

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**“Дослідження параметрів і режимів роботи машини для
виготовлення гумових ущільнень”**

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

Остап ДАЦКІВ

(Ім'я та прізвище)

Керівник: к.т.н. доцент Сергій БЕРЕЗОВЕЦЬКИЙ

(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.
“___” _____ 202_ р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту
Дацківу Остапу Романовичу

1. Тема роботи: **«Дослідження параметрів і режимів роботи машини для виготовлення гумових ущільнень»**

Керівник роботи: Березовецький Сергій Андрійович, к.т.н., доцент

Затверджена наказом по університету від 12.09.2024 року № 616/К-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 09.12.2024 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів виробництва та розрахунків технологічного обладнання; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; Методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Аналіз об'єкта дослідження;

2. Аналіз методів та засобів для виготовлення гумових ущільнень;

3. Аналітичні дослідження механіки різання гумових ущільнень;

4. Експериментальні дослідження механічних характеристик операції виготовлення отворів у листовій гумі;

5. Охорона праці та захист населення;

Висновки і пропозиції;

Бібліографічний список.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: огляд існуючих конструкцій та класифікація машин для виготовлення ущільнень; матеріали ущільнень; методи механічного різання листової гуми; конструктивні елементи і геометричні параметри висікального інструменту; типи висікальних робочих органів; форми лез просічників та крайок пуансонів; технічне забезпечення експериментальних досліджень; тензометричні вимірювання; характер зміни технологічних навантажень під час прорізання отворів; залежності зусилля різання від кута нахилу леза для різних типів ножів; логіко-імітаційна модель процесу виготовлення отворів та виникнення аварії та травми під час роботи машини для порізки листової гуми.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3,4	Березовецький С.А. к.т.н., доц. кафедри машинобудування			
5	Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва			

7. Дата видачі завдання: 12.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Аналіз об'єкта дослідження»</i>	<i>12.09.24-27.09.24</i>	
2.	<i>Виконання другого розділу: «Аналіз методів та засобів для виготовлення гумових ущільнень»</i>	<i>30.09.24-11.10.24</i>	
3.	<i>Виконання розділу: «Аналітичні дослідження механіки різання гумових ущільнень»</i>	<i>14.10.24-25.10.24</i>	
4.	<i>Виконання розділу: «Експериментальні дослідження механічних характеристик операції виготовлення отворів у листовій гумі»</i>	<i>28.10.24-08.11.24</i>	
5.	<i>Виконання розділу: «Охорона праці та захист населення»</i>	<i>11.11.24-22.11.24</i>	
6.	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому</i>	<i>25.11.24-06.12.24</i>	

Студент _____ Остап ДАЦКІВ
(підпис)

Керівник роботи _____ Сергій БЕРЕЗОВЕЦЬКИЙ
(підпис)

УДК 686.12-681.628.35

«Дослідження параметрів і режимів роботи машини для виготовлення гумових ущільнень». Дацків О.Р. Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування. – Дубляни, Львівський НУП, 2024.

65 с. текст. част., 41 рис., 4 табл., 58 джерел інформації.

У даній кваліфікаційній магістерській роботі викладені теоретичні основи процесу порізки і можливості використання різних теорій порізки листової гуми. Проведений аналіз результатів дослідження роботи машини для виготовлення гумових ущільнень і методів їх проектних розрахунків, розглянуті шляхи подолання їх недоліків, запропоновані нові конструктивні вдосконалення елементів машин.

Розглянуто методики, конструктивні особливості і геометричні параметри робочих органів різальних машин, форми лез ріжучих інструментів тощо.

Запропоновані оптимальні технологічні режими і відповідні технічні засоби методу ножичного різання для виготовлення гумових ущільнень.

Запроектовано та виготовлено лабораторну установку для виготовлення гумових ущільнень.

