

# МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

УДК 620.111.1

DOI: 10.31471/1993-9965-2024-1(56)-7-14

## СПОСІБ ПРИГОТУВАННЯ СИЛІКОНОВИХ СУМІШЕЙ ТА ФОРМ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ

<sup>1</sup>В. В. Михайлюк, <sup>1</sup>Ю. Р. Мосора, <sup>2</sup>Lukasz Kowalski, <sup>1</sup>В. С. Витвицький,  
<sup>1</sup>Р. О. Дейнега, <sup>1</sup>О. Я. Фафлей

<sup>1</sup>ІФНТУНГ; 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15,  
e-mail: m u h a j l y u k v @ u k r . n e t

<sup>2</sup> Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, AGH University of Krakow,  
A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland; e-mail: l k o w a l s k i @ a g h . e d u . p l

Висвітлюється процес виготовлення дослідних неметалевих моделей машин та обладнання для різноманітних галузей – цементної (модель регульованого сопла Лавалю), нафтогазової (модель ущільнення преვენтора) тощо, що надалі використовуватимуться під час експериментальних досліджень. Щоб пришвидшити вдосконалення чи розроблення виробів, застосовують імітаційне моделювання, що дозволяє визначити напружено-деформований стан та оптимізувати виріб на етапі його проектування. Щоб застосувати імітаційне моделювання, необхідно мати знання про поведінку матеріалу. У випадку виготовлення деталей із гуми чи силікону це залежність між напруженням та переміщенням під час розтягу. Такі характеристики можна отримати, виготовивши дослідний зразок необхідної форми та розмірів і дослідивши його за відповідною методикою на спеціальній установці. Проте, під час виготовлення у дослідних зразків із силікону з'являються як внутрішні, так і зовнішні дефекти: хвилястість зовнішньої поверхні та наявність всередині матеріалу бульбашок повітря, що вносять похибки у результати досліджень. У статті наведено результати досліджень процесу виливання дослідного зразка із силікону SKR-788, а саме, використання різноманітних матеріалів для виготовлення пресформи, полегшення вилучення зразка із форми, способів змішування основи та каталізатора. Встановлено, що за відсутності вакуумної камери, яка використовується для дегазації силікону перед заливанням його у форму, можна використовувати простий спосіб змішування основи і каталізатора за допомогою шнека. Використання для змішування шнека запобігає потраплянню повітря у суміш основи і каталізатора і, як наслідок, у виготовленому зразку відсутні дефекти.

Ключові слова: основа, каталізатор, силікон, сопло Лавалю, ущільнення преვენтора, пресформа, змішування.

The process of manufacturing experimental non-metallic models of machinery and equipment for various industries - cement (Laval adjustable nozzle model), oil and gas (preventor seal model), etc. - which will be used in future experimental studies. To speed up the improvement or development of products, simulation modeling is used to determine the stress-strain state and optimize the product at the design stage. To use simulation modeling, you need to know the behavior of the material. In the case of rubber or silicone parts, this is the relationship between stress and displacement under tension. Such characteristics can be obtained by making a prototype of the required shape and dimensions and testing it using the appropriate methodology on a special set-up. However, during the manufacturing process, both internal and external defects appear in silicone prototypes: waviness of the outer surface and the presence of air bubbles inside the material, which introduce errors in the test results. The article presents the results of research into the process of casting a prototype of SKR-788 silicone, namely the use of different materials for making a mold, facilitating the removal of the sample from the mold, and methods of mixing the base and catalyst. It was found that in the absence of a vacuum chamber used to degas the silicone prior to pouring it into the mold, a simple method of mixing the base and catalyst using a screw could be used. The use of a screw for

*mixing prevents air from entering the base and catalyst mixture, and as a result, the produced sample is free of defects.*

Keywords: base, catalyst, silicone, de Laval nozzle, preventor seal, mold, mixing.

### Вступ

Створення сучасних машин та обладнання різноманітного призначення все більше ускладнюється новими технічними та економічними вимогами. У процесі проектування машин та обладнання у багатьох випадках доводиться проводити експеримент не на об'єктах в натуральну величину, а на їх моделях, зменшених або збільшених до таких масштабів, щоб при мінімальних витратах засобів і часу отримати узгодженість експериментальних результатів з теоретичними розрахунками. Для отримання узгодженості експериментальних результатів із теоретичними розрахунками слід дотримуватись аналогії схем, враховувати величини навантажень, властивості матеріалів тощо.

