється як в залежності від ЗК, так і від зернистої обсіпки. Матеріали, які виготовлені з нормального електрокорунду, мали вищу міцність, ніж кераміки з шамотом. Так, для них з дистен-силіманітовим наповнювачем міцність в сирому стані з Remasol склала 3,8-7,1 МПа і з Silica Sol 5,1-8,1 МПа відповідно. Це приблизно в 2 рази вище, ніж для кераміки, яка містила ЕТС. Слідуює відмітити, що після прожарювання міцність з водними ЗК зросла до 6,4- 11,1 МПа і 6,6-10,0 МПа, відповідно, а з ЕТС знизилася до 1,4-2,8 МПа.

Таким чином, проведені дослідження показали, що кераміки з ЕТС мали невисоку міцність. Це, напевно, пов'язано з використанням розчину типу орг-

2, а не орг-1. Відомо, що перший забезпечує вищу міцність, але потребує аміачного середовища для сушіння. Поряд з цим кераміка з Silica Sol в більшості випадків має вищу міцність ніж з Remasol, хоча обидва ЗК складаються з колоїдного кремнезему. На нашу думку, це залежить від концентрації кремнезему. У кремнезолі Silica Sol JN-30 вона набагато вища. Тому кераміки з Remasol в більшості випадків мають вищу міцність на вигин як в сирому, так і прожареному стані в порівнянні з матеріалами на основі ЕТС [65].

Міцність на розтяг визначали на плоских зразках-вісімках (рис. 3.7) згідно методики, яку представлено раніше. Спочатку визначали навантаження при якому відбувалося руйнування зразка, а потім вимірювали його товщину і розраховували міцність при розриванні. Одержані результати представлено в табл. 3.4.



Рис. 3.7 – Керамічні зразки для випробування на розтяг

В результаті проведених досліджень встановлено, що найнижчу міцність на розтяг мають кераміки на основі кварцу. Однак, після прожарювання матеріал з ЕТС втратив свої міцнісні характеристики, а з водними ЗК – не суттєво підвищив.

## Результати дослідів визначення міцності керамік на розтяг

Складові дослідних керамік			$\sigma_p$ , МПа	
Зв'язувальний компонент	Наповнювач суспензії	Обсипка	В сирому стані	Після прожарювання
ETC	Електрокорунд білий, F400	Електрокорунд білий	1,87	1,34
Remasol Premium Plus			3,34	12,2
Silica Sol JN-30			1,43	1,14
ETC	Пилеподібний кварц, ПКМ-050-80	Кварцовий пісок	1,42	0,36
Remasol Premium Plus			1,23	1,30
Silica Sol JN-30			0,59	0,65
ETC	Порошкоподібний дистен-силіманіт, КДСП	Електрокорунд чорний	1,58	0,90
Remasol Premium Plus			3,14	7,02
Silica Sol JN-30			3,80	3,46

Кераміка, яка складалася з корунду та ЕТС в сирому стані мала більшу міцність, ніж в прожареному і вищу, ніж з кремнезолью Silica Sol. При цьому показник міцності кераміки з Remasol в сирому стані в 1,7 рази вищий, ніж з ЕТС, а після прожарювання – у 3,5 рази.

Крім того встановлено, що міцність на розрив кераміки, яку виготовлено з суміші дистен-силіманіту і ЕТС в сирому стані приблизно на 20 % менша, ніж корунду з ЕТС. Після прожарювання її міцність понизилася ще на 40%. Однак матеріал, що містив дистен-силіманіт і Remasol в сирому стані в два рази міцніший, ніж з ЕТС. Також після його прожарювання відбулося зростання цієї характеристики більше ніж у два рази і досягло значення 7 МПа. Що стосується кераміки з дистен-силіманіту і кремнезолью, то її показники міцності як в сирому, так і прожареному станах майже однакові.



Проведені дослідження показали, що кераміки на основі електрокорунду, дистенсиліманіту з ЗК Remasol в сирому стані мають міцність при розтягуванні  $> 3,0$  МПа. Тому їх можна рекомендувати для виготовлення оболонкових форм за пластиковими моделями. Достатній рівень міцності кераміки запобігатиме утворенню тріщин через розширення моделей при їх випалюванні, які створюють розтягуючі навантаження на стінки оболонки.

Слід відзначити, що високі показники міцності на вигин не завжди відповідають високим показникам цієї характеристики при розтягуванні. Однак спостерігається залежність між кераміками, які виготовлено на етилсилікаті і водних ЗК. Перші проявляють нижчі показники обох видів міцності.

Дослідження газопроникності вивчали шляхом пропускання  $2000 \text{ см}^3$  повітря при кімнатній температурі через зразок матеріалу, який знаходився в спеціальній гільзі між резиновими кільцями. Її вимірювали тільки на прожарених зразках, тому що в сирому стані керамічні форми не використовуються (рис. 3.8).

Значення газопроникності  $\Gamma$  (од.) визначали за допомогою відомої формули:

$$\Gamma = \frac{V \cdot h}{F \cdot P \cdot \tau}, \quad (3.1)$$

де  $V$  – об'єм повітря, яке пройшло через зразок,  $\text{см}^3$ ;

$h$  – товщина зразка, см;

$F$  – площа поперечного перерізу зразка,  $\text{см}^2$ ;

$P$  – тиск повітря перед зразком, см. вод. ст.;

$\tau$  – час, протягом якого через зразок пройшло  $V \text{ см}^3$  повітря, хв.

Оскільки кількість повітря і діаметр зразка є постійними для всіх випробувань, то формула (3.1) набуває наступного вигляду:

$$\Gamma = \frac{110 \cdot h}{P \cdot \tau}. \quad (3.2)$$



Рис. 3.8 – Керамічні зразки для випробування газопроникності

Результати досліджень представлено в табл. 3.5.

Встановлено, що газопроникність керамік з ЕТС має дуже низькі показники, що пов'язано з їх щільною упаковкою. Наряду з цим корундові матеріали, які виготовлено з використанням водних ЗК і сферичних частинок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , проявили в два рази вищу газопроникність. Щодо кварцової кераміки з водними ЗК, то ця характеристика в 1,8 та 1,4 рази вища ніж з ЕТС. Матеріали, які було отримано з дистенсиліманіту і водного ЗК, мають значення  $> 10$  одиниць, тоді як подібна кераміка з ЕТС -  $< 2$  одиниць.

При перетворенні  $\alpha$ -кварцу в  $\alpha$ -кристоболіт через  $\alpha$ -тридіаніт протікає глибока структурна перебудова, яка супроводжується значним збільшенням елементарної комірки. При цьому об'єм матеріалу збільшується на 15 % і відповідно проходить зменшення щільності (рис. 3.9) [66].

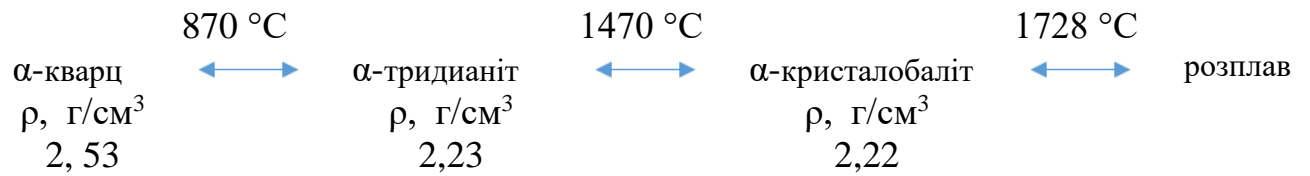


Рис.3.9 – Схема фазових перетворень компонентів керамічної форми в залежності від температури

Таблиця 3.5

Газопроникність різних керамік

Зв'язувальний компонент	Наповнювач суспензії	Обсипка	Товщина, см	Тиск, см.вод.ст.	Час, хв.	Газопроникність, од
ETC	Електрокорунд білий, F400	Електрокорунд білий	0,31	4,8	0,7	1,66
Remasol Premium Plus			0,32	5,7	3,27	3,13
Silica Sol JN-30			0,33	4	0,68	3,13
ETC	Пилоподібний кварц, ПКМ-050-80	Кварцовий пісок	0,36	4,2	0,66	2,46
Remasol Premium Plus			0,35	5,4	3,23	4,35
Silica Sol JN-30			0,32	5,2	2,67	3,42
ETC	Порошкоподібний дистен-силіманіт, КДСП	Електрокорунд нормальний	0,33	5,6	3,41	1,90
Remasol Premium Plus			0,34	5,4	2,83	13,42
Silica Sol JN-30			0,34	5,4	1,6	10,20

Виходячи з одержаних даних можна заключити, що величина газопроникності кераміки з водними ЗК є достатнім показником для КО, які використовуються в процесах лиття.

### 3.3 Порівняння механізмів сполучення частинок вогнетриву

Для пояснення підвищених показників міцності керамік зі ЗК на водній основі вивчали механізми з'єднання часток вогнетриву. Відомо, що водні колоїдні розчини кремнезему містять силанольні групи  $\equiv \text{Si} - \text{OH}$ , які поліконденсуються з утворенням міцних силоксанових зв'язків, наприклад,  $\equiv \text{Si} - \text{O} - \text{Si} \equiv$ . Останні і взаємодіють з вогнетривкими оксидами. На рисунку 3.10 представлено принципову схему з'єднання. Під час сушіння відбувається видалення води, і золь переходить у гель. При цьому відбувається скорочення відстаней між частинками та формування зв'язків дальнього порядку. Таким чином кремнезем зв'язує частинки наповнювача, а потім утворює аморфний кремнезем.

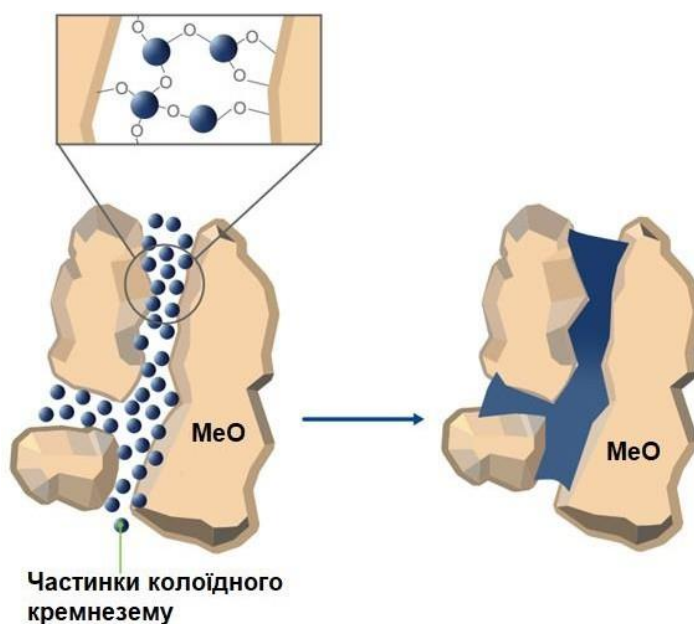


Рис. 3.10 – Схема з'єднання вогнетривких оксидів кремнезолом

Етилсилікат набуває зв'язувальних властивостей лише після гідролізу, тобто коли етоксильні групи заміщаються гідроксильними. Наприклад, гідроліз мономеру (а) та пентамеру (б) протікає за наступними хімічними реакціями (рис. 3.11) [16]:

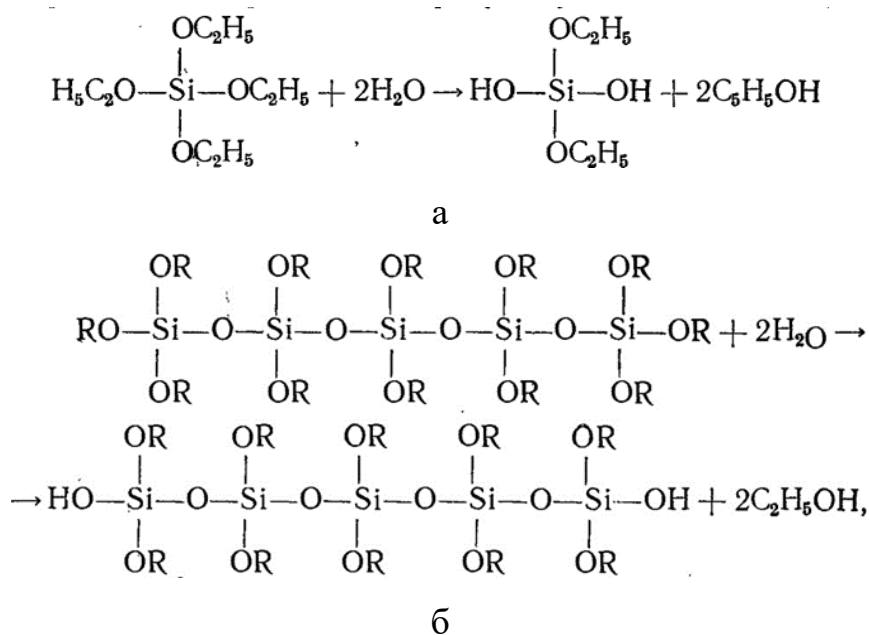


Рис. 3.11 – Хімічна реакція гідролізу етилсилікату: мономеру (а) та пентамеру (б), де R - радикал C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>.

Після гідролізу протікає поліконденсація, тобто відбувається об'єднання молекул, утворених із мономерів та пентамерів (рис. 3.12) [22]:

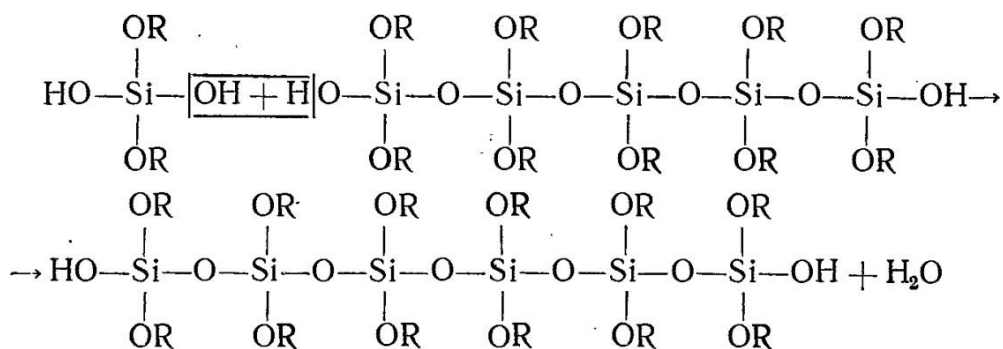


Рис. 3.12 – Хімічна формула поліконденсації гідролізу етилсиліката

В реальних умовах ступінь гідролізу не досягає 100 %, тому що етилсилікат не повністю розчиняється водою. В зв'язку з цим, для проведення даного процесу використовують спирт або ацетон. Проте навіть в таких умовах протікання реакції гідролізу залежить від кількості води і присутності кислот. ЕТС після гідролізу гідратований кремнеземом і в розчині присутні етоксильні групи, тому не між всіма атомами кремнію утворюються зв'язки з

вогнетривкими оксидами. Це пов'язано з тим, що дані кераміки мають нижчі міцнісні властивості, ніж кераміки на водній основі. [67]

### 3.4. Вибір пластика для 3D - друку моделей керамічних оболонкових форм

Для проектування та розробки моделей керамічних оболонкових форм визначали основні параметри, яким має відповідати готовий виріб. В результаті було використано технології 3D-друку і брали до уваги температурний діапазон обробки обраного матеріалу, що є важливим для подальшого використання в технології ЛВМ. Відомо, що при 3D-друку у матеріалі протікають фізичні процеси, контроль яких дав змогу отримати вироби, які відповідають ливарним стандартам [68]. Відомо, що полілактид (PLA) застосовується в якості вихідного матеріалу для 3D-друку за технологією FDM, тобто для моделювання методом пошарового наплавлення. Він є складним полієфіром, ланцюг якого складається з декількох молочних кислот (рис. 3.13). Це безбарвний прозорий матеріал, щільність якого 1,25 кг/дм<sup>3</sup>, температура скловання – від 50 °С до 58 °С, плавлення – від 170 °С до 230°С, розчинення ~ 250 °С.



