

© К.С. Заболотний¹, В.Ю. Кухар¹, О.В. Панченко¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОМПОЗИТНОГО ФЕНОЛ-КАПРОНОВОГО ФУТЕРУВАННЯ БАРАБАНІВ ШАХТОВИХ ПІДЙМАЛЬНИХ МАШИН

© K. Zabolotny¹, V. Kukhar¹, O. Panchenko¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

TECHNOLOGY OF MANUFACTURING COMPOSITE PHENOL-NYLON LINING OF DRUMS OF MINE HOISTING MACHINES

Мета. Розробка промислової технології виготовлення фенол-капрону для футерування барабанів шахтних підйомних машин, з подальшими випробуваннями матеріалу в промислових умовах.

Методика. Комплексний підхід, що включав кілька етапів. Розробка технологічного процесу виготовлення фенол-капрону базувалася на детальному аналізі оптимальних умов синтезу та формування матеріалу. Проведення промислових випробувань забезпечило глибоке вивчення фізико-механічних властивостей фенол-капрону, що є критичним для його ефективного використання. Виготовлення і встановлення футерування на шахтні підйомні машини, що дало можливість оцінити практичність застосування розробленого матеріалу.

Результати. Успішна розробка промислової технології виготовлення фенол-капрону, що відкриває нові можливості для виробництва футерувальних матеріалів. Дослідження фізико-механічних характеристик матеріалу виявило його високі міцності та зносостійкі властивості, що є критичними для застосування в шахтних умовах.

Наукова новизна. Уперше встановлено та детально проаналізовано залежності між технологічними параметрами процесу виготовлення фенол-капронових прес-композитів (вміст зв'язувального компонента, температура пресування, питомий тиск під час пресування) та ключовими фізико-механічними характеристиками отриманого матеріалу (тимчасовий опір і відносне подовження). Застосування стандартизованих методів випробувань дозволило об'єктивно оцінити вплив зміни технологічних параметрів на властивості матеріалу. Використання математичної статистики для обробки результатів експериментів забезпечило отримання рівнянь регресії, які кількісно описують вказані залежності.

Практична значимість. Розроблена технологія забезпечує оптимальні умови для досягнення максимальної міцності фенол-капронового композиту. Це сприяє підвищенню ефективності та безпеки роботи шахтних підйомних машин.

Ключові слова: фенол-капрон, технологія виготовлення, шахтні підйомні машини, футерування, фізико-механічні характеристики, безпека в шахтах, інноваційні матеріали, промислові випробування.

Вступ. Для барабанів підйомних машин використовують футерування з високоміцних (цінних) порід дерева, яке наразі заборонено, та полімерних композитних матеріалів. Промисловість випускає широку номенклатуру шаруватих пластиків, зокрема й різні марки текстоліту, які мають високі характеристики міцності та малий коефіцієнт тертя. Текстоліт виготовляють на основі бавовняно-

паперових тканин; використання синтетичних тканин, наприклад, поліамідної, не практикується. Це пов'язано з тим, що під час теплової обробки в процесі пресування може відбуватися руйнування поліамідної тканини фенол-формальдегідною смолою через набрякання тканини та розчинення її у фенолах смоли і взаємодію груп поліаміду з метилольними групами смоли, що призводить до значного зниження фізико-механічних характеристик прес-композиційного матеріалу. Таким чином, висока вартість і дефіцитність, здебільшого через дорожнечу наповнювача у вигляді бавовняно-паперових тканин, обмежує застосування прес-композитів у гірничодобувній промисловості як матеріалу для неметалевого пружного футерування канатних барабанів підйомних машин.

На збагачувальних фабриках постійно утилізують у великій кількості поліамідну фільтротканину, що була у використанні. Ця фільтротканина після використання за прямим призначенням практично не втрачає своїх фізико-механічних характеристик і може бути використана як наповнювач при виготовленні прес-композиту.

У зв'язку з цим, актуальним є завдання створення нового матеріалу з дешевим наповнювачем (основна складова прескомпозиту за вартістю) для футерування канатних барабанів підйомних машин.

Постановка завдання. Обґрунтувати та розробити промислову технологію виготовлення прес-композиційного матеріалу на основі відходів капронової фільтротканини для пружного футерування канатних барабанів шахтних підйомних машин.

Виготовити композит та елементи пружного футерування шатної підйомної машини з нового матеріалу. Провести випробування пружного футерування у промислових умовах.