Під час вдосконалення чи розроблення нових неметалевих елементів машин та обладнання для дослідження також використовують їх моделі. Ці моделі сьогодні можна досить швидко виготовити, надруквавши необхідні пресформи на 3D-принтері та застосувавши технологію литва. Матеріалом для моделей можна обрати ливарний силікон. Проте для узгодженості експериментальних результатів із теоретичними розрахунками необхідно знати механічні властивості силікону, які є індивідуальними для кожного його виду та марки, оскільки залежать від багатьох факторів, наприклад, співвідношення основи та каталізатора, температури застигання тощо. Для визначення механічних властивостей конкретного силікону, що буде використовуватись під час досліджень, слід виготовити із нього дослідний зразок високої якості. Мається на увазі, що у зразку повинні бути відсутні як внутрішні, так і зовнішні дефекти. Далі дослідний зразок піддається випробуванням на спеціалізованому стенді з метою визначення його механічних характеристик. Отримані характеристики силікону вносяться у програми, в яких реалізовано метод скінченних елементів. За допомогою цього методу можна досліджувати напружено-деформований стан виробів, проводити його оптимізацію тощо.

Застосування силікону під час розроблення нових конструкцій виробів, таких як регульовані сопла Лавала [1] (установка охолодження димових газів – цементна галузь), ущільнення універсального превентора [2] (нафтогазова галузь) дозволить пришвидшити цей процес,

обробити велику кількість можливих варіантів та результатів експериментальних досліджень.

### Аналіз закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій

Ливарні силікони сьогодні використовують для виготовлення багаторазових форм під різноманітні вироби. Силіконові форми добре підходять для роботи з гіпсом, цементом, епоксидною смолою, глиною, милом, воском і парафіном тощо і, зазвичай, складаються з двох компонентів: основи та каталізатора. У таблиці 1 наведено характеристики силіконів для виготовлення форм [3]. Особливості силіконових компаундів наведено у таблиці 2.

Щодо особливостей роботи із силіконами на олов'яному каталізаторі (силікони серій SKR і SK), за джерелом [3], під час роботи необхідно дотримуватись відповідних рекомендацій.

Рекомендації щодо підготовки форми, основи та каталізатора:

- перед застосуванням силікону необхідно очистити модель від фарби, іржі, бруду. Також слід обробити поверхню моделі мастилом для форм. Це полегшить виймання моделі із форми та гарантує, що сторонні речовини не вплинуть на хід полімеризації. Можна зробити пробне залиття і впевнитись, що модель добре відділяється від форми;

- необхідно використовувати електронні ваги для дотримання точних вагових пропорцій основи та каталізатора;

- слід дотримуватись температурного режиму. Оптимальна температура компонентів – від плюс 20 до плюс 25°C. Після транспортування силіконового компаунда за температури плюс 5°C і нижче потрібно витримати його при вищезгаданій температурі протягом 24 годин, а тільки потім змішувати і заливати у форму.

Рекомендації щодо змішування і дегазації:

- для приготування розчину необхідно взяти 100 вагових частин основи і 2-3 вагові частини каталізатора (20-30 г каталізатора на 1 кг основи). Дозування каталізатора залежить від температури повітря (20 г в теплу пору і 30 г – в прохолодну) та бажаного часу затвердіння. Рекомендується використовувати 20 г каталізатора, якщо необхідно, щоб гелеутворення проходило повільно, 30 г – в прискореному режимі;

Таблиця 1 – Характеристики силіконів для виготовлення форм [3]