Рис. 3.13 – Хімічна формула полілактиду

PLA отримують з кукурудзи або цукрових буряків. Він повністю біорозкладний, безпечний та екологічно чистий продукт. Під час роботи при нагріванні PLA видає напівсолодкий запах. Завдяки цим характеристикам полілактид є хорошим матеріалом для використання у закритих приміщеннях. Низький ступінь його деформації сприяє правильному друку моделі і забезпечує високу роздільну здатність. Це дозволяє створювати моделі більшої геометричної складності, ніж при використанні ABS. В даному випадку для швидкого затвердіння виробів та досягнення вищої якості друку використовували вентилятор. Крім полілактиду в роботі застосовували ABS пластик, який отримано з продуктів нафтової переробки. Через високу температуру плавлення останнього використовували платформи для друку з підігрівом. Це дозволило забезпечити адгезію шарів, допомогло уникнути скручування кутів, та виготовити моделі деталей, що піддаються дії високих температур. В процесі обробки готових виробів з ABS пластику та пом'якшення їх поверхні використовували ацетон. В таблиці 3.6 наведено фізичні характеристики PLA і ABS пластиків.

Таблиця 3.6

## Фізичні характеристики PLA і ABS пластиків

Фізичні властивості	PLA	ABS
Густина, г/см <sup>3</sup>	1.25	1.05
Межа міцності на розрив, МПа при 23 °C	28	30
Температура розм'ягчення, °C	~ 60	~ 110
Температура плавлення, °C	~ 180	~ 220
Температура екструзії, °C	~ 190-200	~ 220

На основі попередніх досліджень [40, 69] та аналізу технологічних характеристик різних модельних пластиків показано, що для виготовлення моделей виливків деяких складових газотурбінних двигунів було обрано полілактид (табл. 3.7). Цей матеріал є одним із найпоширеніших термопластиків, оскільки складається з полімеру молочної кислоти. Його виробляють з кукурудзи та цукрового очерету. Він має ряд переваг у

порівнянні з іншими, а саме: низькі температури плавлення, кипіння та густину (табл. 3.6). В зв'язку з вище сказаним, а також з економічною складовою в процесі ремонту складнопрофільних деталей з жароміцних сплавів, нами було використано полілактид для 3D-друку.

Таблиця 3.7

Фізико-механічні властивості полілактиду при температурі 23 °С.

Густина, г/см <sup>3</sup>	1,22-1,26
Межа текучості при розтягуванні, МПа	60,0-77,0
Міцність при розтягуванні, МПа	53,0
Міцність на вигин, МПа	55,3
Модуль пружності при розтягуванні, МПа	3500
Відносне подовження при розтягуванні, %	3,8-4,0
Модуль пружності при вигині, МПа	2300-2800
Ударна в'язкість по Шарпі (з надрізом), кДж/м <sup>2</sup>	5,2-7,3
Твердість за Роквеллом	R70 - R90
Водопоглинання (рівноважний, при зануренні), %	0,3 - 4,0
Типова усадка, %	0,01 - 0,05

Під час виготовлення пластикової форми детально опрацьовували кожен її елемент, визначали точні розміри всіх деталей, зокрема шаблонів і порожнин. При цьому враховували ключові конструктивні параметри, а саме усадку матеріалу. Це пов'язано з тим, що розміри пластикової деталі за час від моменту її виготовлення на 3D-принтері, до моменту коли вона стає стабільною ще незначно змінюються. Тому контролювали безперервну усадку, тобто постусадку та її зміну за рахунок поглинання вологи.

Проведено експериментальні дослідження усадки пластикових моделей при зберіганні для подальшого використання в процесі виготовлення керамічних оболонкових форм. Методику її визначення представлено в розділі 2, а отримані результати показано на рисунку 3.14 та додатку В. Видно, що



максимальне відхилення від розмірів деталей склало  $\sim 0,4\%$ . При цьому встановлено, що зміна параметрів усадки спостерігаються з другого по п'ятий день, а на восьмий-дев'ятий вона стабілізується. Крім того показано, що дана характеристика розподіляється по площині дослідних пластикових зразків. Отримані результати дали можливість розробити технологічну інструкцію одержання керамічних оболонкових форм з використанням пластикових моделей.

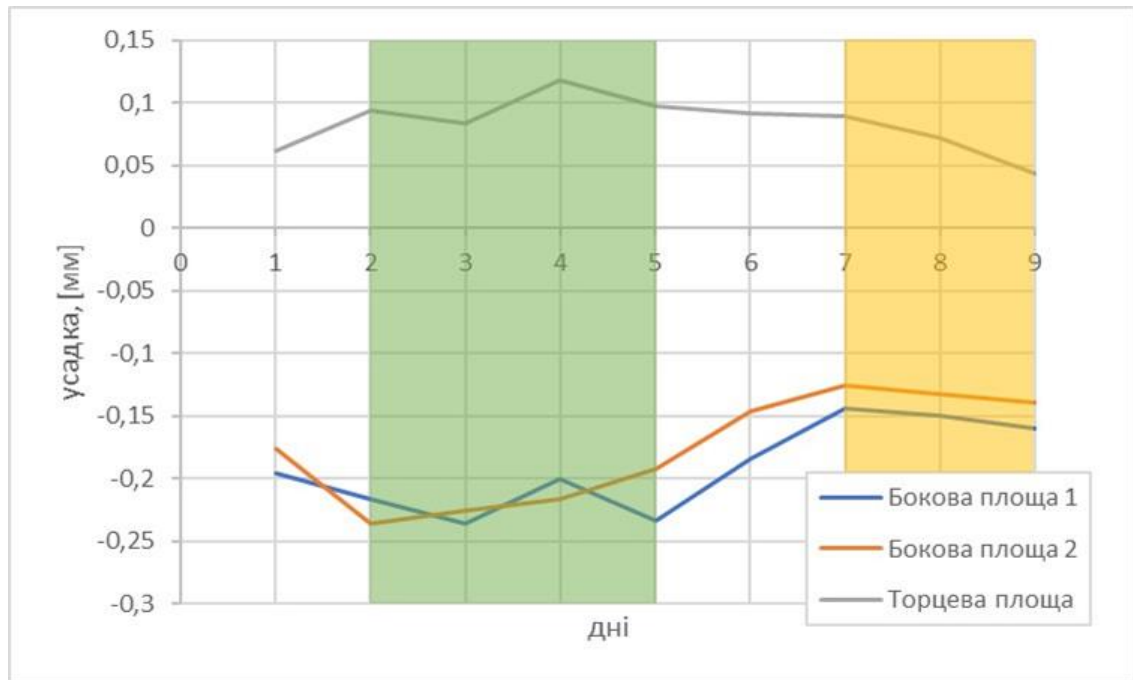
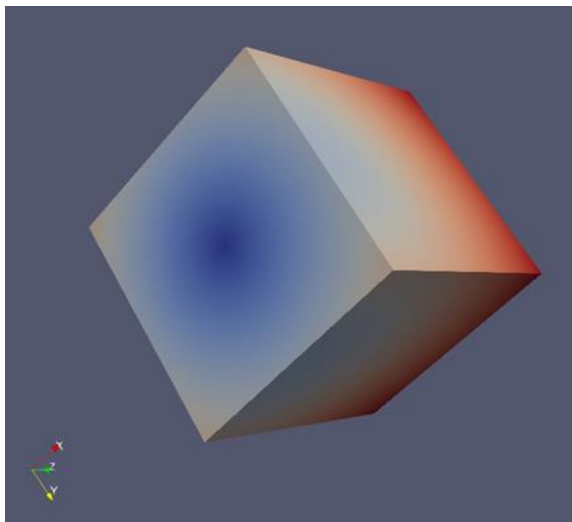
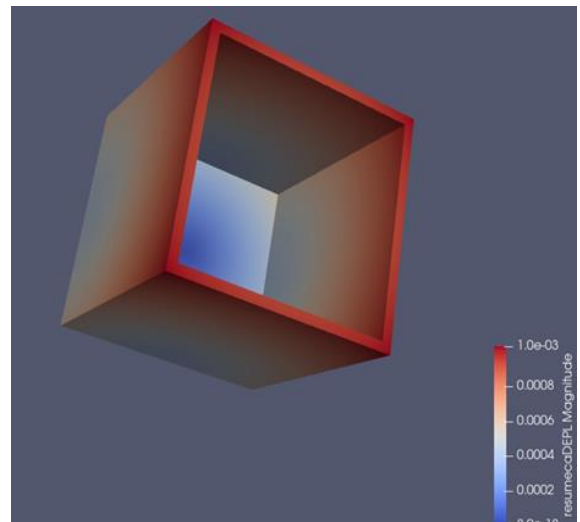


Рис. 3.14 – Залежність усадки полілактиду від часу зберігання пластикових моделей



а



б

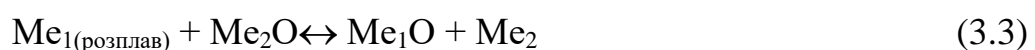
Рис. 3.15 – Розподіл усадки за площиною дослідних кубиків

Згідно даних виробника та експериментальних досліджень PLA-пластик має незначну усадку, яка зазвичай становить близько 0,3-0,5 %. Такий низький її рівень дає можливість рахувати полілактид оптимальним матеріалом для 3D-друку та виготовлення деталей, де потрібна висока точність. Оскільки пластикові моделі складнопрофільних виливків (наприклад, лопаток ГТД) конструктивно мають ребра жорсткості, отвори і виступи, то це також приводить до очікуваного результату.

### **3.5. Міжфазна взаємодія в системі вогнетривкий матеріал форми – жароміцний сплав.**

Відомо, що в склад жароміцних сплавів на нікелевій основі входять хімічні елементи, які взаємодіють з киснем повітря і утворюють оксидні плівки. Тому для їх захисту необхідно проводити плавку і заливання форм у вакуумі або захисній інертній атмосфері. При цьому шихта, що використовується при їх виплавці, не повинна містити шкідливих домішок, які приводять до погіршення експлуатаційних характеристик деталей [70]. Наряду з цим керамічна форма також має володіти не тільки механічною міцністю, вогнетривкістю, високою розмірною точністю, але і хімічною інертністю до металу. Для підтвердження вище сказаного було досліджено міжфазну взаємодію в системі жароміцний розплав – керамічна форма з водним ЗК у вакуумі  $P = 10^{-2}$  Па.

На міжфазній границі між рідким жароміцним сплавом та керамікою при його контакті і кристалізації часто протікають хімічні реакції, що приводять до утворення газоподібних або конденсованих продуктів взаємодії. Крім того деякі елементи, які не утворюють газоподібних оксидів, реагують з вогнетривками наступним чином:



У багатьох випадках вогнетриви містять домішки (Na, K), які хімічно взаємодіють із розплавленим металом, що приводить до його забруднення. Часто продукти хімічних реакцій концентруються на поверхні вогнетриву, або відшаровуються через різницю коефіцієнтів термічного розширення, в результаті це перешкоджає подальшій взаємодії. Утворення газоподібних продуктів може зміщувати рівновагу реакції між металом і оксидом, що призведе до дифузії кисню з вогнетриву в розплав [71].

Відомо, що дослідження адгезійної взаємодії вогнетривких матеріалів з розплавами є одним із критеріїв оцінки їхньої дії. Тому вивчення впливу температури на поверхневий натяг рідкого сплаву (СМ88) та контактних кутів змочування вогнетривів у вакуумі дозволяє правильно його вибрати і видати рекомендації щодо умов експлуатації.

В роботі для оцінки цих характеристик використовували метод лежачої краплі (див. розд. 2). На рисунку 3.16 представлено вигляд зразків після проведених експериментів.



а



б

Рис. 3.16 – Зовнішній вигляд зразків після випробувань а – ГрЕС;  
б – Remasol

В результаті проведених експериментів отримано емпіричні рівняння поверхневого натягу та густини розплаву на основі нікелю в температурному інтервалі від 1400 °С до 1700 °С:

$$\sigma_{\text{pg}} = 1795 - 0,31 (t - t_{\text{пл}}) \quad (3.4)$$

$$\rho_{\text{pg}} = 7,99 - 8,71 \cdot 10^{-4} (t - t_{\text{пл}}) \quad (3.5)$$

Представлено також температурні залежності контактних кутів змочування та роботи адгезії (табл. 3.8 та рис. 3.17).

Таблиця 3.8

Контактні кути змочування та роботи адгезії дослідних керамік при різних температурах

№ зразку	T, °C	θ, гр.	Wa, мДж/м <sup>2</sup>
1. Корунд + ГрЕС	1400	132	630
	1500	125	790
	1600	105	1200
	1700	50	2500
2. Корунд + Рімасол	1400	131	605
	1500	122	703
	1600	110	1168
	1700	65	2420
3. Корунд+ кремнезоль	1400	128	610
	1500	120	708
	1600	118	1250
	1700	55	2450

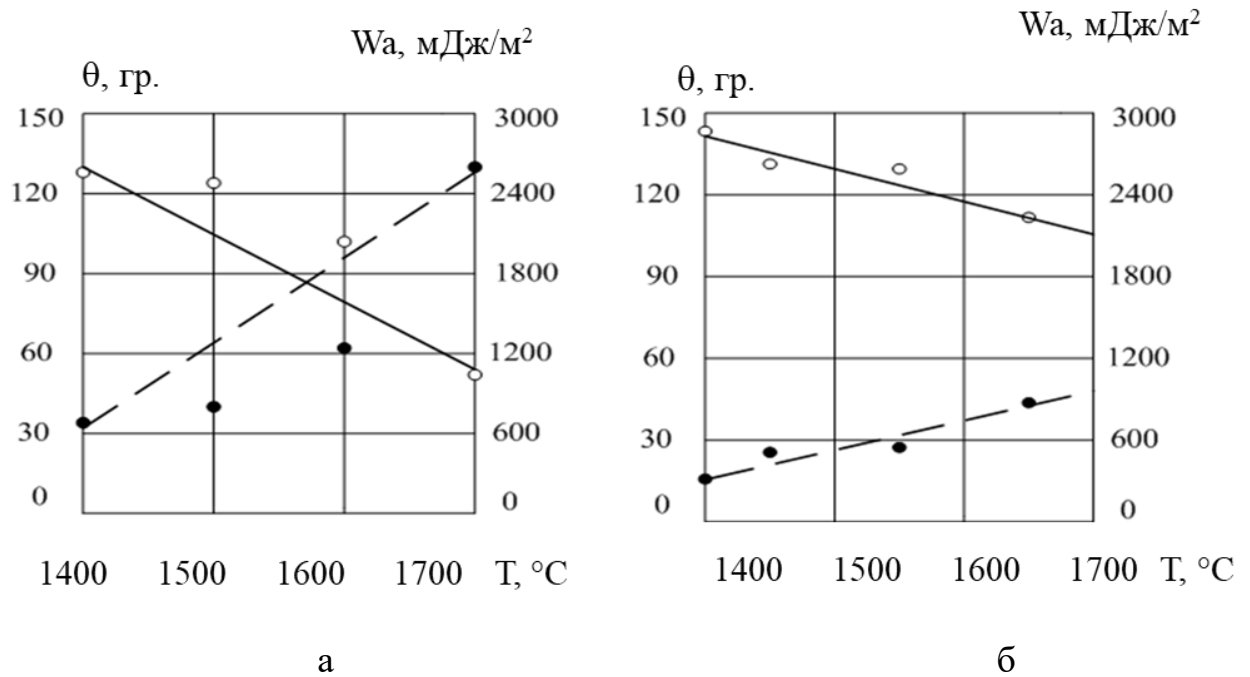


Рис. 3.17 – Температурні залежності контактного кута змочування жароміцним розплавом на підкладках зразка ливарної форми на основі корунду з ЗК: а – ГрЕС; б – Remasol

Таким чином, отримані результати з адгезійної взаємодії різних вогнетривів, які одержано на водній основі, з рідким сплавом марки СМ88 дають змогу рекомендувати їх в якості сполучного для виготовлення керамічних оболонкових форм для плавки та заливки розплавів на основі нікелю.

### Висновки за 3 розділом

1. Дослідження керамічних суспензій показали, що для рівномірного покриття моделей суспензії з водними ЗК потребують введення більшої кількості вогнетривкого наповнювача і тому мають більшу умовну в'язкість, ніж суспензії на ЕТС.