Проведено аналіз виробничих небезпек під час роботи з обладнанням, розроблено логіко-імітаційну модель виникнення травматизму.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ	7
1.1. Різновиди прокладок за призначенням	7
1.2. Матеріали для виготовлення прокладок.....	9
1.3. Верстати і пристосування для виготовлення прокладок.....	13
2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГУМОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ	17
2.1. Класифікація і характеристика методів виготовлення гумових ущільнень.	17
2.2. Конструктивні особливості інструментів для порізки розгорток гумових ущільнень	20
2.3. Аналіз стану наукових досліджень ножичного різання листової гуми.....	25
2.4. Висновки до розділу	29
3. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІКИ РІЗАННЯ ГУМОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ	30
3.1. Встановлення геометричних характеристик операції різання	30
3.2. Дослідження кінематичних характеристик операції прорізування різнопрофільних отворів.....	31
3.3. Силові характеристики операції прорізування різнопрофільних отворів у листовій гумі	35
3.4. Висновки до розділу	38
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ОТВОРІВ У ЛИСТОВІЙ ГУМІ.....	39
4.1. Мета і програма експериментальних досліджень.....	39
4.2. Технічне забезпечення експериментальних досліджень.....	43
4.3. Узагальнення експериментальних досліджень механіки різання листової гуми.....	46
4.4. Висновки до розділу	55
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	57
5.1. Охорона праці при вирубуванні гумових ущільнень	57
5.2. Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів	58
ВИСНОВКИ.....	60
БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	61

ВСТУП

Сьогодні багато виробів підприємств із виробництва продукції виробляють гумові прокладки з отворами, які виконують ущільнюючу, технологічну, функції тощо. На сьогоднішній день найпоширенішим методом створення таких отворів у гумі є ножовий. Працюють автоматичні лінії, налагоджене виробництво витратних матеріалів для вирізальних форм. Однак тут є недоліки, як самого методу, так і обладнання – виконання операції вирізання супроводжується великими короткими навантаженнями; устаткування має високу метало- і енергомісткість, вирізальні форми – дороговизну і довготривале налаштування, що робить цей метод нерентабельним за умови частої зміни параметрів і малого обсягу продукції.

Для забезпечення енергоощадності технологічного процесу різання ущільнюючих матеріалів запропоновано енергоощадний ножичний метод, який можна реалізувати на малогабаритному устаткуванні в умовах частої зміни типорозмірів та обсягів продукції. Щодо виробничої потреби, то дослідженнями не охоплена задача виготовлення отворів у гумі. Відтак виникає потреба у пошуку і обґрунтуванні раціональних технологічних параметрів процесу і конструктивних параметрів різального інструменту для виготовлення продукції з отворами ножичним методом.

Застосування енергоощадного ножичного методу має потенціал не лише зменшити витрати енергії, але й оптимізувати виробничий процес, підвищуючи точність і швидкість виконання операцій. Особливістю ножичного методу є можливість адаптації під різні типи гумових матеріалів, що забезпечує універсальність та знижує витрати на переналаштування обладнання. Такий підхід дозволяє зменшити механічні навантаження на різальний інструмент, що подовжує його термін служби та мінімізує частоту заміни, а отже, і експлуатаційні витрати.

Очікується, що результати цього дослідження дозволять вдосконалити виробничий процес, зменшити енерговитрати та підвищити рентабельність виробництва гумових виробів у промислових умовах.

1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Різновиди прокладок за призначенням

Промислові прокладки (рис. 1.1) - чи не найзатребуваніший витратний матеріал практично в будь-якому виробництві. Часто виникає ситуація, коли необхідно терміново виготовити гумову, силіконову чи паронітову прокладку в єдиному екземплярі чи малому тиражі.

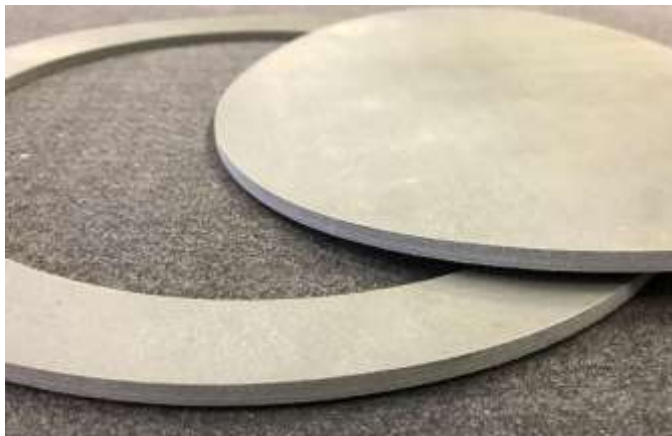


Рис. 1.1 - Промислове різання прокладок

Усі виробничі прокладки можна поділити на кілька видів, залежно від призначення.