Характеристика	Марка силікону											
	SK-760 Силікон для форм	SKR-780 Силікон для форм	SKR-781 Силікон для форм	SKR-782 Силікон для форм	SKR-784 Силікон для форм	SKR-785 Силікон для форм	SKR-788 Силікон для форм	SK-761 Силікон для форм	SK-762 Силікон для форм	SK-764 Силікон для форм	SK-765 Силікон для форм	SK-766 Жаростійкий силікон для форм
Усереднена в'язкість	21000 СПЗ	15000 СПЗ	15000 СПЗ	19000 СПЗ	15000 СПЗ	43000 СПЗ	19000 СПЗ	8000 СПЗ	39000 СПЗ	50000 СПЗ	40000 СПЗ	18000 СПЗ
Твердість (за Шором А)	18-28	5 ±2	10 ±3	25 ±3	15 ±3	35 ±3	30 ±3	10	28	16 ±3	32	15-18
Опір роздиранню, кН/м	2,5	14	17	26	19	25	23	3	23	23	25	3,2
Відносне видовження на розрив, %	280	600	660	650	720	550	580	400	430	700	530	350
Умовна міцність на розрив, МПа	1,4	2,4	2,5	3,7	2,8	3,8	3,5	1,5	3,7	3,7	4,5	1,7
Співвідношення основи та катализатора	100:2-3	100:2	100:2	100:2	100:2	100:2	100:2	100:1,5-2	100:1,5-2	100:1,5-2	100:1,5-2	100:1,5
Лінійна усадка, %	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,1	0,2
Температурний інтервал експлуатації, °C	-60 +250	-60 +250	-60 +250	-60 +250	-60 +250	-60 +250	-60 +250	-60 +250	-60 +250	-60 +250	-60 +250	-60 +400
Густина, г/см <sup>3</sup> при 25 °C	1,28	1,1-1,15	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,15	1,34	1,15	1,19	1,43

Таблиця 2 – Особливості силіконових компаундів

Марка силікону	Особливості
SK-760	Застосовується для форм простої конструкції, може використовуватись до 100 разів, має середню твердість та плинність
SKR-780	Дуже м'який, рідкий та міцний
SKR-781	Рідкий, м'який та міцний
SKR-782	Відносно густий, твердий, може застосовуватись для форм великих розмірів та для виготовлення важких виробів
SKR-784	Придатний для виготовлення форм складної конструкції, рідкий, м'який, дуже еластичний
SKR-785	Густий, твердий, обмазувальний, застосовується для виготовлення важких виробів
SKR-788	Відносно густий, твердий, придатний для виготовлення великих форм та важких виробів
SK-761	Рідкий та м'який
SK-762	Відносно густий, твердий, застосовується для виготовлення великих форм та важких виробів
SK-764	Застосовується для виготовлення форм складної конструкції, відносно густий, м'який, дуже еластичний
SK-765	Найгустіший серед вищенаведених, твердий, міцний, може наноситись пензлем, не має усадки
SK-766	Може використовуватись для роботи за температури до + 400 °С, відносно твердий, має середню плинність і високу густину

– основу силікону необхідно помістити в чистий посуд. Далі слід починати змішування, поступово додаючи до неї каталізатор. Час змішування складає 3-5 хвилин. Не рекомендується використовувати порошкові барвники для індикації однорідності суміші, оскільки вони можуть містити невідомі речовини, що інгібують каталізатор, у результаті чого ускладниться полімеризація;

– особливу увагу слід звернути на дотримання пропорцій основи та каталізатора. Підвищена концентрація каталізатора може непередбачувано прискорити час затвердіння, недостатня (менше 2%) – призвести до неповного застигання;

– для видалення повітряних бульбашок необхідно помістити розчин у вакуумну установку на 1-3 хвилини за тиску 1,33-3,33 кПа. Варто зауважити, що у процесі дегазації суміш тимчасово збільшується в об'ємі у 2-3 рази, тому краще використовувати для змішування об'ємний посуд. За необхідності дегазацію можна проводити в декілька циклів.

Рекомендації щодо заливання та полімеризації:

– приготуваній розчин заливають у опалубку, в якій розміщена модель, і витримують за кімнатної температури протягом 6-24 годин. За більш низьких температур час затвердіння збільшується, і навпаки. Можливо прискорити

процес затвердіння з допомогою побутових нагрівальних приладів (духовки, фена, обігрівача), але не слід підіймати температуру вище плюс 60 °С. У цьому випадку форма втратить міцність;

– час життя компаунда за температури плюс 20°C становить 30 хвилин – у олов'яних компаундів серії SKR і 8-10 хвилин – у олов'яних компаундів серії SK;

– у літню пору період схоплювання суміші зменшується. Для подовження полімеризації до 90-240 хвилин можна використовувати каталізатор САТ-355;

– при створенні силіконових форм великого об'єму рекомендовано проводити заливання частинами, змішуючи відповідну кількість основи і каталізатора перед кожним етапом. Наприклад, якщо для створення форми необхідно 5 кг силікону, спочатку слід змішати 1 кг основи і 20-30 грамів каталізатора. Потім, з інтервалом не більше 30-40 хвилин, зробити ще 4 заливки (по 1 кг);

– отримані ливарні форми можуть експлуатуватись багаторазово за температур до плюс 200°C. Використання виготовлених силіконових форм за температур вище плюс 200°C призводить до втрати їх еластичності.