2. Встановлено, що кераміки в сирому і прожареному станах на основі електрокорунду з Remasol Premium Plus і кремнезolem JN-30 мали міцність 3,8-6,1 МПа та 5,3-7,5 МПа, відповідно, що в 2,5-3,5 рази вище, ніж в

кераміки з ЕТС. Після прожарювання вона зросла в понад два рази і становила 10,1-12,0 МПа і 13,2-19,3 МПа. Наряду з цим кераміки на основі кварцу характеризувалися невисокою міцністю в сирому стані. З водними ЗК вони в середньому на 20% були вищі ніж кераміки з ЕТС. Після прожарювання міцність керамік зменшилася, що пов'язане з поліморфним перетворенням кварцу. Для матеріалів на основі дистенсиліманіту з Remasol Premium Plus і кремнезolem JN-30 ця характеристика в сирому стані була 3,8-7,1 МПа і 5,1-8,1 МПа, відповідно, що приблизно в два рази вище ніж у кераміки з ЕТС. Після прожарювання міцність їх зросла до 6,4-11,1 МПа і 6,6-10,0 МПа, а з ЕТС знизилася до 1,4-2,8 МПа.

3. Визначено, що кераміки на основі електрокорунду, дистенсиліманіту і ЗК Remasol Premium Plus мають міцність при розтягуванні в сирому стані більше 3 МПа, що в мінімум 2 рази перевищує міцність відповідних керамік на ЕТС. Корундова кераміка з Remasol в сирому стані мала показник міцності 3,3 МПа, а після прожарювання її міцність зросла до 12,2 МПа.

4. Газопроникність керамік на водних ЗК більша ніж керамік на ЕТС, і в залежності від вогнетривкого наповнювача знаходилася в межах 2,5 – 14,0 од.

5. Для виготовлення моделей малосерійного виробництва складнопрофільних виливків жароміцних нікелевих сплавів, що одержують ЛВМ, було обрано матеріал PLA (полілактид) для 3-D принтерів, включаючи його розмірну точність, зольність, коефіцієнт лінійного термічного розширення (КЛТР), усадку та вартість.

6. Матеріалом форми, особливо для отримання лопаток методом спрямованої кристалізації, де потрібна тривала інертність до розплаву, можна рекомендувати корунд і водне сполучне. Алюміній, з'єднуючись з водним сполучним, що виділився (зі слабо структурованим  $\text{SiO}_2$ ) утворює муліт, який є хімічно термостабільною сполукою. Це дозволяє виключити взаємодію розплаву при тривалому контакті з формою, температура цього контакту при спрямованому затвердінні становить 1450 -1600 °С.

7. Проведені дослідження міжфазної взаємодії розплаву СМ88 з зразками керамічних форм показали, що в якості сполучного матеріалу форм рекомендовано використовувати водне сполучне.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБЛЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНОГО ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОДЕРЖАННЯ ЛОПАТОК ТУРБІНИ ГТД ІЗ ЖАРОМІЦНИХ КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ СПЛАВІВ НА НІКЕЛЕВІЙ ОСНОВІ

З метою перевірки керамічних оболонкових форм з водним сполучним проведено експериментальні дослідження технологічного процесу одержання виливків лопаток другого ступеню турбіни ГТД UGT 5000 (потужність двигуна 5000 МВт, виробник ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», м Миколаїв, Україна). Матеріалом для дослідних плавок слугував стандартний жароміцний корозійностійкий сплав на нікелевій основі CM88, хімічний склад якого показано в таблиці 2.3.

#### **4.1. Розроблення технологічного процесу виготовлення керамічної форми з використанням екологічно безпечних сполучних матеріалів для лиття лопаток ГТД.**

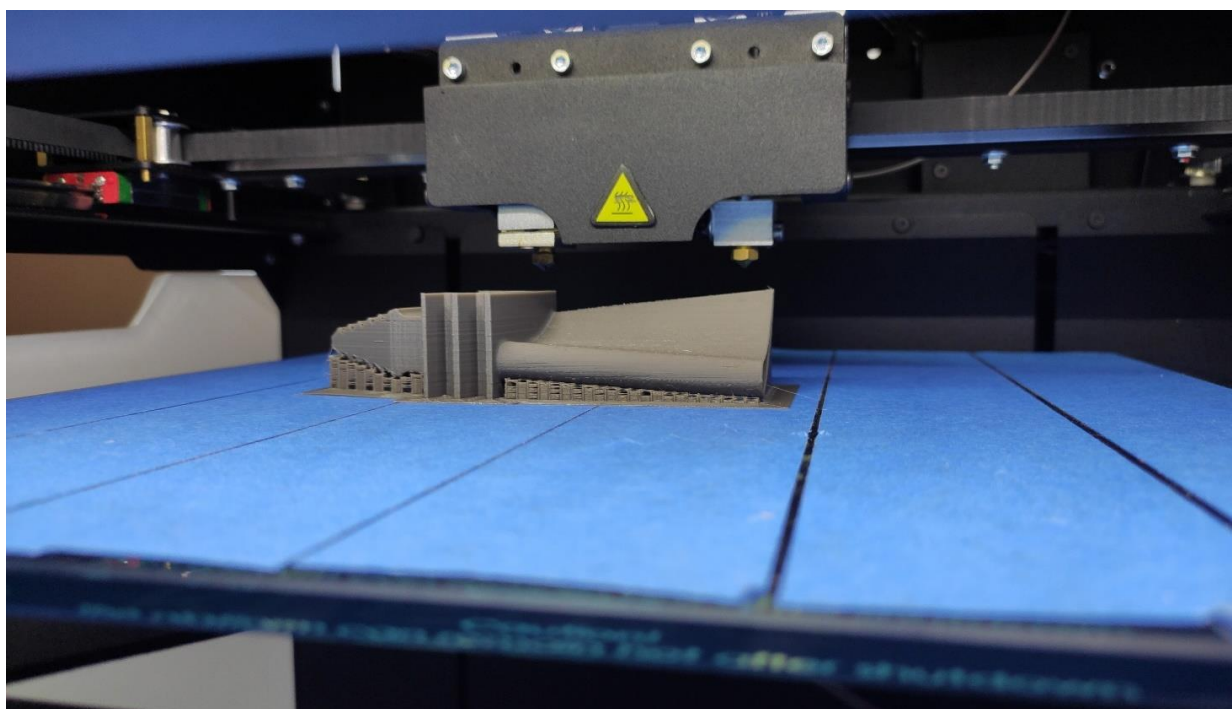
В дослідях використовували розроблений технологічний процес одержання разових моделей лопаток ГТД із застосуванням 3D-друку ( див. розділ 2 та рис. 4.1).

Керамічну форму виготовлювали згідно традиційної технології литва за моделями, що витоплюються, шляхом занурювання модельного блока в суспензію з подальшою обсіпкою електрокорундом. Товщина керамічної форми – 10-12 мм. На поверхневий шар наносили суспензією без обсіпки для створення гладкої поверхні форми [72]. Приготування суспензії на основі сполучного на водній основі здійснювали шляхом змішування її вихідних компонентів, без охолодження, за допомогою змішувача при частоті обертання мішалки 1000-2800 об/хв.





а



б

Рис. 4.1 – Зовнішній вигляд разових моделей лопаток, які виготовлено на 3D-принтері (а - робоча лопатка 2 ступеню; б - робоча лопатка 1 ступеню турбіни ГТД).

Встановлено, що температурний діапазон сушіння моделей на водних складових протікає швидше – лицьовий шар висихає за 3-4 години при температурі 21-30°C. Щодо наступних шарів, то даний процес відбувається за

таких же параметрів, але з інтенсивним обдуванням повітрям від 1-3 м/с. В обох випадках необхідно підтримувати відносну вологість повітря на рівні 40-60 %. При таких умовах сушіння наступних шарів складає одну годину на кожен послідуєчий шар.

Як свідчать результати досліджень, кераміка на водних зв'язувальних компонентах має значно вищі міцнісні характеристики порівняно з матеріалом на основі етилсилікату. В результаті цього було запропоновано одностадійний метод, тобто поєднуються два процеси: випалювання і прожарювання. Слід зазначити, що цей підхід виявився непридатним для формування оболонкових форм на етилсилікатній основі через утворення тріщин [72].

Як було показано раніше, одностадійне видалення моделей проводили за допомогою муфельної печі марки СНОЛ-2.4.2/12-И1 одночасно з процесом прожарювання керамічної форми. Режим прожарювання був наступним: нагрівання до температури 950 °С зі швидкістю 200 °С/год з наступним витримуванням протягом двох годин. В інтервалі температур від 150 °С до 300 °С швидкість нагрівання складала приблизно 75 °С/год. При цьому увагу було зосереджено на оцінці впливу температури на структурну цілісність форм. Відзначено, що завдяки покращеним властивостям водного зв'язувального компоненту, форми мали високу стійкість до термічних навантажень, значно зменшився ризик виникнення тріщин, відшарувань покриттів та інших дефектів у процесі випалювання. [40].

Відомо, що покращення експлуатаційних властивостей лопаток ГТД тісно пов'язане з чистотою рідкого металу, тобто зі зменшенням кількості шкідливих домішок і газів [73-76]. Одним із перспективних методів вирішення цього завдання є очищення його за допомогою фільтрів. Використання керамічних фільтрів у виробництві лопаток для газотурбінних двигунів дозволяє знизити рівень браку приблизно на 20-30 % завдяки зменшенню кількості неметалевих включень та зниженню газонасичення. Дослідження впливу фільтрації на механічні властивості показало, що найкращі результати забезпечують саме пінокерамічні фільтри [77]. Лабораторно-промислові

випробування матеріалу фільтрів дозволили встановити ефективні термодинамічні умови фільтрування розплавів в процесі отримання спрямовано закристалізованих лопаток. Під час експериментів використовували фільтри різної товщини (2050 мм) з діаметром пор 1–5 мм. У результаті досліджень було встановлено, що при товщині 20–30 мм та діаметрі 2–5 мм розплав протікає через фільтр досить вільно у всьому діапазоні температур [78]. Тому на дно керамічної чаші оболонкової форми вставили пінокерамічний фільтр, де розмір пор в фільтрі складає 2– 5 мм (рис. 4.2).



Рис. 4.2 – Зовнішній вигляд пінокерамічного фільтру, який використовували для експериментальної плавки

Прожарювання керамічної оболонкової форми перед заливанням розплаву проводилось при температурі 900-950 °С протягом 4-6 годин (рис.4.3).

Плавку проводили на вертикальній вакуумній ливарній установці VIM-25-175С фірми “SECO-WARWICK” [79]. Камеру з шихтою відкачували протягом двох хвилин і досягали в ній тиск рівний  $7 \cdot 10^{-2}$  Ра. Температуру контролювали п'ятьма вольфрамо-ренієвими термопарами та оптичним пірометром типу Mikron M-780. Якісну орієнтовану структуру одержали за локальної швидкості охолодження 15-26 °С/хв на фронті кристалізації.



Рис. 4.3 – Зовнішній вигляд керамічної форми

В процесі одержання виливків з направленою кристалізацією температура заливки розплаву у форму складала  $1580^{\circ}\text{C}$ , а в зоні затравки -  $1430^{\circ}\text{C}$ . При візуальному огляді зовнішньої поверхні виливків з жароміцного сплаву не виявлено мікропор, засмічень, раковин після заливки у керамічні форми, які одержано за представленою технологією (рис.4.4, 4.5).





а



б



в

Рис. 4.4 – Зовнішній вигляд блоку лопаток на різних стадіях (а, б, в)



Рис. 4.5. – Зовнішній вигляд лопатки другого ступеню турбіни GT 5000

#### 4.2. Дослідження макро- і мікроструктури зразків жароміцного сплаву СМ88, одержаних методом спрямованого твердіння.

За допомогою металографічних досліджень зразків жароміцного корозійностійкого сплаву СМ88 встановлено, що вони складаються з декількох типів субзерен. Перші являють собою окремі дендритні гілки в межах однієї колонії, розміри якої корелюють з розмірами останніх, а разорієнтація становить 0,5 - 1,0 градусів. Другі належать до різноорієнтованих груп дендритних гілок одного напрямку (рис. 4.6).

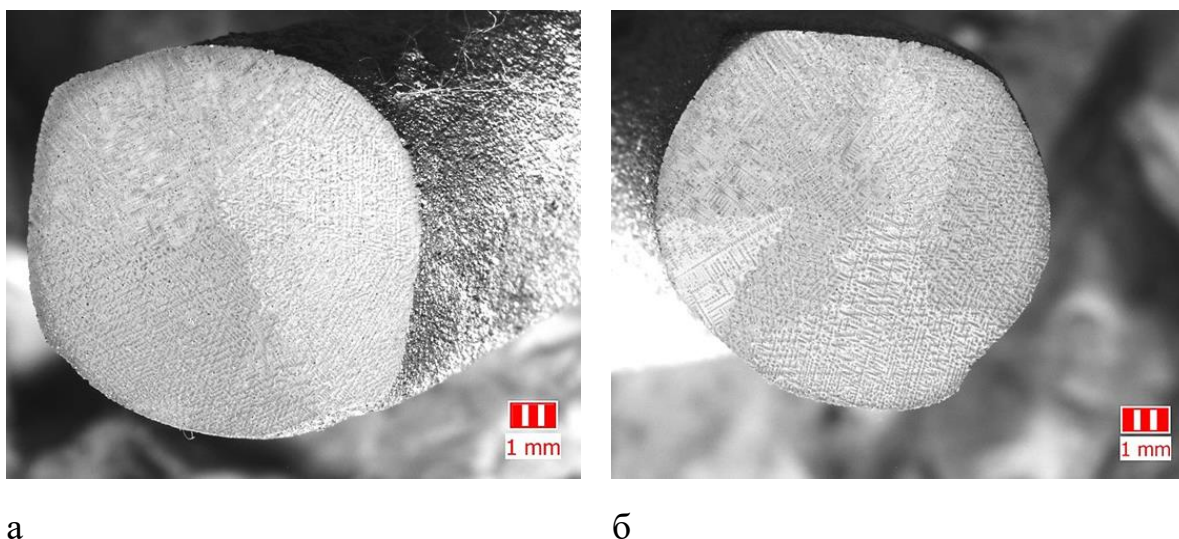


Рис. 4.6 – Макроструктура зразку в литому стані: а – зразок № 1; б – зразок №2

Макроструктура зразків має регулярну структуру і відповідає вимогам до структури лопаток другого ступеня за технічним регламентом підприємства [56].

Відомо, що фазово-структурна стабільність та властивості матеріалів суттєво залежать від режимів їх термічної обробки [80-82]. Для литих деталей газотурбінних двигунів з орієнтованою структурою (монокристалічною або спрямовано закристалізованою) вибір режимів термічної обробки

ускладнюється порівняно зі сплавами для полікристалічних рівноосних виливків.

В результаті аналізу експериментальних даних та літературних джерел [58-59,83] для дослідних зразків встановлено наступний режим термічної обробки:  $T = 1170 \pm 10$  °C,  $\tau = 3 - 3,5$  год., охолодження – повітря;  $T = 1050$  °C,  $\tau = 4-4,5$  год., охолодження – повітря;  $T = 850$  °C,  $\tau = 16-17$  год., охолодження – повітря. Термообробку одержаних зразків та виливків дослідних сплавів проводили у вакуумній установці фірми «TAV» (Італія). Встановлено, що ступінь регулярності дендритної структури є задовільним при швидкості пересування фронту кристалізації в межах 5 мм/хв. На перерізі зразка дендрити мають вигляд "мальтійського хреста" із відстанню між осями дендритів  $\lambda \approx 160-170$   $\mu\text{m}$  (рис. 4.7).