Основна частина. У випущених підйомних машин канат намотується на металевий барабан машини, який має спеціальну нарізку під канат. Між канатом і сталевим барабаном (обидві-чайкою) виникають великі контактні напруження, що призводять до зниження терміну служби каната. Під час експлуатації підйомної установки через зміни гірничо-геологічних умов часто виникає необхідність змінити діаметр і крок укладання каната на барабан.

Ці фактори зумовлюють необхідність створення підйомних машин із пружним знімним футеруванням барабана. Для підйомних машин старого зразка застосовували тільки дерев'яне футерування з високоміцних (цінних) порід, яке нині заборонено. Тому виникла необхідність створення футерування барабана, виготовленого з дешевого синтетичного матеріалу.

Одним з найбільш придатних матеріалів для футерування барабанів підйомних машин, є текстоліт, що складається зі смоли та шаруватого наповнювача з хорошими показниками міцності та малим коефіцієнтом тертя з мастилом. Як наповнювач для текстоліту використовують нову бавовняну тканину. Але застосування текстоліту як футерування стримується його високою вартістю. Висока вартість композиційних матеріалів визначається вартістю наповнювача. Використання невеликих за площею відрізків тканини для виготовлення композиційних матеріалів призводить до зниження механічних властивостей матеріалу. Тому

створення нового композиційного матеріалу зводиться, насамперед, до пошуків дешевого наповнювача.

Використання відходів текстилю як наповнювача композиційного матеріалу призводить до значного зниження його вартості. Гірничозбагачувальні фабрики металургійної промисловості широко застосовують поліамідну тканину в якості фільтрів для фільтрації збагачених руд. Розкрій тканини являє собою шматки у вигляді трапеції з довжиною основи 1 м і висотою 0,75 м. Після використання тканини за прямим призначенням вона йде у відходи, тому що швидко втрачає свої функції внаслідок забивання пор концентратом. Склад концентрату: оксиди заліза – 65,0%, CaO – 0,23%; MgO – 0,32%, Al₂O₃ – 0,35%, SiO₂ – 8,7% та ін. Тільки в Кривбасі у відходи йде щодоби близько 3000 м² дорогої тканини, хоча вона практично не втрачає своїх фізико-механічних характеристик і після очищення цілком може бути використана надалі як фільтрувальний елемент.

Фільтротканину поліамідну, що являє собою переплетення капронових ниток з метричним номером 34 – 34,5, випускає київське підприємство ПРАТ «Технофільтр, Фабрика технічних тканин».

Запропоновано використовувати відходи поліамідної фільтротканини як наповнювач прес-композитного матеріалу, що дає змогу не тільки розв'язати проблему утилізації відходів гірничорудної промисловості, а й створити дешевий прес-композиційний матеріал, необхідний для футерування барабанів шахтних підйомних установок.

Технологію виготовлення прес-композиційного матеріалу з фільтротканини можна представити у вигляді чотирьох основних операцій: очищення тканини від концентрату; просочення наповнювача (тканини) сполучною речовиною; сушка; гаряче пресування.

Під час розроблення технології виникає ціла низка питань, що потребують вирішення на етапі проведення досліджень для досягнення необхідних фізико-механічних властивостей композитного матеріалу, призначеного для футерування.

Вибір наповнювача та сполучного прес-композиту. Утилізована фільтротканина поліамідна значно забруднена оксидами заліза та іншими домішками, має чорний колір. Товщина шару домішок на поверхні тканини може досягати 3 мм. Наявність надлишку концентрату на поверхні безумовно призведе до погіршення її змочування сполучною речовиною.

Очищення тканини можна проводити різними механічними способами. Обрано найпростішу, а отже, й економічно доцільну схему очищення шматків тканини, в якій тканина механічно вибивається, а вибитий продукт фільтрації та його залишки з поверхні тканини прибирають за допомогою повітроочищення.

У промислових умовах для механізації процесу просочення доцільно мати безперервне полотно. З можливих варіантів зшивання шматків відпрацьованої фільтротканини у вигляді трапецій у безперервну стрічку перевагу віддано з'єднанню тканини внахліст за допомогою точкового спаювання.

У якості сполучну речовину для просочення наповнювача обрано бакелітовий лак марки ЛБС-1 або ЛБС-4 за ГОСТ 901-78, на основі фенол-

формальдегідної смоли (ФФС). Параметри лаку для просочення мають відповідати вимогам ГОСТ 901-78. У якості наповнювача обрано поліамідну фільтротканину з метричним номером 34–34,6, очищену від продуктів фільтрації (65,0 % оксидів заліза та ін.).