Також згідно з [3] наведено рекомендації щодо зберігання силікону та техніки безпеки при його використанні:

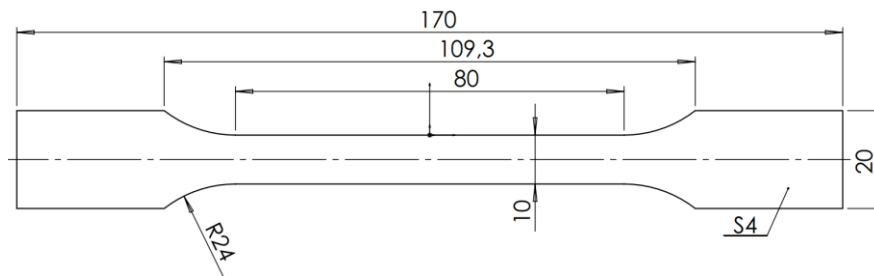


Рисунок 1 – Розміри дослідного зразка

– зберігати основу та каталізатор необхідно у сухому приміщенні, яке необхідно періодично провітрювати;

– слід уникати дії на силікон різноманітних атмосферних впливів (не допускати потрапляння сонячних променів та дощової води);

– перед використанням основу рекомендується перемішати;

– необхідно уникати потрапляння каталізатора на шкіру або очі. У випадку потрапляння необхідно промити ділянку тіла водою з м'яким засобом, а очі промивати проточною водою протягом 15 хвилин. Після цього слід звернутися до лікаря.

– термін зберігання силікону – 9 місяців. Якщо основа силікону візуально не змінилася і при повторному zalиванні всі показники відповідають технічній характеристиці, його можна використовувати і після закінчення терміну придатності.

### Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Мета роботи полягає у розробленні способу приготування сумішей основи та каталізатора для виготовлення експериментальних зразків без застосування вакуумної установки.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– проаналізувати спосіб змішування, дегазації та zalивання силіконового компаунда? - KR-788, що рекомендується його виробником [3];

– запропонувати спосіб змішування основи із каталізатором без використання вакуумної установки для усунення дефектів дослідного зразка;

– виготовити відповідно до запропонованого способу зразок із силікону SKR-788 та дослідити якість його zalивки.

### Викладення основного матеріалу

Для проведення різноманітних досліджень моделей елементів машин та обладнання, які відносяться до різних галузей: регульовані соп-

ла Лавалля [1] – цементна; ущільнення превенторів [2], пакерів, поршнів, клапанів – нафтогазова галузь тощо, їх моделі можна виготовити із силікону.

Проте під час досліджень виготовлених із силікону елементів моделей машин та обладнання необхідно мати інформацію – залежність між видовженням і напруженням у зразку під час його розтягу. Варто зауважити, що встановити такі залежності можна за допомогою спеціального стенду, але на їх точність суттєво впливатиме структура зразків, а саме, наявність зовнішніх та внутрішніх дефектів.

Для виготовлення дослідних зразків вибрано силікон SKR-788. Характеристики силікону наведені у таблиці 1. Для кращого відділення силікону із форми використано воскову розділову пасту Release Wax [4], що використовується для відокремлення: силікону від силікону; поліуретану від поліуретану; інших формувальних матеріалів від більшості поверхонь. Паста наноситься м'якою тканиною, губкою або пензлем, і після висихання впродовж 30-60 хвилин легко полірується м'якою бавовняною тканиною. Пористі поверхні можуть легко всмоктувати пасту, тому може знадобитись багатощарове нанесення.

Для дослідження властивостей силікону слід виготовити дослідний зразок за розмірами, наведеними на рисунку 1.

Для заливання дослідного зразка було виготовлено спеціальну форму із фанери (рис. 2). Особливістю цієї форми є те, що вона складається із окремих елементів та може бути скомпонована у одну велику форму, в якій можна вилити декілька зразків одночасно (рис. 3). Це важливо ще й тим, що при заливанні одночасно декількох зразків всі вони будуть мати однакові властивості, оскільки основа і каталізатор будуть розведені у однаковій пропорції.

Під час збирання елементів форми 1 застосовуються напрямні 2 (рис. 4), що вставляються у відповідні отвори. З'єднання елементів форми відбувається за допомогою затискачів 3.