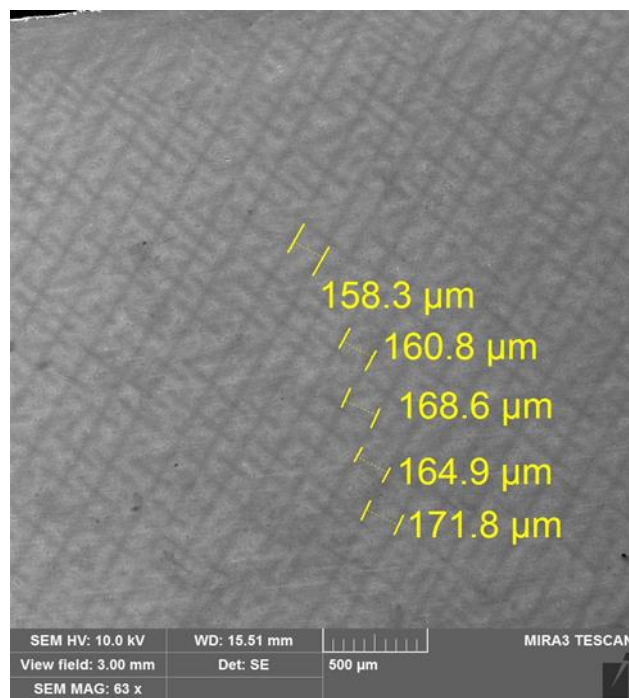
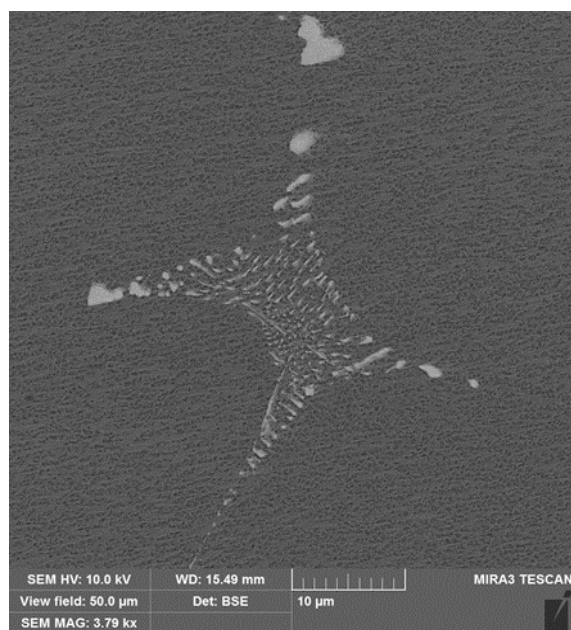


Рис. 4.7 – Мікроструктура перерізу зразка жароміцного корозійностійкого сплаву SM88

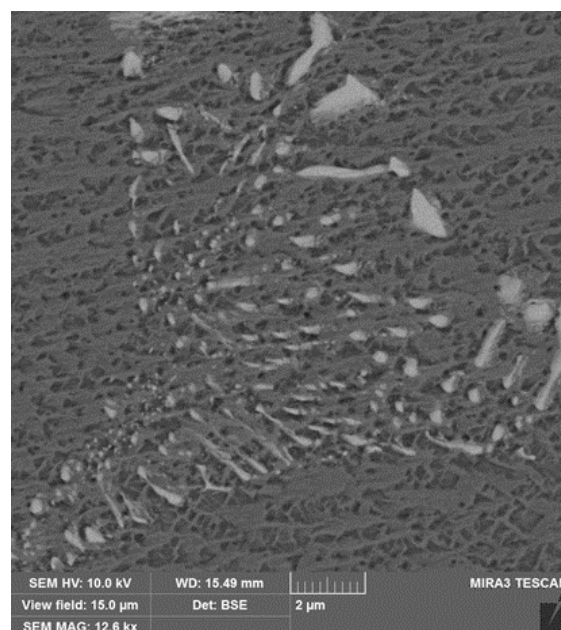
В результаті проведеної роботи були визначені параметри структурних складових дослідних зразків жароміцного сплаву SM88, які представлено в таблиці 4.1.

На рисунку 4.8 показано, що після термічної обробки помітно зменшилася кількість вторинної дисперсної  $\gamma'$  - фази, локалізованої в

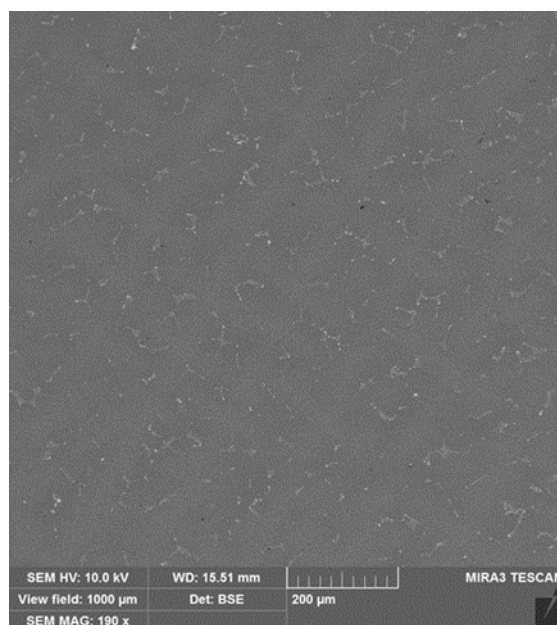
міждендритних просторах. Вона подрібнюється, зберігаючи переважно форму, близьку до сферичної до 0,2-0,3 мкм (рис. 4.8 а, б), що позитивно впливає на фазово-структурну стабільність виливків [84,85]. Зміцнюючі карбіди  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  розташовані рівномірно по всій дослідній площині зразка (рис. 4.8 в) [86,87].



а



б



в

Рис. 4.8 – Мікроструктура зразку сплаву СМ88 при різному збільшенні



## Параметри структурних складових зразків жароміцного сплаву СМ88

Параметри структурних складових	Межи, мкм
Середній розмір островків евтектичної $\gamma'$ -фази	5-7
Середній розмір частинок вторичної $\gamma'$ -фази у міжвісьовому просторі	0,2-0,4
Середній розмір карбидів МС-типа	1,0-1,5
Середній розмір частинок вторичної $\gamma'$ -фази в вісях дендритів	0,1-0,3

Примітка: Відносна точність визначення вказаних величин складала від 5 % до 10 %.

#### 4.3 Дослідження глибини приповерхневого зміненого шару литих зразків з жароміцного сплаву

Як показано в роботах [88-90] збільшення глибини зміненого шару погіршує експлуатаційні властивості виливків з жароміцних нікелевих сплавів. Тому були проведені порівняльні дослідження впливу заміни ГрЕС на водний ЗК для отримання керамічної оболонкової форми на основі корунду на приповерхневий змінений шар виливків з жароміцного сплаву СМ88. Для вивчення впливу глибини зміненого шару на механічні характеристики сплаву використовували зразки, які заливали в стандартні керамічні форми, як на основі корунду +ГрЕС, так і експериментальні з водяним ЗК.

Структурні особливості впливу приповерхневої зони та глибину зони зразків сплаву досліджували методами мікрорентгеноспектрального аналізу. Результати досліджень показали, що на поверхні дослідних зразків як на основі корунду з ГрЕС, так і з водним ЗК Remasol спостерігається зона, де карбіди практично відсутні. Глибина цієї зони керамічної форми коливається

від 20-30 мкм незалежно від матеріалу в'язучого (рис. 4.9). Оскільки карбідна фаза в сплавi CM88 складається з карбідів на основі титану і хрому, то це свідчить як про знеуглерожування поверхні, так і про збіднення титаном і хромом приповерхневої зони. У контактній зоні виявлено зниження алюмінію, що вказує на зменшення масової частки зміцнюючої  $\gamma'$  - фази  $\text{Ni}_3\text{Al}$  (Ti).

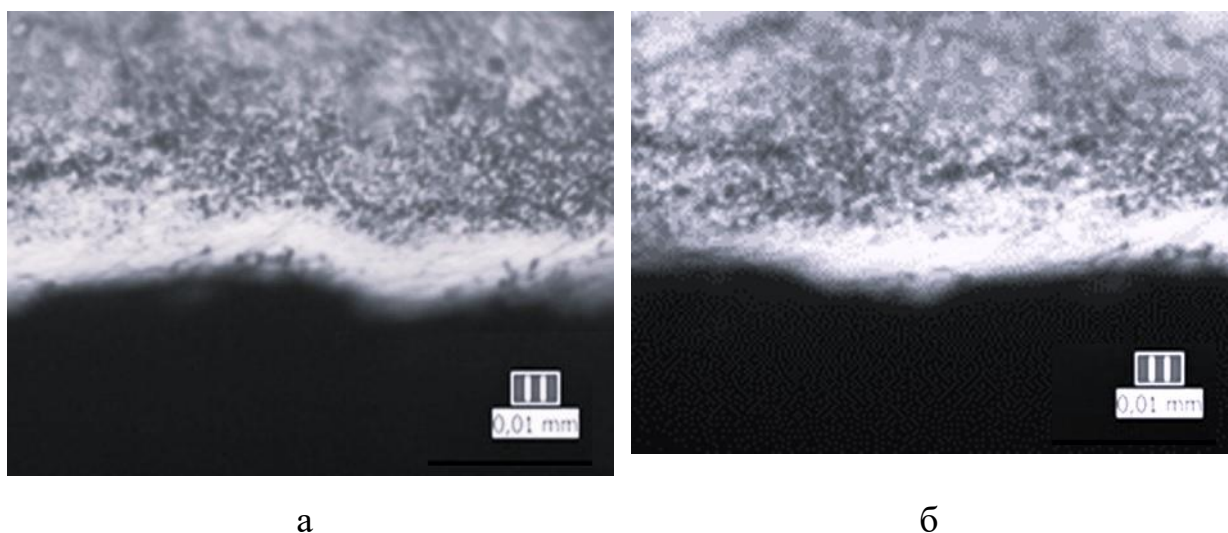


Рис. 4.9 – Глибина приповерхневої зони литих зразків жароміцного сплаву з різними в'язучими: а – ГрЕС; б – Remasol

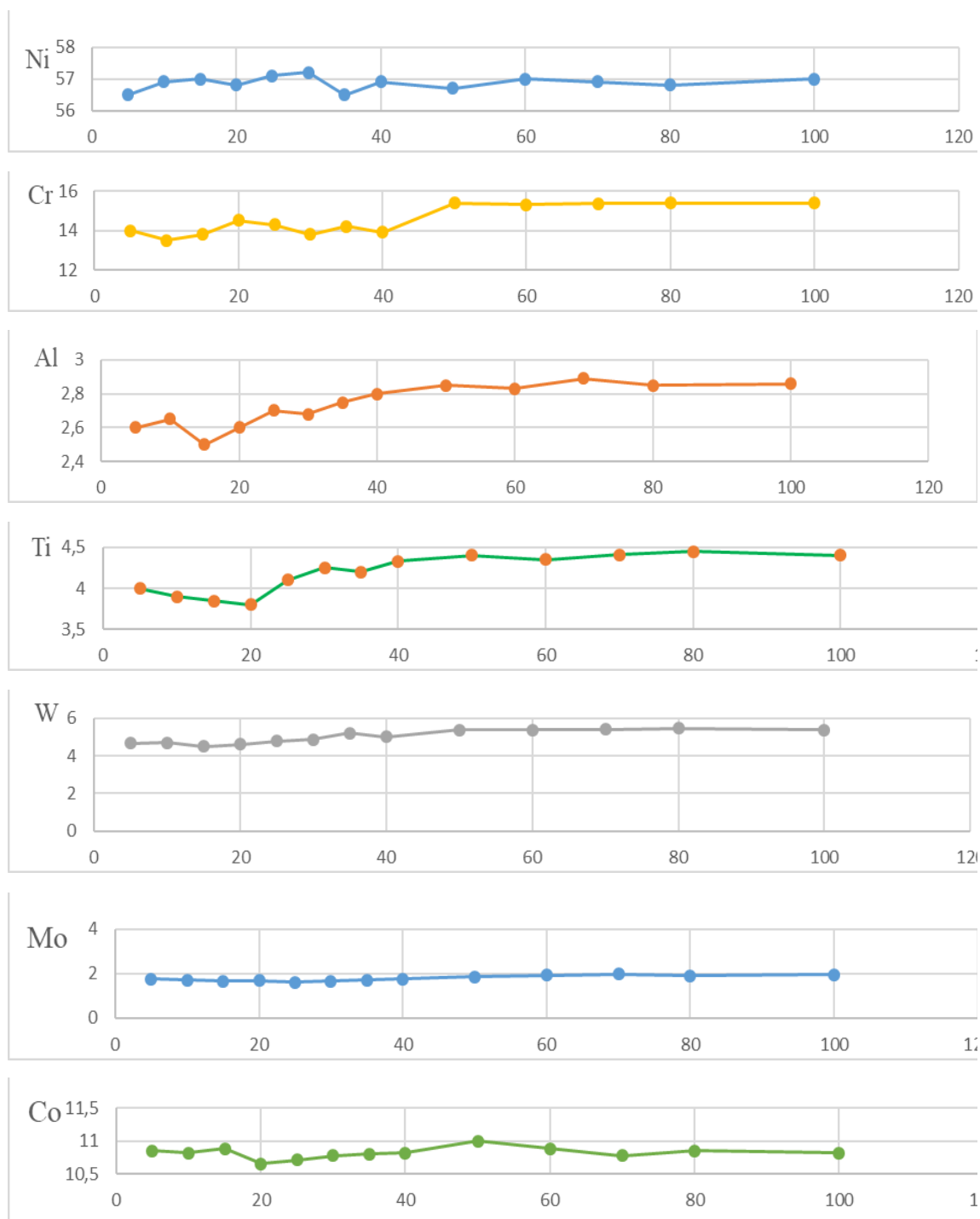
Окрім того встановлено, що приповерхнева контактна зона збіднена хромом, алюмінієм та титаном. При цьому концентрація молібдену, кобальту і вольфраму практично не змінюється (рис.4.10). На нашу думку це пов'язано з окисленням вуглецю, хрому, титану та алюмінію киснем, який виділився при дисоціації  $\text{SiO}_2$  форми, та перерозподілом алюмінію і хрому у приповерхневій зоні виливків. Наприклад, твердий оксид кремнію при високих температурах розкладається на газоподібні  $\text{SiO}$  та  $\text{O}_2$  за наступною хімічною реакцією:



Таким чином, для отримання лопаток методом спрямованої кристалізації, де потрібна тривала інертність до розплаву, можна

рекомендувати ЗК на водній основі. Це дозволяє виключити взаємодію розплаву при тривалому контакті з формою при температурі 1600 °С.

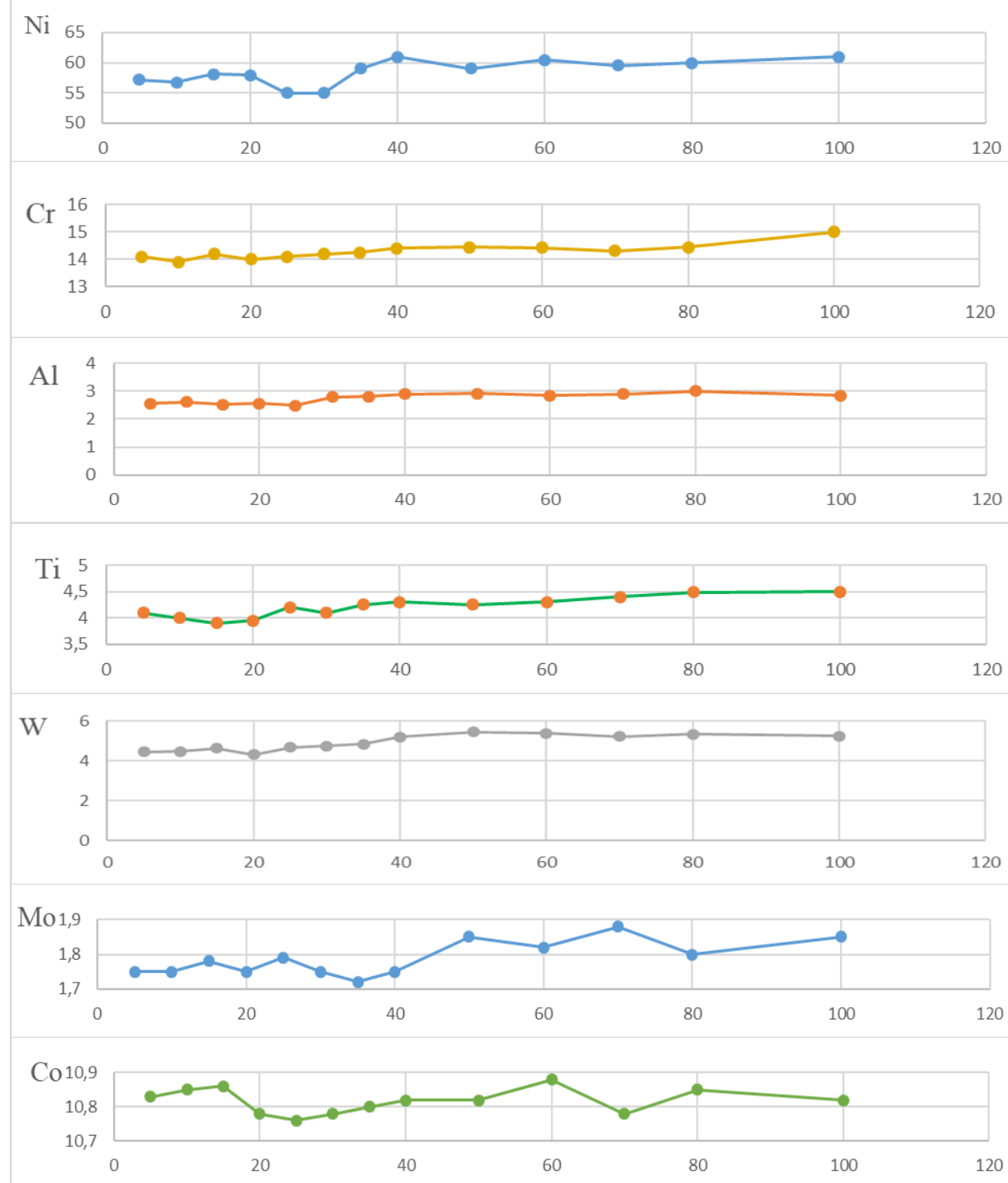
C, % мас.