Вибір способу просочення і сушіння тканини. Основними параметрами, що впливають на ступінь проникнення сполучного в пори наповнювача і його кількість, є в'язкість і концентрація просочувального розчину, вид і властивості наповнювача, тривалість перебування наповнювача в просочувальному розчині, конструкція просочувального пристрою тощо.

Існує кілька способів просочення. За одним із них наповнювач занурюють у розчин сполучного, видаляючи потім розчинник у сушильній камері. Інший спосіб полягає в просоченні наповнювача рідким або розплавленим сполучним, що не вимагає сушіння просоченого матеріалу. За третім способом сполучну речовину або її компоненти вводять безпосередньо в процесі виготовлення наповнювача.

Технологічна схема процесу просочення і сушіння наповнювача складається з підігріваної ванни зі сполучною речовиною, віджимних валків і сушильної камери. Крім сталевих валків для віджимання сполучного використовують спеціальні віджимні ножі, розташовані один під одним з різних боків наповнювача, що просочується. У цьому випадку просочуване полотно притискається силою натягу до леза ножа, який знімає надлишки нанесеного просочувального розчину з поверхні тканини. Леза ножів ретельно оброблені по всій довжині з певним радіусом заокруглення, від якого залежить кількість сполучного, що наноситься на тканину. Зусилля притискання ножів до просоченої основи регулюють спеціальним пристроєм, який дає змогу рівномірно наносити задану кількість сполучної речовини на всю поверхню тканини і знімати надлишок просочувального розчину з поверхні тканини безпосередньо в просочувальну ванну.

Відомі кілька видів просочувальних машин, що принципово відрізняються тільки конструкцією сушильних камер, які можуть бути горизонтальними або вертикальними.

У процесі просочення велике значення мають такі технологічні параметри, як: температура по зонах сушильної камери машини, швидкість руху тканини, температура і кількість повітря, що подається в сушильну камеру машини, рівень сполучного в просочувальній ванні, його температура і в'язкість.

До недоліків повітряного сушіння необхідно віднести таке: нерівномірне протікання процесу сушіння по перетину наповнювача. Повітря нагріває наповнювач з поверхні, теплота поступово проникає всередину наповнювача. При цьому швидкість сушіння з поверхні стає більшою, ніж усередині, і розчинник дифундує з пор на поверхню. Подача занадто гарячого повітря, особливо на початку сушильного каналу, призводить до утворення на висохлій поверхні кірки сполучного, що вкрай ускладнює подальше сушіння.

Застосування надвисокочастотних хвиль дає можливість більш рівномірно розподілити сполучна по всій товщині тканини наповнювача, що призводить до більш високих показників міцності кінцевого продукту. Але мікрохвильове

сушіння (також як і інфрачервоне) перешкоджає міграції частинок сполучного до поверхні наповнювача за рахунок однорідного прогрівання наповнювача. За звичайного ж процесу сушіння поверхня наповнювача прогрівається максимально, це спричиняє інтенсивне переміщення частинок повітря до поверхні, що призводить до зниження вмісту смоли всередині тканини.

Після закінчення процесу сушіння тканина виходить із сушильної камери, охолоджується обдуванням повітрям для припинення конденсації сполучної речовини і запобігання склеювання полотна під час намотування в рулон.

Вертикальні просочувальні машини, які в основному застосовують нині у вітчизняній промисловості, мають невисоку продуктивність через недостатню інтенсивність подачі гарячого повітря для сушіння.

У промисловості використовують принципово нову конструкцію просочувальної машини – вакуумно-автоклавну установку типу ВАП-5, в якій відбувається пропитка тканин сполучною під тиском і вакуумна сушка.

Найприйнятнішою для технологічного процесу виготовлення фенол-капрону на основі поліамідного наповнювача є така схема його просочення і сушіння.

Стрічку поліамідну пропускають крізь ванну зі сполучною речовиною у вигляді бакелірового лаку, після чого надлишок сполучної речовини віджимають між валками. Просочену стрічку з невеликим натягом намотують з металевою сіткою (для запобігання злипання) на барабан. Барабан із тканиною і сіткою встановлюють в автоклав, де відбувається вакуумне сушіння тканини протягом 6...8 годин. Така схема просочення може бути рекомендована для виробництва фенол-капрону в цеху продуктивністю 100...200 т/рік. Схема має простоту виконання і є екологічно чистою.