Водопостачання. Прокладки та ущільнювачі використовуються в комунальному господарстві та у всіх виробках сантехнічного призначення (рис.1.2) - змішувачах, сушках для рушників, радіаторах опалення тощо. Сантехнічні прокладки повинні витримувати певний тиск (залежно від матеріалу та особливостей застосування від 25 до 500 бар), високу температуру (до 100°C), мати водонепроникність, високу зносостійкість.



Рис. 1.2 - Силіконові прокладки

Автотранспортне, машинобудівне та суднобудівне виробництво.

Прокладки дозволяють герметизувати з'єднання та пом'якшувати вібрацію (рис.1.3). Основні вимоги до прокладок у цій галузі - стійкість до корозії, специфічних робочих середовищ (кислотні, лужні) та перепадів температури.



Рис. 1.3 - Виготовлення прокладок із гуми

Будівництво. У капітальному будівництві використовуються гумові прокладки (рис.1.4), що ущільнюють, призначені для ущільнення стиків елементів конструкцій. Товста гума пом'якшує вібрацію у певних зонах.



Рис. 1.4 - Прокладки з товстої листової гуми

Нафтогазове та хімічне виробництво. Якісні фланцеві прокладки (рис.1.5) для цих галузей повинні працювати в складних технологічних умовах, агресивних середовищах важких і легких нафтопродукцій, витримувати високий тиск і мати підвищену зносостійкість.



Рис. 1.5 - Паронітові прокладки

Різновиди прокладок за призначенням відіграють важливу роль у забезпеченні надійної та безпечної роботи механізмів і устаткування. Кожен вид прокладки має свої специфічні властивості та сферу застосування, що дозволяє ефективно захищати від протікання рідин та газів, компенсувати нерівності поверхонь, знижувати рівень шуму та вібрацій, а також зберігати механічну стійкість з'єднань у агресивних середовищах. Правильний вибір типу прокладки з урахуванням умов експлуатації, матеріалів і температурних режимів сприяє продовженню терміну служби обладнання, зменшенню витрат на обслуговування та забезпечує безперебійність технологічних процесів.

1.2. Матеріали для виготовлення прокладок

1.2.1. Гума. Гума - найпопулярніший матеріал для виготовлення прокладок. Еластичність, міцність та невелика вага роблять цей матеріал універсальним. При використанні гумових прокладок (рис. 1.6) необхідно враховувати, що температура середовища має бути не більшою за +140°C. Листові гуми бувають ТМКЩ, МБС, силіконова гума, харчова та низка інших. Працездатність гуми ТМКЩ зберігається при температурі t від -30°C до +80°C.

Марка ТМКЩ-С – тепломорозокислотолужностійка, середньої твердості: повітря приміщень, ємностей, судин; азот; інертні гази при тиску від 0,05 до 0,4

МПа або вода прісна, морська, промислова, стічна без органічних розчинників та мастил; розчин солей з концентрацією до краю насичення; кислоти, луги концентрацією до 20% при тиску від 0,05 до 10,0 МПа.

Листова гума найчастіше поставляється в рулонах шириною від 800 до 1350 мм або в пластинах розміром 500x500 мм; 700x700 мм; 1000x1000 мм

Особливості обробки гуми. При лазерному різанні існує великий ризик деформації матеріалу через температурний вплив. Крім того, лазерна обробка призводить до часткової втрати ізоляційних властивостей гуми при обвугуванні торцевої поверхні матеріалу. Цей недолік може стати критичним для деяких виробів, наприклад гумових ізоляторів. Тому краще вибирати плоттерний спосіб різання, тобто за допомогою механічних ножів та без температурного впливу.



Рис. 1.6 - Різання прокладок з гуми

1.2.2. Силікон. Силікони мають ряд унікальних якостей в комбінаціях, відсутніх у будь-яких інших відомих речовин: здатності збільшувати або зменшувати адгезію, надавати гідрофобність, працювати і зберігати властивості при екстремальних і швидкозмінних температурах або підвищеній вологості, діелектричні властивості, біоінертність, хімічна інертність. Це зумовлює високий попит на них у різних галузях.