МКМ

Рис. 4.10 а – Вміст хімічних елементів жароміцного сплаву, що заливався в корундову форму з етилсилікатним ЗК

C, % мас.



МКМ

Рис. 4.10. б – Вміст хімічних елементів приповерхневої зони виливка жароміцного сплаву, що заливався в корундову форму з водним ЗК (Remasol)

#### 4.4. Дослідження механічних властивостей та тривалої міцності

Експлуатаційна надійність газотурбінних двигунів визначається встановленими режимами експлуатації, збереженням стабільності структури і властивостей матеріалу на протязі всього часу ресурсу. Постійне збільшення температури газу і діючих напружень потребує підвищення фізико-механічних і експлуатаційних властивостей матеріалів і збереження їх протягом всього терміну експлуатації. Ці властивості у значній мірі визначаються структурною стабільністю, жароміцністю, корозійною стійкістю [82, 91-93].

На рисунку 4.11 представлено злами після механічних випробувань. Видно, що дослідні зразки проявили високі міцнісні властивості і відповідають технічним вимогам для сплаву СМ88 (табл. 4.2) [56, 71, 94-95]. В робочій зоні зразків №1 (а) і №2 (б) після випробувань на тривалу міцність при температурі 900°C під навантаженням 320 МПа відбувається коагуляція зміцнюючої фази. Мікроструктуру вказаних вище зразків представлено на рисунку 4.12.

Таблиця 4.2

Механічні властивості та тривала міцність дослідних зразків жароміцного корозійностійкого сплаву СМ88

№ зразку	Короткочасна міцність		Тривала міцність	
	$\sigma_b$ , МПа, при 900°C	$\delta$ , %	$\sigma_{TM}$ , МПа, при 900°C	$\tau$ , год.
1	650	28	320	110
2	646	23		132
3	655	19		104
Стандарт [56]	$\leq 640$	$\leq 9$		$\geq 100$

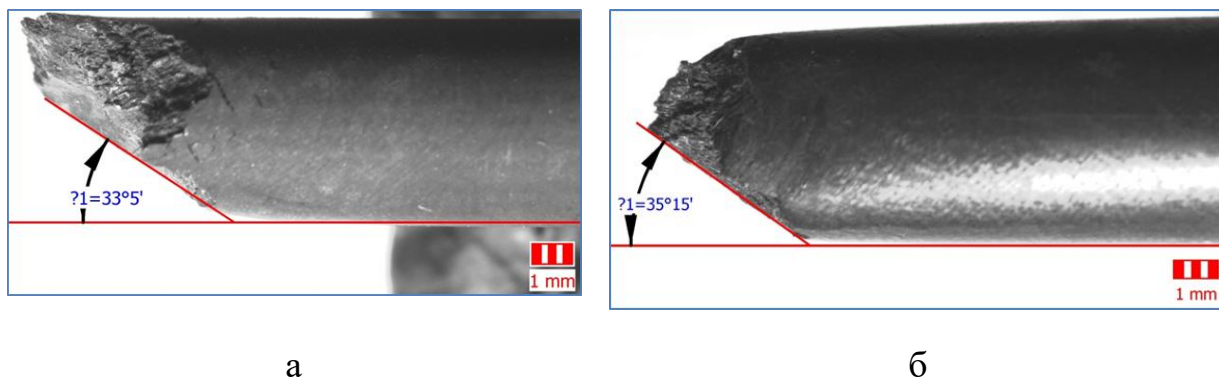
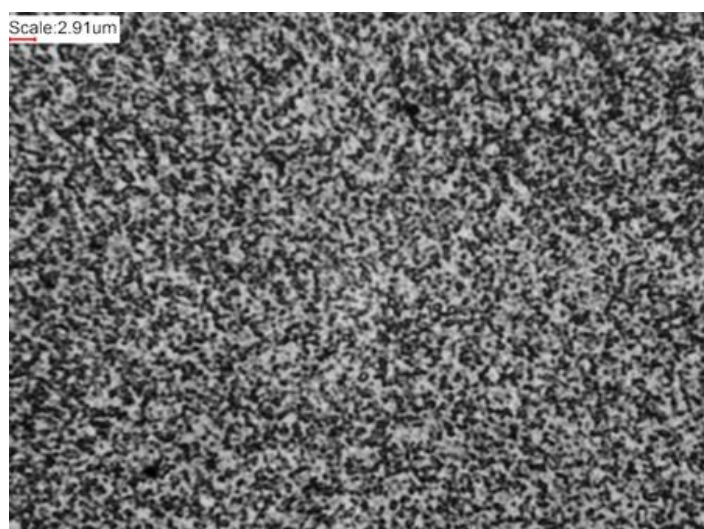
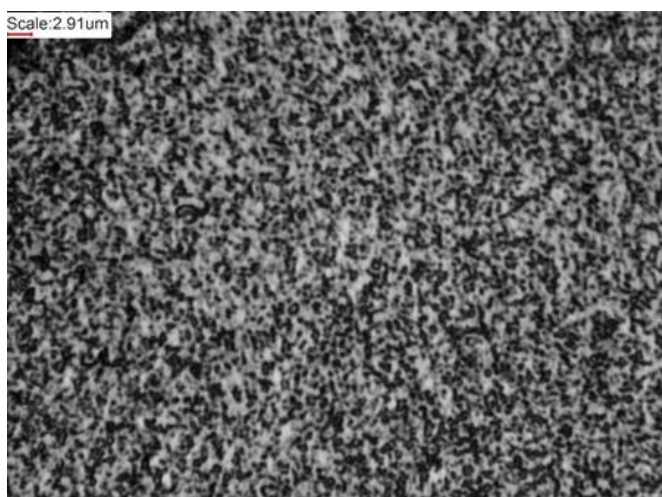


Рис. 4.11 – Зовнішній вигляд зламів після руйнування зразків після короткочасної (а) і тривалої (б) міцності



а



б

Рис. 4.12 – Мікроструктура робочої зони зразків після випробувань на тривалу міцність при температурі 900°C і навантаженні 320 МПа (№1 (а) і №2 (б))

#### **4.5. Характеристика витривалості робочих лопаток ГТД з жароміцного корозійностійкого сплаву на основі нікелю**

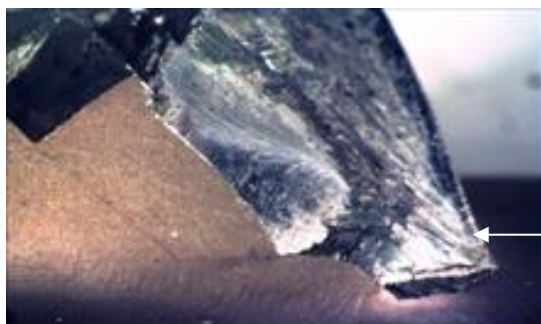
Як відомо, ресурс ГТД в значній мірі залежить від надійності роботи лопаток турбіни, які експлуатуються в екстремальних умовах, тобто при високих температурах і при статичних, циклічних та вібраційних навантаженнях. Одна з причин пошкодження лопаток турбіни при роботі на двигуні є утворення втомних тріщин на зовнішніх та внутрішніх поверхнях лопаток у зонах дії високих змінних навантажень. Слід зазначити, що витривалість їх зростає при нанесенні захисних покриттів. Тому для визначення втомної міцності досліджують лопатки з нанесеним покриттям [96, 97].

Здебільшого під час експлуатації деталей машин виникають змінні у часі напруження [98-100], під дією яких у матеріалі деталі поступово накопичуються пошкодження. Вони сприяють зародженню тріщин, їх розвитку і руйнуванню. Втомні тріщини зароджуються на поверхнях лопаток, тобто у зонах дії високих стаціонарних та змінних напружень і теплових перехідних навантажень [101]. В зв'язку з цим на поверхню деталей наносять захисні покриття, які застосовують для запобігання перегріву і корозійних пошкоджень лопаток турбіни високого тиску [102]. Згідно зі стандартами, лопатки турбіни періодично контролюють за погодженою директивною технологією на відповідність встановленій границі витривалості [61].

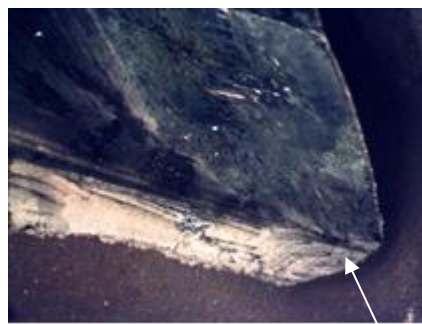
Результати експериментальних досліджень втомної міцності лопаток турбіни, отриманих за вдосконаленою технологією, представлено в таблиці 4.3. При цьому опір на міцність втомному руйнуванню досліджували на трьох лопатках, на які було нанесено подвійне захисне покриття сплаву системи Co-Cr-Al-Y за допомогою електронно-променевої технології. Товщина його становила 40–60 мкм. Візуальним оглядом зламів у районі ливарних дефектів лопаток не виявлено. Загальний вигляд їх після розтину тріщини представлено на рисунку 4.13.

Характеристики втомної міцності лопаток турбіни

№ лопатки	Рівень напруження, МПа	Руйнуюче напруження, МПа	База випробувань, циклів
1	200, 220, 240	260	$1,16 \times 10^6$
2	200, 220	240	$2,86 \times 10^6$
3	200, 220, 240, 260	280	$3,15 \times 10^6$



а



б

Рис. 4.13 – Початок руйнування лопаток ГТД (а - №1, б - № 2)

Дослідження показали, що зовнішній вигляд виливка та покриття задовільний. Електронну структуру останнього показано на прикладі зразків, які вирізано з різних частин лопатки № 2 (рис. 4.14). Встановлено, що металевий шар покриття має дрібнодисперсну структуру різної товщини. Мікротвердість  $H_{\mu}^{50}$  у зоні, прилеглій до основи – 5624-5908 МПа, до перехідної зони – 5908 МПа і до зовнішнього шару покриття – 7295-7717 МПа, що відповідає вимогам [103].



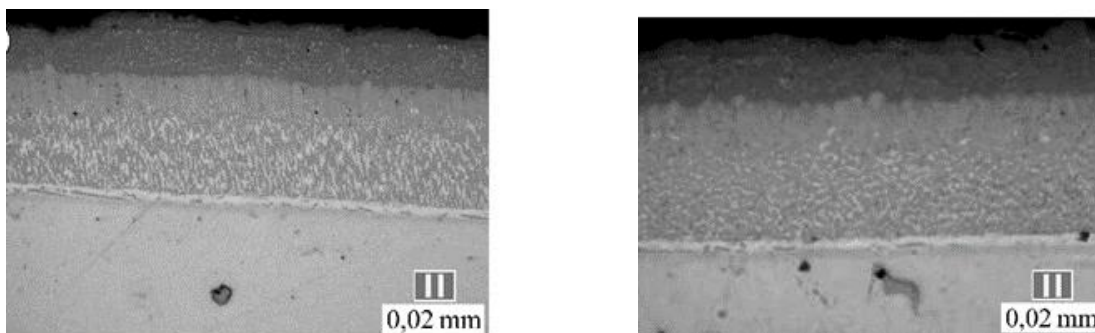


Рис. 4.14 – Мікроструктура покриття на лопатці ГТД (а - №1, б - № 2)

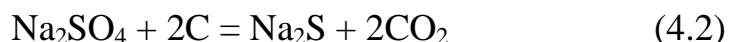
Мікроструктуру вивчали на поперечних зразках у периферійному перетині пера для всіх лопаток. Завдяки правильно обраному режиму термічної обробки у них усунено неоднорідність розподілу частинок зміцнювальної фази. У міжосьовому просторі виділень евтектичної  $\gamma$ - $\gamma'$ -фази не спостерігали. Крім того, не виявлено ливарних дефектів – пор, ливарної рихлості і засмічень, що свідчить про якість вдосконаленого технологічного процесу [56]. Лопатки турбіни показали високий рівень втомної міцності (220–260 МПа) при навантажувальній базі  $2,0 \times 10^7$  циклів. Такий результат досягнуто завдяки формуванню спрямованої дендритної структури [104].

#### **4.6. Високотемпературна корозія жароміцного сплаву на основі нікелю**

У газотурбінних двигунах високотемпературна корозія проявляється, в основному, внаслідок підвищеного вмісту сірки в дизельному та турбінному паливі та додатково попадання солей морської води в суднових двигунах. Наявність натрію і сірки призводить до утворення в гарячій частині турбіни в пилоподібному стані деякої кількості рідких частинок сульфату натрію, Сіль, що накопичилася в компресорі, відокремлюється від лопаток у вигляді фракції різного розміру і потрапляє в гарячу частину турбіни, здебільшого на лопатки

двигуна. Вони, залежно від робочої температури газотурбінного двигуна, можуть бути як у твердому, так і рідкому станах [105-107].

При осадженні на поверхню сплаву сульфату натрію та взаємодії його з деякими компонентами відбувається утворення сульфідів натрію, який плавиться при температурі 1176 °С. Наприклад,  $T = 700$  °С протікає наступна хімічна реакція:



Цей процес посилюється ще тим, що розплавлена сіль через пори та мікротріщини в окалині легко проникає до поверхні металу. Атомарний кисень призводить до швидкого збіднення поверхневих шарів металу легуючими елементами. При цьому окислюються елементи з великою спорідненістю до кисню, а острівці нікелю неокисленого приєднуються до окалини.

Стійкість сплавів до високотемпературної сольової корозії визначали за втратою маси і за даними металографічних досліджень. Результати досліджень корозійної стійкості зразків представлені в таблиці 4.4. Їх зовнішній вигляд після корозійних випробувань показано на рисунку 4.15. В результаті проведених досліджень встановлено, що на поверхні дослідних зразків, згідно проведеного рентгеноспектрального аналізу, утворюються оксиди  $\text{NiO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  та частково  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , які сприяють утворенню захисної плівки і яка в подальшому захищає виливки від руйнування.

Таблиця 4.4

Дані по високотемпературній сольовій корозії сплаву CM88

Номер зразка	1	2
Питома втрата маси після 30 годин, $\text{кг/м}^2$	0,353	0,289
Швидкість корозії, $V_q, \text{кг/м}^2\text{год}$	0,0118	0,0096
Глибина зовнішньої корозії, $d \times 10^{-3}\text{м}$	0,05	0,24
Глибина внутрішньої корозії, $h \times 10^{-3}\text{м}$	0,12– 0,15	0,10– 0,12

Необхідно відмітити, що швидкість корозії і питома втрата маси зразків жароміцного сплаву СМ88, що виплавлені в керамічних формах з водним ЗК, відповідають вимогам стандарту [56, 62, 108].