Вплив технологічних факторів на механічні характеристики фенол-капрону. Для отримання прес-композиту із заданими фізико-механічними характеристиками було вивчено вплив технологічних факторів (вміст зв'язувального у фенол-капроні в межах 30...50%, температури пресування – 125...150°C і питомого тиску під час пресування – 2,5...7,5 МПа) на тимчасовий опір і відносне подовження під час випробувань на розрив.

Визначення тимчасового опору і відносного подовження проводили за ГОСТ 11262-80 на зразках, вирізаних із плит, відпресованих за трьома режимами за різного вмісту сполучного. На рис. 1 наведена одна з діаграм, що характеризує поведінку фенол-капрону при розтягуванні до руйнування.

Щільність фенол-капрону визначали методом гідростатичного зважування за ДСТУ Б EN 772-3:2013.

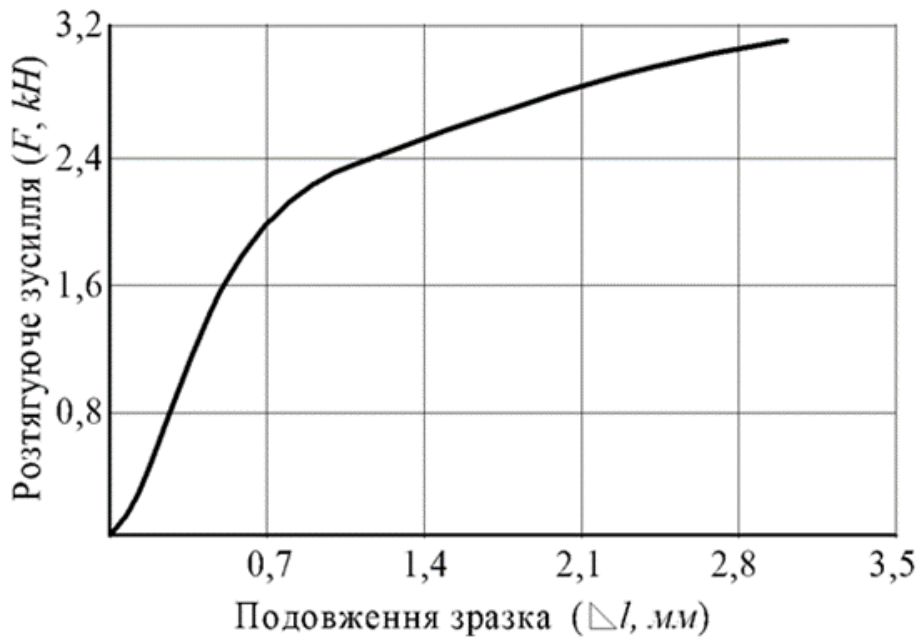


Рис. 1. Діаграма випробування фенол-капрону на розтягнення

На рис. 2 наведені результати експериментальних досліджень фенол-капрону у вигляді графіків зміни σ_{ϵ} тимчасового опору (руйнівна напруга під час розриву) і ϵ – відносного подовження під час розтягування з вмістом смоли в препрезі відповідно 34...39%, 38...42% та 42...47% залежно від питомого тиску під час пресування у межах 2,5...7,5 МПа і температури $t = 125...150^{\circ}\text{C}$.

На рис. 3 – графіки зміни густини фенол-капрону за вмісту смоли в препрезі 34...47%, питомого тиску 2,5...7,5 МПа і температури $t = 125...150^{\circ}\text{C}$.

Результати експериментів для величини тимчасового опору були оброблені методами математичної статистики. Було отримано рівняння регресії

$$\sigma_{\epsilon} = 296 + 36t + 20p - 10c - 8,75tp + 6,25tc - 6,75pc - 5tpc,$$

де σ_{ϵ} – тимчасовий опір; t – температура пресування; p – питомий тиск на пресформу під час пресування; c – вміст сполучного.

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок, що виготовлення фенол-капрону з оптимальними значеннями технологічних параметрів доцільно виконати за наступним режимом: вміст смоли в препрезі – 38...42%; температура пресування – 140°C ; час витримки після досягнення температури пресування – 3...4 хв; питомий тиск під час пресування – 7,5 МПа.

Лабораторні порівняльні випробування матеріалів на зносостійкість. З метою визначення експлуатаційних характеристик фенол-капрону були проведені порівняльні лабораторні випробування на зносостійкість під час примусового абразивного зношування поряд з відомими матеріалами: дуб, вторинний капрон і текстоліт марки ПТ.