Особливості обробки силікону. Якщо лист силікону великої товщини, то лазерне різання може спричинити оплавлення матеріалу. Це призводить до порушення геометрії кінцевого виробу, що деформує його контур. У той же час різання прокладок із силікону на плотері позбавлене таких недоліків (рис.1.7).

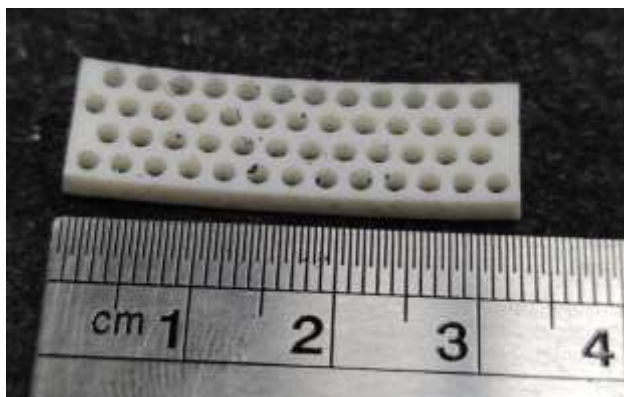


Рис. 1.7 - Виготовлення силіконової прокладки

1.2.3. Капролон. Капролон - унікальний полімерний матеріал, який по міцності не поступається сталі і незамінний у складних механізмах, що інтенсивно використовуються. Цінні властивості та характеристики капролону роблять цей матеріал незамінними у виготовленні виробів, що служать для ущільнення нерухомих з'єднань, запобігання тертю між металевими поверхнями, для сприйняття одиночних ударних навантажень, а також як підкладки, настили, ущільнювачі, прокладки (рис. 1.8), шайби, втулки. для передавальних механізмів та вузлів у двигунах, насосах, гідравлічних приводах тощо.

Особливості обробки капролону. Листовий капролон є гладким, слизьким матеріалом, який при різанні може розтріскуватися і утворювати гострі краї. Тому робота з капролоном потребує наявності якісного обладнання та професіоналізму фахівців.



Рис. 1.8 - Капролонові прокладки

1.2.4. Пароніт. Завдяки своєму складу (суміші азбесту, каучуку та порошкоподібних наповнювачів), пароніт використовується в багатьох середовищах та температурних режимах. Одна з ключових властивостей пароніту – його здатність герметизувати сполуки. При певному тиску пароніт виявляє плинність і щільно заповнює всі стики. Але необхідно враховувати, що для прояву таких властивостей товщина прокладки не повинна бути занадто великою, інакше тиск видавить прокладку, і герметичність порушиться.

Особливості обробки пароніту. Різання пароніту зазвичай не викликає труднощів, цей матеріал легко піддається механічній обробці навіть за складними кресленнями.



Рис. 1.9 - Паронітові прокладки на замовлення

1.2.5. Фторопласт. Цей матеріал є фторвмісним полімером і відрізняється особливою стійкістю до агресивних середовищ. Він легко витримує будь-які перепади температур. Низький коефіцієнт тертя та унікальна хімічна стійкість робить фторопласт (рис. 1.10) незамінним матеріалом у електротехнічній, хімічній, нафтогазовій промисловості.

Особливості обробки фторопласту. Фторопласт можна розрізати за допомогою лазерного променя, але за невеликої товщини (1-2 мм) є ризик пошкодження матеріалу. Тому краще вибрати фрезерне різання фторопласту, її можна використовувати при будь-якій товщині матеріалу до 50 мм.

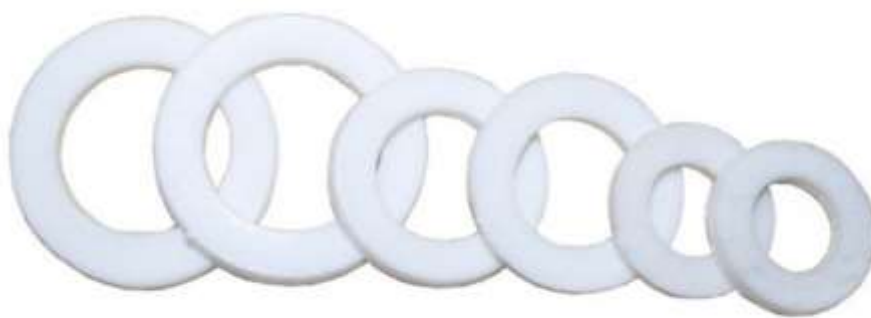


Рис. 1.10 - Прокладки з фторопласту

Такий витратний матеріал, як прокладки, потребує часті заміни. Причому іноді потрібна штучна заміна або виготовлення малим тиражем. У такій ситуації важливо не переплачувати за виробництво та при цьому отримати гарантовано високу якість виробу.