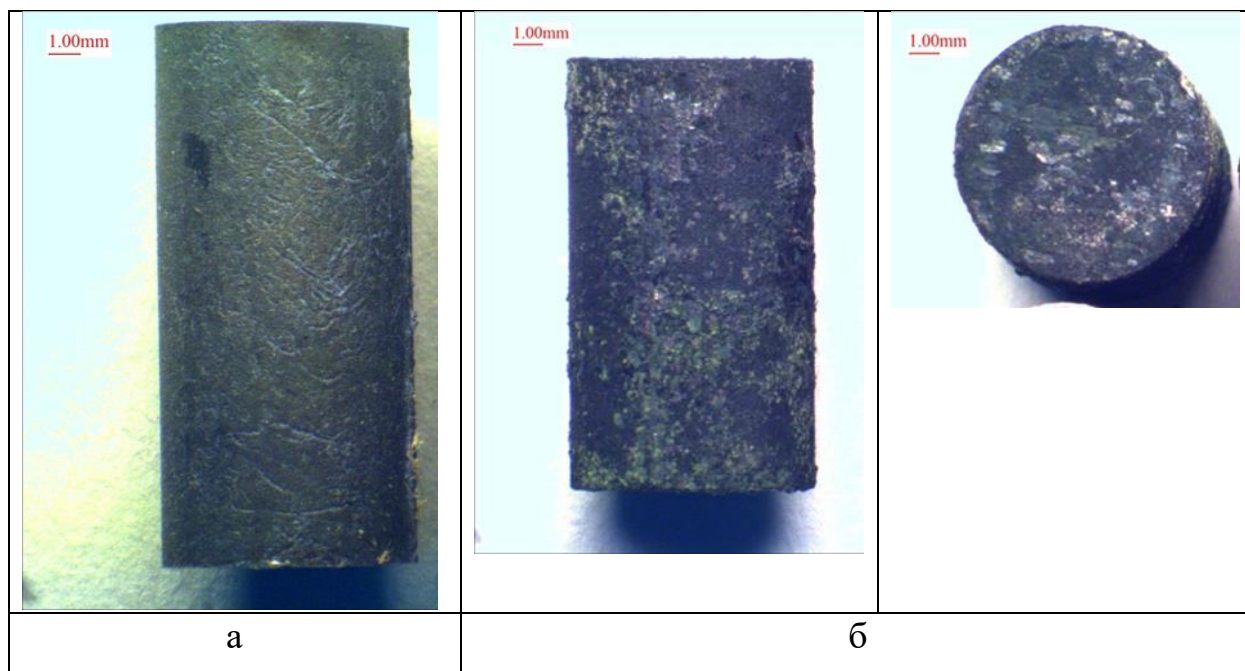


Рис. 4.15. Зовнішній вигляд зразків зі сплаву СМ88 до (а) і після корозійних випробувань (б)

### Висновки до 4 розділу

1. Удосконалено технологічний процес виробництва лопаток за рахунок застосування оболонкових форм на водній основі з використанням полімерних моделей.
2. Вибрано екологічно чисті полімерні матеріали та розроблено технологію виготовлення із них разових керамічних оболонкових форм для виробництва виливків високої якості.
3. Проведено експериментальні плавки та одержано лопатки другого ступеня турбіни газотурбінного двигуна UGT5000. Візуальний аналіз поверхні виливків показав, що ливарні дефекти у вигляді засмічень, рихлот, мікропор на ній відсутні.
4. Досліджено макро- і мікроструктуру зразків експериментальних плавок. Глибина зміненого шару для всіх зразків сплаву, які залиті в керамічні оболонкові форми з різними ЗК становить від 20-30 мкм.

5. Досліджено втомну міцність експериментальних лопаток другого ступеня з подвійним захисним покриттям на основі системи Co-Cr-Al-Y, яке нанесено за допомогою електронно-променевого променя. Встановлено, що при  $2,0 \times 10^7$  циклів роботи вони витримали навантаження 260 МПа.
6. Визначено параметри високотемпературної сольової корозії дослідних зразків зі сплаву на основі нікелю.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Досліджено склади керамічних суспензій з різними компонентами і зв'язувальними елементами. Встановлено, що для рівномірного покриття моделей суспензії з водними ЗК потребують введення більшої кількості вогнетривкого наповнювача, ніж суспензії на ЕТС. Це пов'язано з тим, що суспензії з Remasol Premium Plus мали в своєму складі спеціальні добавки, а саме оксиди лужних металів.

2. Встановлено, що кераміки на основі електрокорунду на водній основі в сирому і прожареному станах мали міцність в сирому стані – 3,8-6,1 МПа та 5,3-7,5 МПа, відповідно, що в 2,5-3,5 рази вище, ніж матеріали з ЕТС. Після прожарювання міцність їх зросла приблизно в два рази і становила 10,1-12,0 МПа і 13,2-19,3 МПа. Щодо керамік на основі кварцу, то вони характеризувалися невисокою міцністю в сирому стані. Міцність керамік з водними ЗК в середньому на 20% була вища, ніж кераміки з ЕТС. Характерно те, що після прожарювання ця характеристика зменшилася, що пов'язано з поліморфним перетворенням кварцу при температурі 870°C (кварц переходить в тридиміт і змінюється густина матеріалу).

3. Визначено, що кераміки на основі електрокорунду, дистенсиліманіту і ЗК Remasol Premium Plus мають міцність при розтягуванні в сирому стані більше, ніж 3,0 МПа, що в два рази перевищує такий показник порівняно з ЕТС. Корундова кераміка з Remasol в сирому стані мала показник міцності 3,3 МПа, а після прожарювання її міцність зросла до 12,2 МПа.

4. Газопроникність керамік на водних ЗК більша, ніж керамік на ЕТС, і в залежності від вогнетривкого наповнювача знаходилася в межах 2,5 – 14,0 од.

5. Проведене дослідне випробування керамічних форм, виготовлених зі ЗК на водній основі, показало, що виливки зі жароміцного нікелевого сплаву характеризувалися задовільною якістю поверхні та не мали хімічного пригару.

6. Розроблено технологічні схеми виготовлення керамічних форм

зі ЗК на водній основі за моделями, одержаними 3D-друком, для малосерійного виробництва складнопрофільних деталей зі сталі. Загалом зв'язувальний компонент Remasol Premium Plus можна рекомендувати для впровадження у цехах точного лиття, враховуючи його хороші технологічні властивості.

7. Використання водного сполучного матеріалу за технологією покращує якість поверхні виливків і допомагає усунути проблеми з недоливами завдяки кращому «диханню» оболонок. Вирішуються проблеми пожежної безпеки та проблеми, пов'язані з очищенням викидів, оскільки водні сполучні матеріали не містять розчинників або летких речовин.

8. Визначені фізико-механічні властивості робочих лопаток другого ступеню турбіни високого тиску енергетичного газотурбінного двигуна UGT 5000. Експериментальні дослідження проводили на зразках і лопатках, одержаних за вдосконаленою технологією, зі сплаву СМ88, який використовується в серійному виробництві газотурбінних установок. Лопатки витримали базу випробувань  $1,0 \times 10^7$  циклів на рівні напруження 200...260 МПа. Встановлена межа витривалості забезпечує заданий ресурс лопаток такого типу.

9. З метою одержання виливків із жароміцних корозійностійких сплавів методом спрямованого твердіння високої якості рекомендовано вдосконалений технологічний процес виготовлення керамічної оболонкової форми з урахуванням сучасних екологічно безпечних технологій (додаток Б).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Anatoliy Narivskiy, Yuliia Kvasnitska, Oleg Shinsky, Inna Shalevska, Pavlo Kaliuzhnyi, Svitlana Polyvoda. Structural materials: manufacture, properties, conditions of use. Chapter 2. Modern technological processes of obtaining cast products and structures of responsible purpose from aluminum, ferrous carbon and heat-resistant alloys. Monograph. Published August 31, 2023. P. 32–67. <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-97-8>
2. Технологічна інструкція ТІ НВКГ-157-2011 Лопатки робочі, технічні вимоги. Миколаїв, ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», 2011. – 30с.
3. Репях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. – 1056 с.
4. Алексеевская Е. К., Лобузова Р. И. Усовершенствование процесса приготовления смесей для керамических форм // Специальные способы литья. – Л.: Машиностроение, 1971. – С. 92–97.
5. Kanyo J. E., Schafföne S. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys // Journal of the European Ceramic Society. – 2020. – Vol. 40, № 15. – P. 4955–4973.
6. Ефимов В. А. Специальные способы литья: справочник / под. общ. ред. В. А. Ефимова. – М.: Машиностроение, 1991. – 736 с.
7. Замковой В. Є. Удосконалення процесів формування внутрішньої порожнини охолоджуваних лопаток ГТД: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – 2005.
8. Лютий Р. В., Кеуш Д. В., Пивошук А. Р., Скирденко М. В. База формувальних матеріалів України // XV Міжнар. наук.-техн. конф. «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра». – 2017. – С. 675–680.
9. Сварика А. А. Формовочные материалы и смеси: справочник. – Киев: Техніка, 1983. – 144 с.
10. Лютий Р. В., Павлюх С. В., Бондар А. К. Роль ливарної форми у забезпеченні якості виливків // XV Міжнар. наук.-техн. конф. «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра». – 2017. – С. 681–686.

- 11.Симановский В. М. Технология и материалы форм и стержней для получения литых лопаток ГТД // Металл и литье Украины. – 2006. – № 6. – С. 47–48.
- 12.Parashar G., Srivastava D., Kumar P. Ethyl silicate binders for high performance coatings // Progress in Organic Coatings. – 2001. – Vol. 42, № 1–2. – P. 1–14.
- 13.Юрченко О. В. Формувальні та стрижневі суміші з лужно-силікатними зв'язуючими, що тверднуть в контактi з нагрітою оснасткою: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. – Київ, 2000.
- 14.Макаревич О. П., Федоров Г. Є., Платонов Є. О. Виробництво виливків із спеціальних сталей. – Київ: НТУУ «КПІ», 2005. – 712 с.
- 15.Соболев В. Б., Фирсов В. Г., Бредис В. Э. и др. Гидролиз этилсиликата без органических растворителей // Литейное производство. – 1978. – № 10. – С. 18–19.
16. Шкленник Я. И., Озеров В. А. Литье по выплавляемым моделям. – м.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
- 17.Борисов Г. П., Костяков В. Н., Горецкий И. Е. Автоматизация и механизация процессов в литье. – Киев: Наукова думка, 1970.
- 18.Greskovich C. D. Method for making investment casting molds for casting superalloys. Patent No. 4026344. – 2007.
- 19.WACKER. Silester® XAR. [Електронний ресурс]. – <https://www.wacker.com/h/en-us/silanes-siloxanes-silicates/ethyl-silicates/silester-xar/p/000002971>
- 20.REMET. Shell Room – Ethyl Silicate. [Електронний ресурс]. – <https://www.remet.com/en/remetproduct-category/shell-room/ethyl-silicate/>
- 21.Beeley P. R., Smart R. F. Investment Casting. – CRC Press, 2023. – 498 p.
- 22.Лютій Р. В., Гурія І. М. Формувальні матеріали: підручник. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2020. – 257 с.
- 23.Flemming E., Tilch W. Formstoffe und Formverfahren. – Leipzig, Stuttgart: Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie, 1993. – 448 с.
- 24.Лютій Р. В., Кочешков А. С., Кеуш Д. В. Формовочные и стержневые



- смеси с фосфатными связующими и комбинированным наполнителем, отверждаемые при нагреве // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 1(22). – С. 203–206.
25. Jing Jinlong, Chen Xuegeng. Novel modified phosphate inorganic binder for aluminum alloy casting, and preparation method thereof. Patent CN20151095523. – 04.03.2015. – Публ. 05.08.2015. – 6 с.
  26. Murov L., Prudkina G., Sassa V. Refractory material based on electrocorundum and aluminium–phosphate binder. Patent FR19710029664. – 13.08.1971. – Публ. 30.03.1973. – 5 с.
  27. Liutyi R., Liuta D., Petryk I. Structural Construction of Binders Based on Orthophosphoric Acid and Refractory Materials // Advances in Materials Science and Engineering. – 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6667769>
  28. Пономаренко О. И., Евтушенко Н. С., Берлизева Т. В. Влияние жидких отвердителей с разными добавками на свойства жидкостекольных смесей // Литейное производство. – 2011. – № 4. – С. 21–23.
  29. Зацарный В. В. Поверхностно-активные вещества для получения самотвердеющих формовочных смесей с сульфитно-дрожжевой бражкой и жидким стеклом: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. – Київ, 1975.
  30. Yan Q. S., Xiong X., Lu G., Wan H., Liu C. C., Wang F., Zou X. Comparison of dimensional accuracy for different investment casting shells and binders based on selective laser sintering // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 120. – P. 243–247.
  31. REMET. Colloidal Silica. [Електронний ресурс]. – <https://www.remet.com/en/remetproduct-category/shell-room/colloidal-silica/>
  32. Wisniewski P., Sitek R., Towarek A. et al. Molding Binder Influence on the Porosity and Gas Permeability of Ceramic Casting Molds // Materials. – 2020. – Vol. 13(12), 2735. <https://doi.org/10.3390/ma13122735>
  33. Селиванов Ю. А., Иванова Л. А. Процессы формообразования на основе стабилизированного кремнезёма. – Київ: Либідь, 1991. – 226 с.

- 34.Лакеев А. С., Борисов Г. П. Основы реологии модельных материалов для литья по выплавляемым моделям. – Киев: Наукова думка, 1971. – 182 с.
- 35.Rafique M., Shah U. Modeling and Simulation of Heat Transfer Phenomenon Related to Mold Heating during Investment Casting // Engineering. – 2020. – № 12. – P. 291–314.
- 36.Симановский В. М., Максютя И. И., Квасницкая Ю. Г., Аникин Ю. Ф. Разработка нового технологического процесса получения оболочковых керамических форм по удаляемым моделям // Процессы литья. – 2006. – № 4. – С. 66–71.
- 37.Marwah O. M. F. et al. Direct Investment Casting For Pattern Developed By Desktop 3D Printer // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 135. – P. 00036. DOI: 10.1051/matecconf/201713500036
- 38.Singh S., Singh R. Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review // Rapid Prototyping Journal. – 2016. – Vol. 22, № 1. – P. 123–143. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2014-0017>
- 39.Kumar P., Ahuja I. P. S., Singh R. Application of fusion deposition modelling for rapid investment casting – a review // International Journal of Materials Engineering Innovation. – 2012. – Vol. 3(3–4). – P. 204–227.
- 40.Нейма О. В., Шинський О. Й., Калюжний П. Б., Михнян О. В. Розробка режимів видалення 3D-друкованих полімерних моделей з керамічних ливарних форм // Метал та лиття України. – 2023. – № 3. – С. 49–55.
- 41.Куренкова О. А. Водные этилсиликатные связующие в литье по выплавляемым моделям // Сборник тезисов докладов Всероссийской молодежной конференции. – 1998. – Т. 4.1. – С. 93–94.
- 42.Репях С. И., Меняйло Е. В., Пройдак Ю. С., Хрычиков В. Е. К вопросу об образовании горячих трещин в литых изделиях и сварных швах // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 3. – С. 37–41.
- 43.Skočilasová V., Skočilas J. Effect of mold material on temperature distribution in alloy cast // AIP Conference Proceedings. – 2016. – № 1768.

44. Shangguan H. L. et al. Controlled cooling of an aluminum alloy casting based on 3D printed rib reinforced shell mold // China Foundry. – 2018. – Vol. 15, № 3. – P. 210–215.
45. REMET. Shell Testing PDF. [Електронний ресурс]. – <https://www.remet.com/wp-content/uploads/2018/06/Shell-Testing.pdf>
46. Strength Properties Control of Mixtures Based on Soluble Glass with Ethereos Solidifiers / O. Ponomarenko, T. Berlizeva, I. Grimzin, та ін. // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – P. 511–521.
47. Tamta K., Karunakar D. B. Enhancing mechanical properties and permeability of ceramic shell in investment casting process // Materials and Manufacturing Processes. – 2018. DOI: 10.1080/10426914.2018.1532088
48. REMET [Електронний ресурс]. – <https://www.remet.com/en/remetproduct-category/shell-room/colloidal-silica/>
49. К. Г. Квасницька, П. Б. Калюжний, О. В. Нейма, О. В. Михнян, В. О. Нога Методи визначення технологічних властивостей керамічних форм // Матеріали XX ювілейної міжнародної науково-практичної конференції «Литво 2024» XIII міжнародної науково-практичної конференції «Металургія 2024», с. 131-135 (28-30 травня 2024р., Україна, Київ-Харків) <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2024>
50. ГОСТ 26371–84. Литье. Термины и определения. – Введ. 01.01.1986. – м.: Изд-во стандартов, 1984. – 31 с.
51. ДСТУ 4221:2003. Сталь виливкова. Загальні технічні умови. – Введ. 01.01.2004. – К.: Держспоживстандарт України, 2004. – 17 с.
52. ГОСТ 857–95. Шлаки доменные гранулированные для производства в'язучих матеріалів. Технічні умови. – Введ. 01.01.1997. – м.: Госстандарт россии, 1996. – 9 с.
53. Иващенко Ю. Н., Баготыренко Б. Б., Еременко В. Н. К вопросу о расчете поверхностного натяжения жидкости по размерам лежащей капли // Поверхностные явления в расплавах и процессах порошковой металлургии. – Киев: Из-во АН УССР, 1963. – С. 391 – 417.