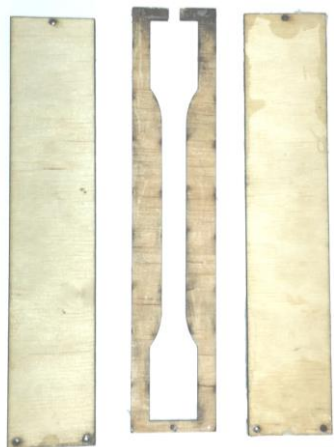


Рисунок 2 – Елементи форми для виливання дослідного зразка



Рисунок 3 – Компоновка елементів форми для виготовлення дослідних зразків

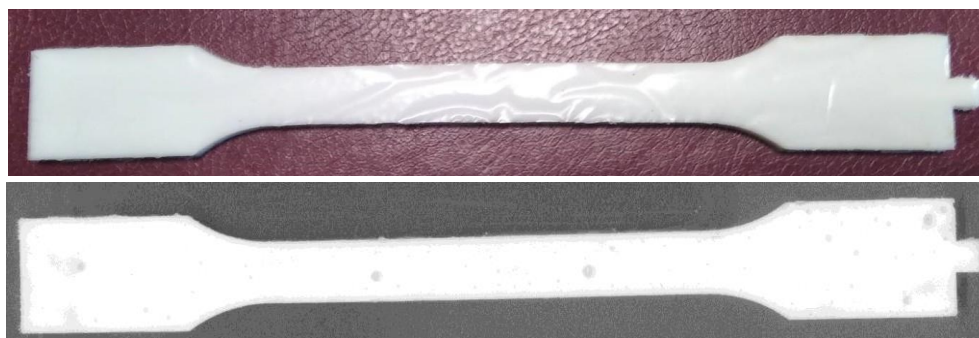


1 – елементи форми; 2 – напрямні; 3 – затискачі

Рисунок 4 – Форма для виливання дослідного зразка у зборі



Рисунок 5 – Поліетиленова прокладка



а – зовнішні; б – внутрішні

Рисунок 6 – Дефекти дослідного зразка

Варто зауважити, що при першому дослідженні зразка, щоб уникнути прилипання силікону до елементів форми було застосовано поліетиленову прокладку (рис. 5). Змішування основи і каталізатора проводилось у відкритій посудині з допомогою пластикової лопатки. Заливання силікону проводилось у відкриту форму, яка закривалась поліетиленовою прокладкою і елементом форми.

Після 24 годин дослідні зразки було вилучено із форми. На отриманих дослідних зразках було виявлено зовнішні та внутрішні дефекти (рис. 6). Зовнішнім дефектом є хвилястість зовнішньої поверхні (обумовлена наявністю повітря під поліетиленовою прокладкою та її зминанням, внутрішній дефект – неоднорідна структура матеріалу (через наявність повітря у силіконі, яке потрапляє у нього під час змішування основи з каталізатором).

Також було виготовлено дослідні зразки аналогічним способом, де замість поліетиленових прокладок було застосовано воскову розділювальну пасту. Але і такі заходи не дали можливості отримати дослідний зразок однорідної структури.

На наступному етапі було замінено окремі елементи форми із фанери на елементи, виготовлені із оргскла (акрилу) (рис. 7). Це дало змогу отримати високу якість зовнішньої поверхні зразка за рахунок меншої шорсткості оргскла порівняно із фанерою. Також застосування оргскла дало можливість візуально спостерігати за процесом заливання силікону в форму. Проте навіть у випадку застосування елементів, виготовлених із оргскла, не вдалося отримати однорідну внутрішню структуру тіла дослідного зразка.



Рисунок 7 – Елементи форми для дослідного зразка, виготовлені із оргскла

Для отримання однорідної структури дослідного зразка було запропоновано новий підхід до змішування основи з каталізатором – використання шнека, що приводиться у обертання за допомогою двигуна (рис. 8), а заповнення форм відбувалося за допомогою циліндра (рис. 9). Змішування основи із каталізатором проводили безпосередньо у циліндрі.

Застосувавши новий підхід до змішування основи з каталізатором виготовлено серію дослідних зразків, у яких були відсутні зовнішні та внутрішні дефекти, які спостерігались у попередніх зразках. Один із зразків, що виготовлені із застосуванням нового підходу, зображений на рисунку 10.