1.3. Верстати і пристосування для виготовлення прокладок

Верстати і пристосування для виготовлення гумових прокладок забезпечують точне та ефективне виробництво деталей, які використовуються для ущільнення та захисту з'єднань у різних галузях, включаючи машинобудування, автомобільну промисловість, будівництво та інші. Основним обладнанням, що використовується для виготовлення гумових прокладок, є прес-форми, які дозволяють формувати гумові прокладки під тиском з високою точністю, що особливо важливо для промислових застосувань. Гідравлічні прес-машини створюють високий тиск, необхідний для формування прокладок із заданими параметрами, і можуть мати різні характеристики залежно від розміру виробів та вимог до їх щільності.

Лазерні різакі забезпечують високоточне вирізання прокладок із гумових аркушів, що дозволяє досягти ідеальної форми та мінімізувати кількість відходів, особливо при виготовленні малих партій. Штампувальні машини застосовуються для масового виробництва прокладок із рулонного або листового матеріалу, що знижує вартість продукції. Верстати для вирубки використовуються для розкрою та вирізання прокладок за шаблоном і можуть бути як ручними, так і автоматизованими залежно від обсягів виробництва.

Змішувальні машини для гуми необхідні для підготовки гумових сумішей перед формуванням, що дозволяє досягти рівномірного розподілу компонентів і підвищити якість готових виробів.

Використання спеціалізованих верстатів і пристосувань у виробництві гумових прокладок дозволяє отримати високоякісні деталі з мінімальними відхиленнями за розмірами та підвищеною стійкістю до експлуатаційних навантажень.

Верстати для різання прокладок. Свердлильні верстати з пристосуванням «Балеринка» (рис.1.11).



Рис. 1.11 – Свердлильні верстати ПКТБА-СПВП-2 з пристосуванням «Балеринка»

ПКТБА-СПВП-2 - це верстат, призначений для вирізання прокладок із пароніту та інших неметалевих матеріалів, а також для свердління, зенкерування, зенкування, розточування та нарізання різьби метчиками. Він забезпечує точне виготовлення прокладок діаметром від 100 до 1200 мм (табл. 1.1).

Комплектація верстата включає основу, комплект змінних притискачів, два комплекти ножів, хвостовик та захисний кожух. Застосування частотного перетворювача дозволяє безступінчасто регулювати частоту обертання шпинделя для обробки різних матеріалів з оптимальними режимами різання.

Даний верстат забезпечує точність виготовлення прокладок із різних матеріалів; замінює ручну працю, знижує травмонебезпеку та підвищує культуру виробництва; у конструкції передбачено захисний кожух для огороження зони різання; застосування частотного перетворювача забезпечує безступінчасте регулювання частоти обертання шпинделя обробки різних конструкційних матеріалів з максимально вигідними режимами різання.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики верстатів ПКТБА-СПВП-2 та ПКТБА-СПВП-1

Параметри	ПКТБА-СПВП-1	ПКТБА-СПВП-2
Розміри прокладок, мм	60...500	100...1200
Діапазон свердління сталі, мм	3-32	3-50
Діапазон нарізної різьби, мм	M3-M33	M3-M33
Конус шпинделя	4	Морзе 4
Габаритні розміри, мм	1055x850x2680	2730x970x2630
Маса, кг	1500	3500

Машина для вирізання прокладок P/FD 250. Машина підходить для виготовлення прокладок у формі кола та смуг (ручним способом можлива вирізка прокладок іншої форми). За допомогою цієї машини можна вирізати прокладку практично з будь-якого листового матеріалу, включаючи навіть графітові листи з гладкими, перфорованими та експандованими шарами.



Рис. 1.12 - Машина для вирізання прокладок P/FD 250

Запатентована схема розташування ножів забезпечує найвищу якість різання. Навіть у разі вирізки прокладок з м'якого графіту, здавлювання та відшарування країв у місці різі виключено.