54. Верховлюк А. М. Взаимодействие жидких и твердых фаз в металлургических процессах. – Киев: Наукова думка, 2014. – 168 с.
55. Верховлюк А. М. Межфазное взаимодействие жаропрочного никелевого сплава с оксидами // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 2002. – Вып. 35. – С. 80–84.
56. Specification Z88F1-S2 for supplying remelting stocks of alloy CM-88. – Technical Specifications of “ZORYA” – “MASHPROEKT” GTRPC, 2016.
57. Wiehczynski A., Lisiewicz M., Kwasnicka J., Kostrica W. Method of the directional solidification of the castings of gas turbine blades and a device for producing the castings of gas turbine blades of the directional solidified and monocrystalline structure: EP2921244(A1), 2015-09-23 // Bulletin 2015/39.
58. Kvasnytska Y.H., Shalevska I.A., Balitskii A.I., Ivaskevich L.M., Maksiuta I.I., Kvasnytska K.H. Influence of refractory elements on phase-structural stability of heat-resistant corrosion-resistant alloys for gas turbine blades // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2023. – Vol. 45, № 8. – P. 975–992. – DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint>.
59. Kvasnytska Y.H., Ivaskevich L.M., Balitskii A.I., Kvasnytska K.H., Mialnitsa H.P. Structural and mechanical properties of the nickel alloy of gas-turbine engine blades // Materials Science. – 2022. – Vol. 57, No. 5. – P. 688–694. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00596-9>
60. ГОСТ РВ 2840-001-2008. Лопатки газотурбинных двигателей. Методы испытаний на усталость. – м.: Стандартинформ, 2008. – 32 с.
61. Prikhna T.O., Grechanyuk I.M., Karpets M.V., Grechanyuk M.I., Bagliuk G.A., Grechanyuk V.G., Khomenko O.V. Electron-beam and plasma oxidation-resistant and thermal-barrier coatings deposited on turbine blades using cast and powder Ni(Co)CrAlY(Si) alloys. II. Structure and chemical and phase composition of cast CoCrAlY alloys // Powder Metall. Met. Ceram. – 2022. – 61, № 3–4. – С. 230–237. <https://doi.org/10.1007/s11106-022-00310-z>
62. Система качества. И ЖАКИ 105.506-2000. Сплавы жаростойкие и покрытия. Метод испытаний на высокотемпературную солевую

- коррозию. – Николаев: ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», 2000. – 17 с.
63. Balyts'kyi A.I., Kvasnyts'ka Y.H., Ivas'kevich L.M., Myal'nitsa H.P. Corrosion and Hydrogen-Resistance of Heat-Resistant Blade Nickel-Cobalt Alloys // *Materials Science*. – 2018. – Vol. 54, No. 2. – P. 230–239. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-178-z>
64. Квасницька К.Г. Визначення технологічних властивостей вогнетривких суспензій на основі різних видів зв'язувальних компонентів // Тези доповіді на XI Міжнародній науково-технічній конференції з нагоди 117-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (22-23 лютого 2024 р., НУБіП України, м. Київ).
65. Калюжний П.Б., Квасницька К.Г., Нейма О.В., Михнян О.В., Лютий Р.В. Вивчення властивостей керамічних ливарних форм і суспензій зі зв'язувальними компонентами на водній основі // *Процеси лиття*. – 2024. – № 3 (157). – С. 28–35. <https://doi.org/10.15407/plit2024.03.028>
66. Куровець М. І. Кристалографія і мінералогія [Текст] / М. І. Куровець. – Львів : Світ, 1996. – 236 с.
67. Калюжний П.Б., Квасницька К.Г., Нейма О.В. Переваги використання водних зв'язувальних компонентів для виготовлення керамічних форм // *Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» (25-27 вересня 2023 року) – Краматорськ*. – С. 56-58.
68. Нейма О.В., Дорошенко В.С., Квасницька К.Г. Аналіз 3D-друку моделей для вибору пластика, що газифікується // *Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 12» (15 – 16 грудня 2022 р., м. Київ)* – С. 91-92.
69. Масючок О.П., Юрженко М.В., Колісник Р.В., Кораб М.Г. Адитивні технології полімерних матеріалів (Огляд) // *Автоматичне зварювання*. – 2020. – № 5. – С. 53–60. <https://doi.org/10.37434/as2020.05.08>
70. Шинський О.Й., Квасницька Ю.Г., Максютя І.І., Михнян О.В., Квасницька К.Г. Використання методів зниження забруднення

- фосфором розплавів жароміцних сплавів // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції ЛИТВО 2022, XI Міжнародної науково-практичної конференції МЕТАЛУРГІЯ 2022 (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ) – С. 148-150.
71. Kvasnytska K.H., Kvasnytska Y.H., Parkhomchuk Z.V., Noha V.O., Veis V.I., Kaliuzhnyi P.B. Features of the formation of a directional structure of complex-profile castings // Proceedings of the VIIth International Conference on Welding and Related Technologies (WRT 2024, 7-10 October 2024, Yaremche, Ukraine). P. 34-37. <https://doi.org/10.1201/9781003518518-7>
  72. Звіт про НДР «Ефективні процеси виготовлення керамічних форм при малосерійному виробництві складнопрофільних литих деталей»: ФТІМС НАН України, 2024 р. – 93 с.
  73. Lee D.Y., Kim D.-J., Kim B.-Y., Song Y.-S. Effect of alumina particle size and distribution on filtration rate and fracture toughness of alumina–glass composites prepared by melt in filtration // Materials Science and Engineering A. – 2003. – Vol. 341, Iss. 1–2. – P. 98–105.
  74. Kallisch W., Stotzel R., Reitzscher R. Keramik zum Filtrieren von Metallschmelzen // Pat. 679748 SW, МКИ5 В 01 D 39/20, В 22 D 27/20. – Опубл. 15.04.1992.
  75. Квасницька Ю.Г., Максютя І.І., Михнян О.В., Нейма О.В., Квасницька К.Г. Умови ефективного видалення кремнію та сірки з розплавів жароміцних сплавів при вакуумно-індукційному виплавленні // Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції «НОВІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ» КПІ (27-28 квітня 2023 року). – С. 134–136.
  76. Квасницька Ю.Г., Максютя І.І., Михнян О.В., Нейма О.В., Квасницька К.Г. Механізм нейтралізації лужних металів при отриманні високоточних деталей з жароміцних сплавів // Лиття 2023. Матеріали XIX міжнародної науково-практичної конференції «Литво 2023» (10-12 жовтня 2023 року). – С. 102–104.
  77. Квасницька Ю.Г., Максютя І.І., Шалевська І.А., Квасницька К.Г., Нога

- В.О. Застосування керамічних фільтрів при виплавці заготовок з жароміцних сплавів // Процеси лиття. – 2023. – № 2 (152). – С. 41–48.  
<https://doi.org/10.15407/plit2023.02.041>.
78. Максюта І.І., Михнян О.В., Нейма О.В., Квасницька К.Г., Нога В.О. Коригування ступеня засміченості спрямовано закристалізованих виливків жароміцних сплавів при використанні фільтрації // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» (25-27 вересня 2023 року) – С. 83-84.
79. Wiehczynski A., Lisiewicz M., Kwasnicka J., Kostrica W. Method of the directional solidification of the castings of gas turbine blades and a device for producing the castings of gas turbine blades of the directional solidified and monocrystalline structure // Espacenet EP2921244A1. – Application number EP 20150000675, 6.03.2015. – Priority PL/13.03.14.
80. Шинський О.Й., Квасницька Ю.Г., Максюта І.І., Михнян О.В., Квасницька К.Г. Оцінка структурної стабільності і оптимізація системи легування методом PHACOMP // Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «ЛИТВО-2022», Харків-Київ, жовтень. – С. 151-153.
81. Kondratyuk S.Ye., Veis V.I., Parkhomchuk Z.V., Kvasnytska Y.H., Kvasnytska K.H. Thermokinetic Parameters of Solidification and Gradient Structure of Steel Castings // Metallophysics and Advanced Technologies. – 2023. – Vol. 45, No. 7. – P. 865–872.  
<https://doi.org/10.15407/mfint.45.07.0865>.
82. Ivaskevich L., Balitskii A., Kvasnytska I., Kvasnytska K., Myalnitsa H. Thermal Stability, Cyclic Durability and Hydrogen Resistance of Cast Nickel-Cobalt Alloys for Gas Turbine Blades // CAMPE 2021: Advances in Mechanical and Power Engineering. – P. 147–155.  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-18487-1\\_15](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-18487-1_15).
83. Шинський О.Й., Квасницька Ю.Г., Максюта І.І., Михнян О.В., Квасницька К.Г. Особливості стабілізації фазово-структурних



- характеристик сучасних вітчизняних жароміцних сплавів для деталей ГТД подовженого ресурсу роботи // Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «ЛИТВО-2022», 04-06 жовтня 2022 р., Харків-Київ. – С. 146-148.
84. Glotka, A. Prediction thermo-physical characteristics heat-resistant nickel alloys directional crystallization / A. Glotka // *Acta Metall. Slovaca*. – 2021. – Vol. 27. – P. 68–71. <https://doi.org/10.36547/ams.27.2.813>.
85. Створення технологічних основ одержання монокристалічних лопаток ГТД з використанням термостабільних модифікованих вогнетривких формувальних матеріалів : звіт НДР (№ ДР 0110U007338) / ФТІМС НАН України, м. Київ. – 2011–2013.
86. Квасницька Ю.Г., Мьяльніца Г.П., Квасницька К.Г., Максютя І.І., Нога В.О. Дослідження структурних особливостей жароміцного нікелевого сплаву для лопаток газотурбінного двигуна / Ю.Г. Квасницька, Г.П. Мьяльніца, К.Г. Квасницька, І.І. Максютя, В.О. Нога // *Сучасна електрометалургія*. – 2023. – № 2. – С. 41–45.
87. Balitskii A.I., Kvasnytska Y.H., Ivaskevych L.M., Kvasnytska K.H., Balitskii O.A., Miskiewicz R.M., Noha V.O., Parkhomchuk Z.V., Veis V.I., Dowejko J.M. Improvement of hydrogen-resistant gas turbine engine blades: single-crystal superalloy manufacturing technology // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 17. – P. 4265. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17174265>.
88. Сімановський В.М. Теорія та технологія модифікування формувальних сумішей для виливків зі спеціальних сплавів : автореф. дис. д-ра техн. наук. – Київ : ФТІМС НАНУ, 2008. – 36 с.
89. Bennison S.J., Harmer M.P. Microstructural studies of normal grain growth and development in  $Al_2O_3$  // *Ceramic Powders* / ed. P. Vincenzini. – Amsterdam : Elsevier Scientific, 1983. – P. 929–938.
90. Ефимова В.Г., Ефимов Г.В., Сімановський В.М., Максютя І.І., Квасницька Ю. Г., Михнян Е. В. Повышение устойчивости огнеупорных материалов к расплавам жаропрочных сплавов. // *Процеси лиття*. – 2011. – №6. – С. 23-27.



91. Xu Qingyan, Yang Cong, Yan Xuewei, Liu Baicheng. Development of numerical simulation in nickel-based superalloy turbine blade directional solidification // *Acta Metall. Sin.* – 2019. – Vol. 55, № 9. – P. 1175–1184. – DOI: 10.11900/0412.1961.2019.00126.
92. Glotka O. A., Olshanetskii V. Yu. Mathematical prediction of the properties of heat-resistant nickel alloys after directional crystallization // *Materials Science.* – 2023. – Vol. 58. – P. 679–685.  
<https://doi.org/10.1007/s11003-023-00716-z>.
93. Chapman N., Gray S., Sumner J., Nicholls J. Stress corrosion testing of CMSX-4, CM247LC DS and IN6203DS Ni-base superalloys // *Oxidation of Metals.* – 2020. – Vol. 1–2. – P. 85–104.  
<https://doi.org/10.1007/s11085-020-10011-w>.
94. Пат. 110529 Україна, МПК C22C 19/05, C22C 19/03, C22C 19/00. Жароміцний корозійностійкий сплав на нікелевій основі для лопаток газотурбінних двигунів / Квасницька Ю. Г., Клясс О. В., Крещенко В. А., Мьяльниця Г. П., Максютя І. І., Шинський О. Й. – Опубл. 12.01.2016. – Бюл. № 1.
95. Шинський О. Й., Квасницька Ю. Г., Максютя І. І., Квасницька К. Г. Дослідження структурно-фазової стабільності жароміцних корозійностійких сплавів для робочих лопаток ГТД // Тези доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (8–10 листопада 2022 р., м. Запоріжжя). – С. 86–90.
96. Гайдук С. В., Гнатенко О. В., Андриенко А. Г., Наумик В. В. Исследование структурных превращений жаропрочных никелевых сплавов в условиях ползучести // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2012. – № 2. – С. 37–40.
97. Kvasnytska Y. H., Ivaskevych L. M., Balitskii A. I., Mialnitsa H. P., Kvasnytska K. H. Evaluation of the endurance limit of cooled blades of gas-turbine engines made of heat-resistant nickel alloy // *Materials Science.* – 2023. – Vol. 59, No. 3. – P. 340–346.

<https://doi.org/10.1007/s11003-024-00783-w>

98. Kasay P. O., Naumyk V. V., Pedash O. O., Klochikhin V. V. Low-cycle fatigue strength of heat-resistant alloy specimens produced by selective laser melting // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2022. – Vol. 61, No. 5–6. – P. 259–268.  
<https://doi.org/10.1007/s11106-022-00313-w>.
99. Coakley J., Whittaker M. T., Kolisnychenko S. Ni-based superalloys. – Switzerland: Trans Tech Publication Ltd., 2020. – 720 p.
100. Reed R. C. The Superalloys: Fundamentals and Applications / R. C. Reed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2006. – 372 p.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285>
101. Glotka A. A., Ol'shanetskii V. E. Mathematical Modeling of Thermophysical Characteristics of Directionally Crystallized Nickel Alloys // Archives of Metallurgy and Materials. – 2022. – Vol. 67, № 1. – P. 51–56.  
<https://doi.org/10.24425/amm.2022.137471>.
102. Yakovchuk K. Yu., Mikitchik A. V., Rudoy Yu. E., Akhtyrsky A. O. Diffusion barrier layer for high-temperature protective coatings // Сучасна електрометалургія. – 2016. – № 4. – С. 36–44.  
<https://doi.org/10.15407/sem2016.04.06>.
103. Система управления качеством. И 255.102.098-87. Лопатки турбин с металлическими и металокерамическими теплозащитными покрытиями. – Николаев: ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», 2010. – 21 с.
104. O.I. Balitskii, Yu.H. Kvasnytska, L.M. Ivaskevych, H.P. Mialnitsa, K.H. Kvasnytska Fatigue refractory of the blades of gas-turbine engines made of a new refractory nickel alloy // Materials Science. – 2022. – Vol. 57, No. 4. – P. 392–398. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00568-z>.
105. Swain B., Mallick P., Patel S., Roshana R., Mohapatra S.S., Bhuyan S., Priyadarshini M., Behera B., Samal S., Behera A. Failure analysis and materials development of gas turbine blades // Materials Today: Proc. – 2020. – Vol. 33, Part 8. – P. 5143–5146.
106. Rajabinezhad M., Bahrami A., Mousavinia M., Seyedi S.J., Taheri P.

- Corrosion-Fatigue Failure of Gas-Turbine Blades in an Oil and Gas Production Plant // *Materials*. – 2020. – Vol. 13, No. 4. – P. 900. – DOI: 10.3390/ma13040900.
107. Kvasnytska Y.H., Ivaskevych L.M., Balytskyi O.I., Maksyuta I.I., Myalnitsa H.P. High-Temperature Salt Corrosion of a Heat-Resistant Nickel Alloy // *Mater. Sci.* – 2020. – Vol. 56, No. 3. – P. 432. – DOI: 10.1007/s11003-020-00447-5.
108. Balitskii A.I., Kvasnytska Y.H., Ivaskevych L.M., Kvasnytska K.H., Balitskii O.A., Shalevska I.A., Shynskii O.Y., Jaworski J.M., Dowejko J.M. Hydrogen and Corrosion Resistance of Nickel Superalloys for Gas Turbines, Engines Cooled Blades // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – P. 1154. – DOI: 10.3390/en16031154.