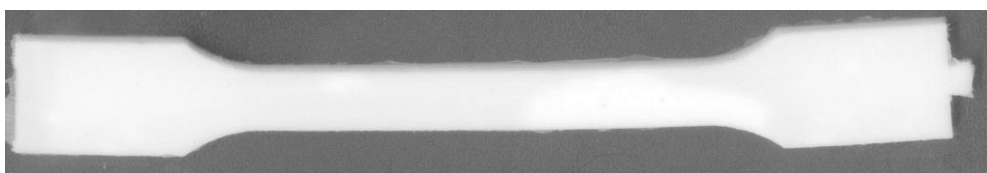


Рисунок 10 – Зразок без дефектів, виготовлений із силікону



Рисунок 8 – Шнек, що приводиться у обертаний рух за допомогою двигуна



Рисунок 9 – Заповнення форм за допомогою циліндра

### Висновки

Проаналізувавши рекомендації виробника щодо змішування, дегазації та заливання силіконового компаунду SKR-788, встановлено, що для отримання із нього якісного виробу слід їх чітко дотримуватись, а також для дегазації силікону необхідно використовувати вакуумну установку.

Виготовивши дослідний зразок із силікону SKR-788 згідно рекомендацій виробника та зроблених для цього форм, було виявлено дефекти як зовнішні (хвилястість поверхні) дослідного зразка, так і внутрішні (наявність буль-

башок повітря у структурі матеріалу). При цьому не використовували вакуумну установку, а змішування проводилось у відкритій ємності. Для подальшого дослідження механічних властивостей силікону такі зразки є непридатними.

Для усунення вищенаведених дефектів зразків запропоновано змішувати основу із каталізатором за допомогою шнека. Причому, робити це з каталізатором слід безпосередньо у циліндрі, за допомогою якого і відбуватиметься заповнення форми. Щодо матеріалів, з яких слід виготовляти форму для заливання зразка, то варто використовувати оргскло (акрил) замість фанери (навіть з наявними поліетиленовими прокладками, або із застосуванням воскових розділових паст). Виготовивши відповідно до запропонованого способу зразки із силікону SKR-788 та дослідивши їх на якість заливки, встановлено, що дефекти, які були наявні у попередніх зразках, відсутні.

### **Література**

1. Михайлюк В. В., Лях М. М., Процюк В. Р., Дейнега Р. О., Витриховський Є. А., Стецюк Р. Б. Розроблення конструкції регульованого сопла Лавалія. *Нафтогазова енергетика*. 2022. № 2(38). С. 85–92. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2\(38\)-85-92](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-85-92)

2. Михайлюк В. В., Чудик І. І., Мосора Ю. Р. Про можливість застосування імітаційного моделювання для дослідження та проектування ущільнювачів універсальних превенторів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2021. № 1(50). С.53–61. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-1\(50\)-53-61](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-1(50)-53-61)

3. SKR-788 – Твердий силікон для форм. URL: <https://silikoni.com.ua/ru/skr-788-silikon-dlya-form> (дата звернення: 15.11.2023).

4. Release Wax – воскова розділова паста (40 грам). URL: <https://silikoni.com.ua/release-wax-voskova-rozdilova-pasta-40-hram> (дата звернення: 15.11.2023).

### **References**

1. Mykhailiuk V. V., Liakh M. M., Protsiuk V. R., Deineha R. O., Vytrykhovskiy Ye. A., Stetsiuk R. B. Rozroblennia konstruktsii rehulovano-ho sopla Lavalia. *Naftohazova enerhetyka*. 2022. No 2(38). P. 85–92. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2\(38\)-85-92](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2022-2(38)-85-92) [in Ukrainian]

2. Mykhailiuk V. V., Chudyk I. I., Mosora Yu. R. Pro mozhlyvist zastosuvannia imitatsiinoho modeliuvannia dlia doslidzhennia ta proiektuvannia ushchilniuvachiv universalnykh preventoriv. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalno-ho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2021. No 1(50). P.53–61. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-1\(50\)-53-61](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-1(50)-53-61) [in Ukrainian]

3. SKR-788 – Tverdyy sylikon dlia form. URL: <https://silikoni.com.ua/ru/skr-788-silikon-dlya-form>. [in Ukrainian]

4. Release Wax – voskova rozdilova pasta (40 hram). URL: <https://silikoni.com.ua/release-wax-voskova-rozdilova-pasta-40-hram> [in Ukrainian]