Для встановлення діаметра використовується фіксуєча лінійка. У центрі заготовленої пластини пробивається отвір за допомогою штампів, що входять в комплект, потім пластина розташовується на центрувальному пристосуванні машини. Під час роботи двигуна важіль вручну віджимається вниз, щоб перемістити верхній ніж у саму нижню позицію. У процесі цього верхній ніж прорізає матеріал (у місці різку не потрібно робити отвір) і проникає в простір між двома нижніми ножами. Швидкість вирізки регулюється ручним поворотом матеріалу. Щоб повністю прорізати матеріал достатньо одного повного оберта.

Верстати для вирізання прокладок Р 2000 II та Р 2000 III виготовлені з високоміцної сталі. Забезпечують акуратне різання матеріалів точно за розмірами. Верстат Р 2000 I встановлюється на столі (рис. 1.13).



Рис. 1.13 - Верстат для вирізання прокладок Р 2000

Встановлення ножа проводиться швидко і точно за допомогою калібрувального пристрою. Спрощене налаштування діаметра різання за допомогою ручного приводу. Розмір висвічується на зручному дисплеї. Опускання ножа провадиться за допомогою гідравлічної пневматичної системи. Швидкість різання варіюється за рахунок частотного перетворювача, що дозволяє забезпечити оптимальне різання для різних матеріалів. Матеріал утримується в потрібній позиції пневматичним швидкодіючим затискачем. Для зручності робоча зона підсвічується.

В результаті використання спеціалізованих верстатів і пристосувань підприємства можуть забезпечувати високу продуктивність, мінімізувати витрати на виробництво та гарантувати надійність і довговічність своїх виробів.

2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГУМОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ

2.1. Класифікація і характеристика методів виготовлення гумових ущільнень.

Гумові ущільнення виготовляють методами механічного різання прокласифіковані за принципом ножового та ножичного різання (рис. 2.1) [11, 18, 28, 54].

Ножове різання – це проникнення леза різального інструмента в матеріал до контакту з опорною поверхнею. Такий принцип різання використовується у методі висікання (штанцювання).

Висікання (просікання) - розділення неметалевих матеріалів по замкнутому контуру за допомогою висікальних (ножових) штампів [4, 17].