## ДОДАТОК А

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у закордонних наукових періодичних виданнях, що включені в міжнародні наукометричні бази даних «Scopus»:*

1. Balitskii, A.I.; Kvasnytska, Y.H.; Ivaskevych, L.M.; **Kvasnytska, K.H.**; Balitskii, O.A.; Miskiewicz, R.M.; Noha, V.O.; Parkhomchuk, Z.V.; Veis, V.I.; Dowejko, J.M. Improvement of Hydrogen-Resistant Gas Turbine Engine Blades: Single-Crystal Superalloy Manufacturing Technology *Materials* 2024, 17, 4265. <https://doi.org/10.3390/ma17174265> (Scopus, Q1)
2. Alexander I. Balitskii, Yuliia H. Kvasnytska, Lyubomir M. Ivaskevych, **Kateryna H. Kvasnytska**, Olexiy A. Balitskii, Inna A. Shalevska, Oleg Y. Shynskii, Jaroslaw M. Jaworski, Jakub M. Dowejko Hydrogen and Corrosion Resistance of Nickel Superalloys for Gas Turbines, Engines Cooled Blades *Energies* 2023 EISSN 1996-1073, Published by MDPI 16(3),1154. <https://doi.org/10.3390/en16031154> (Scopus, Q2).
3. O.I. Balitskii, Yu.H. Kvasnytska, L.M. Ivaskevych, H.P. Mialnitsa, **K.H. Kvasnytska** Fatigue refractory of the blades of gas-turbine engines made of a new refractory nickel alloy *Materials Science*, Vol. 57, No. 4, January, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00568-z>
4. Yu.H. Kvasnytska, L.M. Ivaskevych, A.I. Balitskii, K.H. Kvasnytska, H.P. Mialnitsa Structural and mechanical properties of the nickel alloy of gas-turbine engine blades *Materials Science*, Vol. 57, No. 5, March, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00596-9>
5. Lyubomir Ivaskevich, Alexander Balitskii, Iuliia Kvasnytska, **Kateryna Kvasnytska**, Heorhiy Myalnitsa Thermal Stability, Cyclic Durability and Hydrogen Resistance of Cast Nickel-Cobalt Alloys for Gas Turbine Blades *CAMPE 2021: Advances in Mechanical and Power Engineering*, pp 147–155. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_15)
6. S. Ye. Kondratyuk, V. I. Veis, Z. V. Parkhomchuk, Y. H. Kvasnytska, **K. H. Kvasnytska** Thermokinetic Parameters of Solidification and Gradient Structure

of Steel Castings Metallophysics and Advanced Technologies 2023, vol. 45, No. 7, pp. 865–872

<https://doi.org/10.15407/mfint.45.07.0865>

7. Y. H. Kvasnytska, I. A. Shalevska, A. I. Balitskii, L. M. Ivaskevich, I. I. Maksuta, **K. H. Kvasnytska** Influence of Refractory Elements on Phase–Structural Stability of Heat-Resistant Corrosion-Resistant Alloys for Gas Turbine Blades Metallophysics and Advanced Technologies 2023, vol. 45, No. 8, pp. 975–992, <https://doi.org/10.15407/mfint.45.08.0975>

8. Yu. H. Kvasnytska, L. M. Ivaskevych, A. I. Balitskii, H. P. Mialnitsa, **K. H. Kvasnytska** Evaluation of the endurance limit of cooled blades of gas-turbine engines made of heat-resistant nickel alloy *Materials Science*, Vol. 59, No. 3, November, 2023.

<https://doi.org/10.1007/s11003-024-00783-w>

9. **K.H. Kvasnytska**, Y.H. Kvasnytska, Z.V. Parkhomchuk, V.O. Noha, V.I. Veis & P.B. Kaliuzhnyi Features of the formation of a directional structure of complex-profile castings. Proceedings of the VIIth International Conference on Welding and Related Technologies (WRT 2024, 7-10 October 2024, Yaremche, Ukraine), pp. 34-37.

<https://doi.org/10.1201/9781003518518-7>

### *Статті у журналах, що включені до переліку фахових видань*

#### *України:*

10. Квасницька Ю.Г., Максютя І.І., Шалевська І.А., **Квасницька К.Г.**, Нога В.О. Застосування керамічних фільтрів при виплавці заготовок з жароміцних сплавів // Процеси лиття. – 2023. – № 2 (152). – С. 41–48.

<https://doi.org/10.15407/plit2023.02.041>

11. Ю.Г. Квасницька, Г.П. Мьяльніца, **К.Г. Квасницька**, І.І. Максютя, В.О. Нога Дослідження структурних особливостей жароміцного нікелевого сплаву для лопаток газотурбінного двигуна // Сучасна електрометалургія. – 2023. – № 2. – С. 41–45.

<https://doi.org/10.37434/sem2023.02.06>

12. П.Б. Калюжний, **К.Г. Квасницька**, О.В. Нейма, О.В. Михнян Р.В. Лютий Вивчення властивостей керамічних ливарних форм і суспензій зі зв'язувальними компонентами на водній основі // Процеси лиття. – 2024. – № 3 (157). – С. 28–35.

<https://doi.org/10.15407/plit2024.03.028>

13. **К.Г. Квасницька** Шляхи усунення недоліків технології лиття деталей газотурбінних двигунів // Процеси лиття. – 2025. – № 1 (159). – С. 22–33.

<https://doi.org/10.15407/plit2025.01.022>

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

14. Іваськевич Л.М., Балицький О.І., Квасницька Ю.Г., **Квасницька К.Г.**, Мяльниця Г.П. Термостійкість, циклічна довговічність і воднева стійкість литих нікель-кобальтових сплавів для лопаток газових турбін // Матеріали Міжнародної наукової он-лайн конференції SAMPE-2021 (18-20 жовтня 2021 р., м. Харків).

15. Шинський О.Й., Квасницька Ю.Г., Максюта І.І., Михнян О.В., **Квасницька К.Г.** Особливості стабілізації фазово-структурних характеристик сучасних вітчизняних жароміцних сплавів для деталей ГТД подовженого ресурсу роботи // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції ЛИТВО 2022, XI Міжнародної науково-практичної конференції МЕТАЛУРГІЯ 2022 (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ) – С. 146-148

16. Шинський О.Й., Квасницька Ю.Г., Максюта І.І., Михнян О.В., **Квасницька К.Г.** Використання методів зниження забруднення фосфором розплавів жароміцних сплавів // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції ЛИТВО 2022, XI Міжнародної науково-практичної конференції МЕТАЛУРГІЯ 2022 (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ) – С. 148-150

17. Шинський О.Й., Квасницька Ю.Г., Максюта І.І., Михнян О.В., **Квасницька К.Г.** Оцінка структурної стабільності і оптимізація системи легування методом PHASOMP // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції ЛИТВО 2022, XI Міжнародної науково-практичної

конференції МЕТАЛУРГІЯ 2022 (04-06 жовтня 2022 р., м. Харків – м. Київ) – С. 151-153

18. Квасницька Ю.Г., Шинський О.Й., Максюта І.І., **Квасницька К.Г.** Дослідження структурно-фазової стабільності жароміцних корозійностійких сплавів для робочих лопаток ГТД // Збірка матеріалів XV Міжнародної науково-технічної конференції «Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (08-09 листопада 2022р., м. Запоріжжя) – С. 86-90.

19. О.В. Нейма, В.С. Дорошенко, **К.Г. Квасницька** Аналіз 3D-друку моделей для вибору пластика, що газифікується // Міжнародна Наукова Конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 12» (15 – 16 грудня 2022р., м. Київ) – С. 91-92.

20. **Квасницька К.Г.** Шляхи вдосконалення технології одержання складнопрофільних деталей за моделями, що витоплюються // Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції з нагоди 116-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (23-24 лютого 2023р., НУБіП України, м. Київ) – С.269-370.

21. **Kvasnytska K.H.** Ways of improving the technology of obtaining complex-profile parts based on melted models // Збірник тез доповідей XXII міжнародної онлайн-конференції науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування: конструювання та дизайн» (19-20 квітня 2023 року) – С. 15-17.

22. Квасницька Ю.Г., Максюта І.І., Михнян О.В., Нейма О.В., **Квасницька К.Г.** Умови ефективного видалення кремнію та сірки з розплавів жароміцних сплавів при вакуумно-індукційному плавленні // Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (27-28 квітня 2023 року) – С.158-164.

23. **Kvasnytska K.H.** Methods of improving the technology for obtaining complex-profile parts based on melted models // Матеріали IX науково-

практичної конференції молодих вчених України «Металеві матеріали, їх виробництво та перспективи застосування в сучасній промисловості» (18 травня 2023 року) – С. 27-29.

24. Максютя І.І., Михнян О.В., Нейма О.В., **Квасницька К.Г.**, Нога В.О. Коригування ступеня засміченості спрямовано закристалізованих виливків жароміцних сплавів при використанні фільтрації // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» (25-27 вересня 2023 року) – С. 83-84.

25. Калюжний П.Б., **Квасницька К.Г.**, Нейма О.В. Переваги використання водних зв'язувальних компонентів для виготовлення керамічних форм // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» (25-27 вересня 2023 року) – С. 56-58.

26. Ю.Г. Квасницька, І.І. Максютя, О.В. Михнян, О.В. Нейма, **К.Г. Квасницька** Механізм нейтралізації лужних металів при отриманні високоточних деталей із жароміцних сплавів // Матеріали ХІХ міжнародної науково-практичної конференції «Литво 2023» (10-12 жовтня 2023 року) – С. 102-104.

27. **К.Г. Квасницька** Визначення технологічних властивостей вогнетривких суспензій на основі різних видів зв'язувальних компонентів // ХІ Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 117-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН КРАМАРОВА Володимира Савовича (22-23 лютого 2024р., НУБіП України, м. Київ)

28. **К. Г. Квасницька**, П. Б. Калюжний, О. В. Нейма, О. В. Михнян, В. О. Нога Методи визначення технологічних властивостей керамічних форм // Матеріали ХХ ювілейної міжнародної науково-практичної конференції Литво 2024 ХІІІ міжнародної науково-практичної конференції Металургія 2024 (28-30 травня 2024р., Україна, Київ-Харків) – С.131-135



**ДОДАТОК Б**  
**Результати дослідно-промислової перевірки технологічних схем**  
**одержання керамічних оболонкових форм для лиття лопаток ГТД**  
**на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект»**

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО**  
**«НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ КОМПЛЕКС ГАЗОТУРБОБУДУВАННЯ**  
**«ЗОРЯ»-«МАШПРОЕКТ»**  
 Просп. Богоявленський, 42а, м. Миколаїв, 54018, Україна  
 Тел.: +(38 0512) 49-46-34, 49-30-13, 49-93-68  
 Факс: +(38 0512) 49-90-57  
 e-mail: office@zorya.com.ua; web: www.zmturbines.com

**26.09.2023 № ак - 4744**

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

Про надсилання акту дослідно-промислової перевірки

Директору Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України  
 Анатолію НАРІВСЬКОМУ

вул. Вернадського, 34/1  
 м. Київ, 03142

Шановний пане Анатолію!

Надсилаємо Вам погоджений акт дослідно-промислової перевірки результатів експериментальних випробувань в рамках програми спільних досліджень.

Сподіваємось на плідну співпрацю в майбутньому.

Додаток: Акт на 1 аркуші у 2 примірниках.

З повагою,  
 Директор технічний

  
 Іван ОСТАПЧУК

Сергій Пономаренко 050-493-26-58

16.09.23 83 1

154897

11.14.23

Директор Фізико-технологічного  
інституту металів та сплавів  
НАН України, д.т.н.



Анатолій НАРІВСЬКИЙ  
2023 р.

Технічний директор Державного  
підприємства «Науково-виробничий  
комплекс газотурбобудування «Зоря-  
Машпроект»



Іван ОСТАПЧУК  
2023 р.

### АКТ дослідно-промислової перевірки

В рамках програми сумісних досліджень у відповідності до договору від 05.10.2021 співробітниками ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» і відділу фізико-хімії ливарних процесів ФТІМС НАН України проведені експериментальні дослідження щодо вдосконалення технології одержання керамічних форм для лиття лопаток газотурбінних двигунів. Розроблено технологічні схеми одержання керамічних форм за полімерними моделями, які виготовлені за допомогою 3D-друку.

Проведені випробування показали, що використання керамічних оболонкових форм, отриманих за вдосконаленою технологією, призводить до підвищення розмірної точності виливків лопаток на 10% та значно скорочує час виготовлення виливків за рахунок відсутності необхідності проектування та виготовлення ливарного оснащення.

Таким чином, запропонована технологія виготовлення керамічних оболонкових форм за разовими моделями, що одержані за допомогою 3D-друку, є перспективною для лиття складнопрофільних деталей та може бути рекомендованим для використання на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект».

ФТІМС НАН України

Зав. відділу фізико-хімії ливарних  
процесів, д-р техн. наук

О.Й. Шинський

ДП НВКГ «Зоря-Машпроект»

В. о. головного металурга

С. В. Пономаренко

## ДОДАТОК В

**Результати експериментальних досліджень вимірювання усадки  
пластикових моделей при зберіганні для подальшого використання  
щодо виготовлення керамічних оболонкових форм.**

Таблиця

№ кубу	Торцева площа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	+0,04	+0,10	+0,15	+0,13	+0,06	+0,10	+0,11	+0,06	+0,05
<b>2</b>	+0,12	+0,13	+0,05	+0,12	+0,14	+0,14	+0,07	+0,12	+0,10
<b>3</b>	+0,07	+0,08	+0,06	+0,10	+0,05	+0,11	+0,03	+0,05	+0,03
<b>4</b>	+0,06	+0,10	+0,08	+0,10	+0,13	+0,11	+0,17	+0,06	+0,04
<b>5</b>	+0,05	+0,04	+0,03	+0,12	+0,06	+0,02	+0,11	+0,06	+0,05
<b>6</b>	+0,05	+0,10	+0,12	+0,11	+0,17	+0,10	+0,10	+0,06	+0,05
<b>7</b>	+0,05	+0,10	+0,07	+0,11	+0,06	+0,10	+0,06	+0,06	+0,03

Продовження таблиці

№ кубу	Бокова площа 2								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	-0,23	-0,25	-0,25	-0,27	-0,16	-0,18	-0,16	-0,16	-0,15
<b>2</b>	-0,04	-0,12	-0,12	-0,06	-0,06	-0,04	-0,05	-0,04	-0,04
<b>3</b>	-0,04	-0,08	-0,10	-0,06	-0,15	-0,07	-0,12	-0,08	-0,08
<b>4</b>	-0,15	-0,18	-0,21	-0,19	-0,23	-0,17	-0,16	-0,09	-0,10
<b>5</b>	-0,20	-0,27	-0,24	-0,26	-0,22	-0,14	-0,12	-0,16	-0,20
<b>6</b>	-0,24	-0,29	-0,23	-0,29	-0,24	-0,20	-0,16	-0,17	-0,17
<b>7</b>	-0,17	-0,25	-0,29	-0,20	-0,28	-0,17	-0,14	-0,13	-0,14

## Продовження таблиці

№ кубу	Торцева площа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	+0,04	+0,10	+0,15	+0,13	+0,06	+0,10	+0,11	+0,06	+0,05
<b>2</b>	+0,12	+0,13	+0,05	+0,12	+0,14	+0,14	+0,07	+0,12	+0,10
<b>3</b>	+0,07	+0,08	+0,06	+0,10	+0,05	+0,11	+0,03	+0,05	+0,03
<b>4</b>	+0,06	+0,10	+0,08	+0,10	+0,13	+0,11	+0,17	+0,06	+0,04
<b>5</b>	+0,05	+0,04	+0,03	+0,12	+0,06	+0,02	+0,11	+0,06	+0,05
<b>6</b>	+0,05	+0,10	+0,12	+0,11	+0,17	+0,10	+0,10	+0,06	+0,05
<b>7</b>	+0,05	+0,10	+0,07	+0,11	+0,06	+0,10	+0,06	+0,06	+0,03