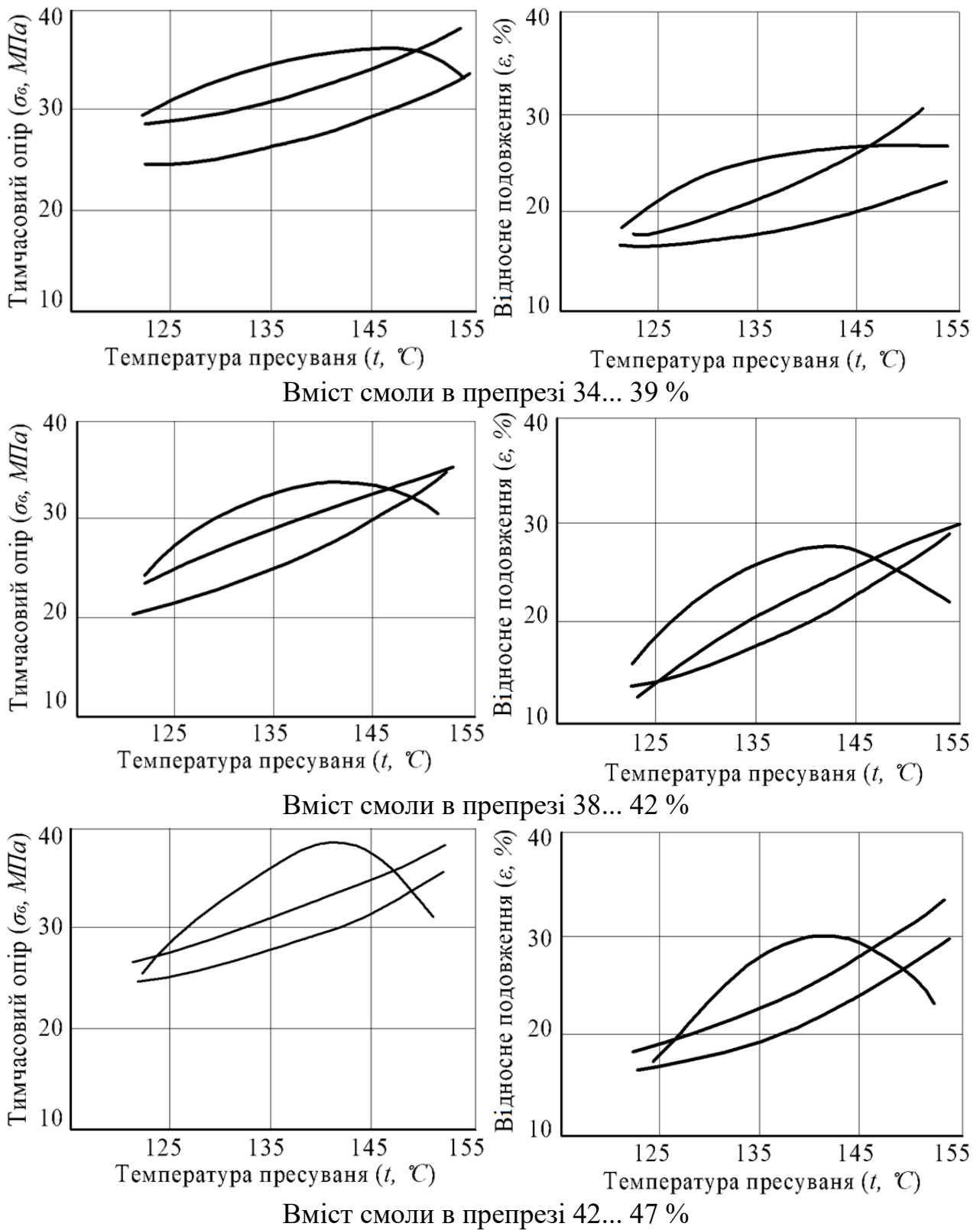


Рис. 2. Графіки зміни тимчасового опору (σ_0 , МПа) та відносного подовження (ϵ , %) при розриві від температури пресування (t , °C) при різних вмістах смоли в препрегах

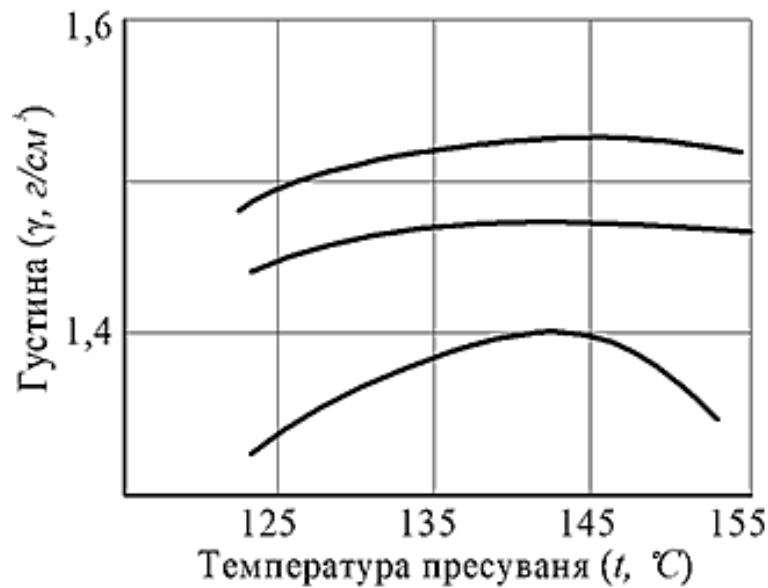


Рис. 3. Графіки зміни густини фенол-капрону (γ , г/см³) від температури пресування (t , °C) за вмісту смоли в препрезі 34...47%

Для проведення випробувань використовували установку для примусового абразивного зношування матеріалів, що являє собою нерухомий круглий стіл, на якому встановлюють зразки, що випробовуються, і порожнистий вал зі шківом, у якому зроблено сопла, через які розкидають абразивний матеріал, що зношує поверхні різних матеріалів за один і той самий час.

З кожного випробовуваного матеріалу виготовляли по п'ять зразків. Розміри зразків вимірювали з точністю 0,1 мм і зважували з точністю 0,1 г. Визначення величини зносостійкості матеріалів проводили за зміною ваги зразка під час випробування. Величину зносу визначали за формулою:

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\gamma F},$$

де h – величина зносу зразка, мм; p_1 та p_2 – вага зразка відповідно до і після випробування, г; γ – щільність матеріалу, г/мм³; F – площа зразка, що піддається зносу, мм².

Для порівняння використовували середньоарифметичну величину зносу за п'ятьма зразками кожного матеріалу, як найбільш вірогідну.

Величину зносу зразків із фенол-капрону, виготовленого на основі фільтротканини, що була у використанні, як середньоарифметичну величину, брали за 100 %. Величину зносу інших досліджуваних матеріалів визначали як процентне відношення до фенол-капрону.

Результати випробувань наведено в таблиці 1.

Таким чином, можна зробити висновок, що за зносостійкістю фенол-капрон значно перевершує традиційно застосовуваний для футерування барабанів шахтних підйомних машин матеріал дуб і знаходиться на рівні зносостійкості текстоліту. Зносостійкість фенол-капрону можна підвищити за рахунок поліпшення очищення фільтротканини.

Порівняльні випробування на зносостійкість

№ п/п	Випробовуваний матеріал	Середня величина зносу за п'ятьма зразками, мм	Величина відносного зносу у % від фенол- капрону
1	Фенол-капрон з очищеної фільтротканини	0,31	100,0
2	Фенол-капрон із чистої фільтротканини	0,16	54,3
3	Текстоліт ПТ	0,31	100,0
1	Фенол-капрон з очищеної фільтротканини	0,17	100,0
2	Капрон вторинний	0,14	83,0
3	Дуб	0,92	540,0

Нестандартне обладнання, що використовується в цеху виготовлення фенол-капрону.

Для оснащення цеху з промислового виготовлення фенол-капрону був розроблений комплект робочих креслеників та 3D-моделі основного обладнання.

Перелік нестандартного обладнання цеху:

- ділянка з виготовлення прес-композиційного матеріалу фенол-капрон (рис. 4, а);
- піддон для брудної фільтротканини;
- вакуум-стіл (рис. 4, б);
- машина для термоімпульсного зварювання (рис. 4, в);
- установка для просочення стрічки (рис. 4, г);
- бак просочувальний;
- установка для сушіння стрічки;
- візок із піддоном;
- вентилятор В-Ц4-75-5;
- механізм приймального барабана;
- стіл розкрою для стрічки.

Результати дослідно-промислового випробування футерування з фенол-капрону. На основі вживаної поліамідної тканини була виготовлена і встановлена пружна футеровка з матеріалу фенол-капрон на підйомній машині Ц-3,5×2 [5, 6]. Тип підйому – клітковий, діаметр каната 37,5 мм, крок укладання каната – 40 мм, максимальний натяг каната становить 10 тс, швидкість підйому 5 м/с, довжина каната 800 м, середнє число циклів підйому 100. Футерування являє собою систему складових двометрових брусів, закріплених болтами на обичайці барабана. Брус складається з футерувального сегмента, виготовленого з матеріалу фенол-капрон товщиною 55 мм і шириною 215 мм.

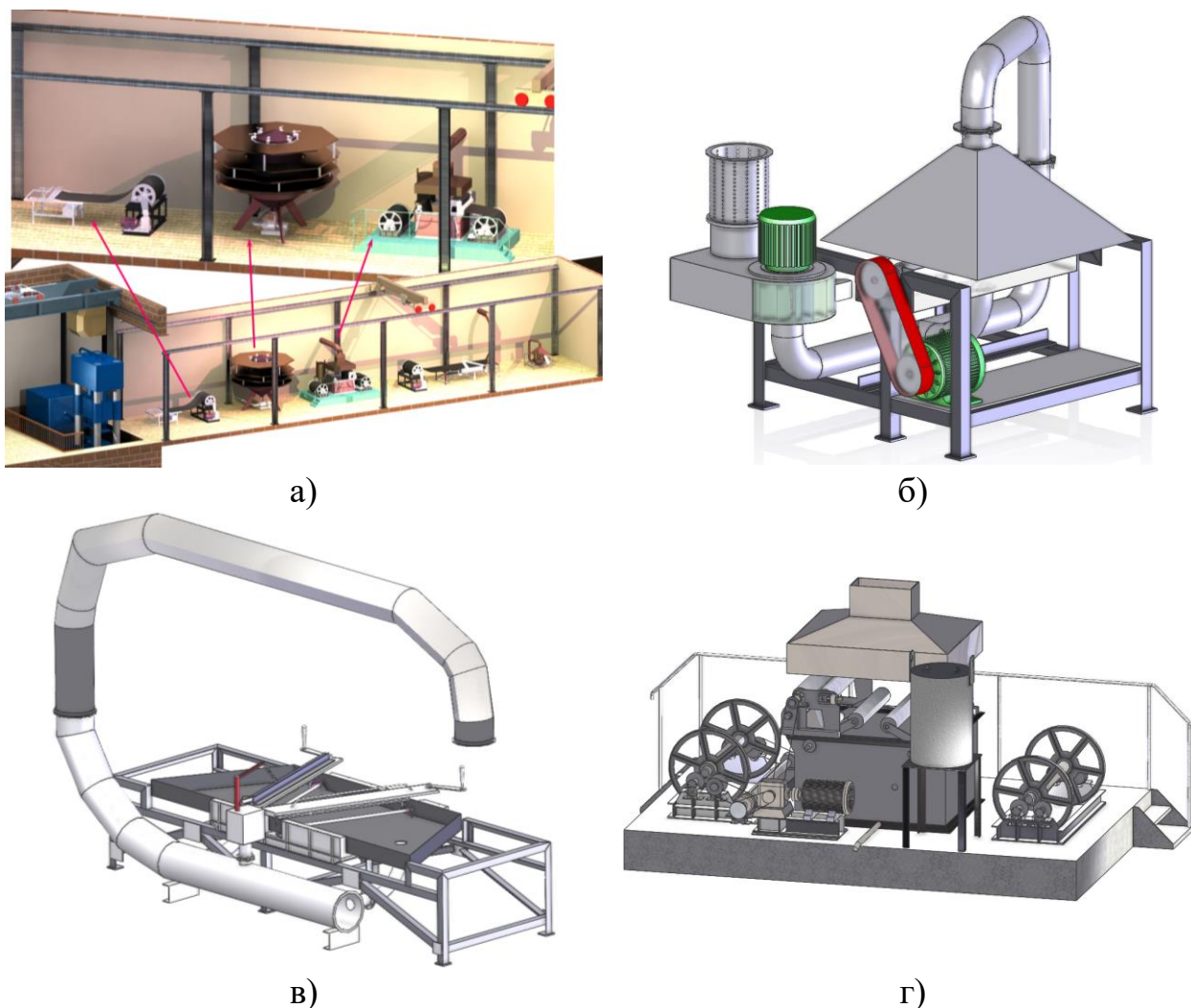


Рис. 4. 3D-моделі деякого нестандартного обладнання, що використовується в цеху виготовлення фенол-капрону: загальний вигляд цеху (а), вакуум-стіл (б), машина для термоімпульсного зварювання (в), установка для просочення стрічки (г)

Футерування з фенол-капронового композиту пройшло дослідно-промислові випробування на протязі 6 років при штатному навантаженні підйомної машини.

Результати шестирічного спостереження за роботою футерування в промислових умовах дають змогу зробити висновок про надійність і працездатність футерування барабанів шахтних підйомальних машин, виготовленого з прес-композиту марки фенол-капрон.

За період експлуатації футерування зрізаних гребінців та розшарувань фенол-капрону біля гвинтової канавки не виявлено. На гвинтовій канавці мають місце чотирнадцять окремих сколів завдовжки 10–25 мм кожен. Заміри профілю перерізу гвинтової канавки, зроблені в чотирьох точках за максимального кута дев'яції виявили знос, що не перевищує 1–1,5 мм.

Висновки.

Вирішена актуальна науково-технічна задача створення неметалевого пружного футерування барабанів шахтних машин на основі прескомпозиційного матеріалу фенол-капрон.

Розроблена технологія одержання прескомполиту фенол-капрон дає змогу одержати прескомполит високої зносостійкості, з необхідними фізико-механічними властивостями. Виконано компонування цеху виготовлення прескомполиту фенол-капрон, розроблено робочі кресленики нестандартного устаткування для його виготовлення.

Виготовлений експериментальний зразок футерування з прескомполиту фенол-капрон пройшов шестирічну експлуатацію, і показав високі експлуатаційні характеристики.

Перелік посилань

1. Ehrenstein, G. W., Riedel, G., & Trawiel, P. (2004). *Thermal Analysis of Plastics. Thermal Analysis of Plastics, I–XXIX*. Publishers, Munich.
<https://doi.org/10.3139/9783446434141.fm>
2. Ehrenstein, G. W., & Pongratz, S. (2013). *Resistance and Stability of Polymers. Resistance and Stability of Polymers, I–XXIII*. Hanser Publishers, Munich.
<https://doi.org/10.3139/9783446437098.fm>
3. Мельник, Л.І. (2016). *Хімія і фізика полімерів: Навч. посіб.* Київ: НТУУ "КПІ".
4. Гончаренко, В.В., & Коваленко, І.В. (2007). *Технологія композиційних матеріалів: Навч. посіб.* Київ.
5. Zabolotnyi, K., Panchenko, O., Zhupiiiev, O., & Haddad, J. S. (2019). Justification of the algorithm for selecting the parameters of the elastic lining of the drums of mine hoisting machines. *E3S Web of Conferences*, 123, 01021.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301021>
6. Zabolotnyi, K., Panchenko, O., & Zhupiiiev, O. (2019). Development of the theory of laying a hoisting rope on the drum of a mining hoisting machine. *E3S Web of Conferences*, 109, 00121.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900121>

ABSTRACT

Objective. The development of an industrial technology for the production of phenolic caprolactam for lining the drums of mine hoisting machines, followed by testing of the material in industrial conditions.

Methodology. A comprehensive approach that included several stages. The development of the technological process for the production of phenolic caprolactam was based on a detailed analysis of the optimal conditions for synthesis and material formation. The conduct of industrial tests ensured an in-depth study of the physical and mechanical properties of phenolic caprolactam, which is critical for its effective use. The manufacturing and installation of linings on mine hoisting machines provided an opportunity to assess the practicality of the developed material.

Results. The successful development of an industrial technology for the production of phenolic caprolactam opens new possibilities for the production of lining materials. The study of the physical and mechanical characteristics of the material revealed its high strength and wear resistance properties, which are critical for application in mining conditions.

Scientific novelty. For the first time, a comprehensive investigation has been conducted on the dependencies between the technological parameters of the phenol-caproic press composite manufacturing process (binder content, pressing temperature, specific pressure) and the key physical and mechanical characteristics of the resulting material (tensile strength and relative elongation). Standardized test methods were employed to ensure an objective assessment of the impact of parameter variations on material properties. Subsequently, statistical analysis of the experimental data yielded regression equations that quantitatively describe these dependencies.

Practical significance. The developed technology ensures optimal conditions for achieving maximum strength of the phenolic caprolactam composite. This contributes to increasing the efficiency and safety of mine hoisting machines' operation.

Keywords: *phenol-nylon, production technology, mine hoisting machines, lining, physico-mechanical characteristics, safety in mines, innovative materials, industrial testing.*