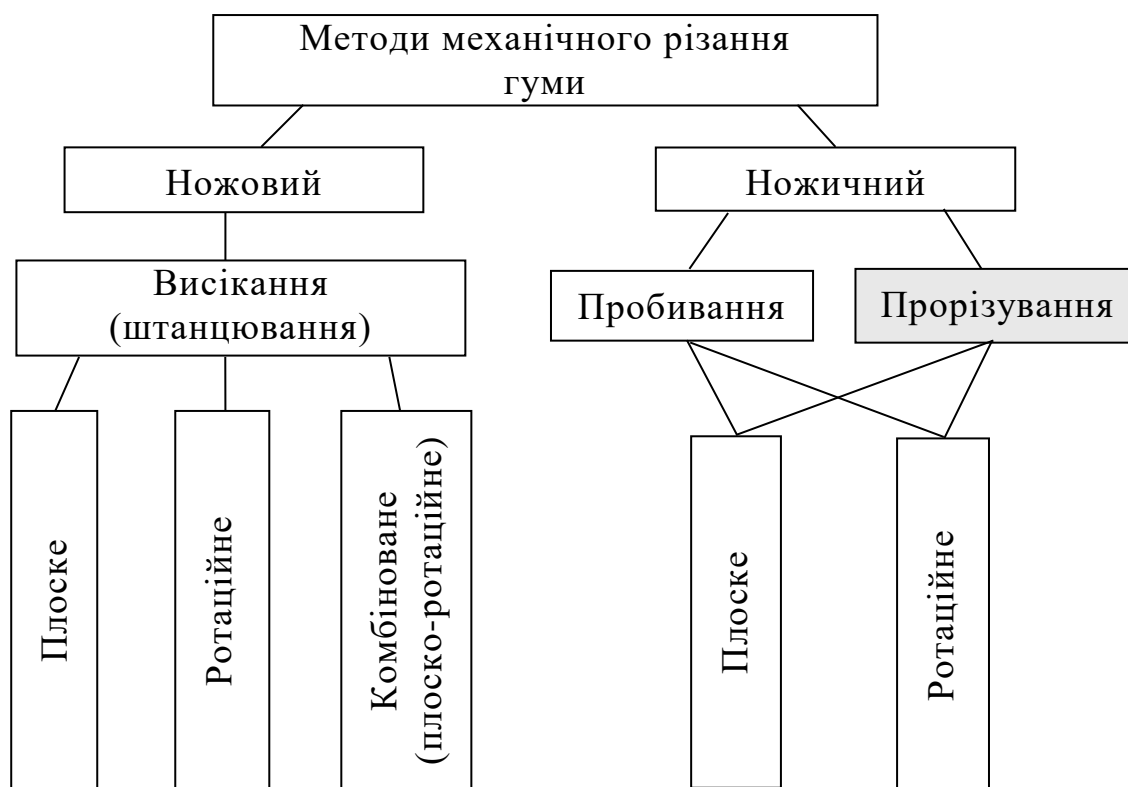


Рис. 2.1 - Класифікація методів механічного різання

Спосіб плоского висікання є найбільш поширеним на виробництві [1, 3]. Висікальна секція має рухомий тигель 3 (рис. 2.2, а) і нерухому плиту 4, на котрій закріплюють висікальну форму 2. Заготовку 1 розташовують на робочій

поверхні тигля 3. При робочому ході тигля відбувається висікання заготовки одночасно по усьому периметру. Це є причиною великого технологічного навантаження, що призводить до збільшення метало - і енергомісткості устаткування. До недоліків цього способу відносять зниження продуктивності з огляду на вимушені зупинки тигля для заміни заготовок.

Усунення недоліків плоского висікання можна досягнути за допомогою:

- мінімізації довжини лінії контакту лез інструменту з гумою;
- виконання різальної операції при русі напівфабрикату.

Рис. 2.2 - Методи ножового різання

Ці дві умови застосовані у способі ротаційного висікання. На верхньому циліндрі 3 висікальної секції (рис. 2.2, б) встановлено висікальну форму 2. Нижній циліндр 4 є опорним. Розділення рулонної гуми 1 по контуру

відбувається поступово у зоні контакту лез висікальної форми з опорним циліндром. Недоліками способу цього висікання є складність і дороговизна висікальних форм, велика тривалість регулювальних робіт та низька якість виготовлених виробів у порівнянні з плоским способом [1].

Інші способи висікання базуються на реалізації однієї з умов, необхідних для усунення недоліків плоского висікання. Також одним із відомих способів і засобів висікання контуру є спосіб висікання з у рухомим матеріалом. Висікальна секція має два тиглів (рис. 2.2, в), які здійснюють плоскопаралельний рух (тигель 3 рухається в одну сторону, тигель 4 – зворотну). Повне розділення матеріалу 1 по контуру проходить при взаємодії різальних лез з площиною опорного тигля. Описаний спосіб характеризується великими технологічними навантаженнями [34].

Зменшення технологічних навантажень досягається способом [56], за яким талер 3 (рис. 2.2, г) з висікальною формою 2 і листову гумуом 1 здійснює зворотно-поступальний рух, проходячи під притискним циліндром 4. Контур формується поступово при взаємодії висікальної форми з поверхнею притискного циліндра.

Одним із суттєвих недоліків даного способу є відносно низька продуктивність, обумовлена необхідністю зворотного ходу талера. Через велику масу талера (з умови його жорсткості), при роботі виникають інерційні навантаження, тому виникає необхідність у пристроях зрівноваження сил інерції [57].

Розділення матеріалу одночасно двома різальними крайками характеризує ножичне різання [11, 18]. На такому принципі ґрунтуються пробивання і прорізування.

Повне одночасне відокремлення матеріалу, яка є відходом (наприклад, під час пробивання отвору) називається пробиванням [17].

Прорізування подібне на пробивання, однак характеризується поступовим розділенням матеріалу під час виготовлення замкнутих і незамкнутих отворів.

Розділення матеріалу 1 (рис. 2.3, а) по контуру відбувається під час взаємодії лез пуансона 2, що здійснює зворотно-поступальний рух, і нерухомої матриці 3 [11].

На відміну від просікання, за якого обробка заготовок відбувається поштучно, пробивання і прорізування дає можливість обробки заготовок пачками, що збільшує продуктивність.

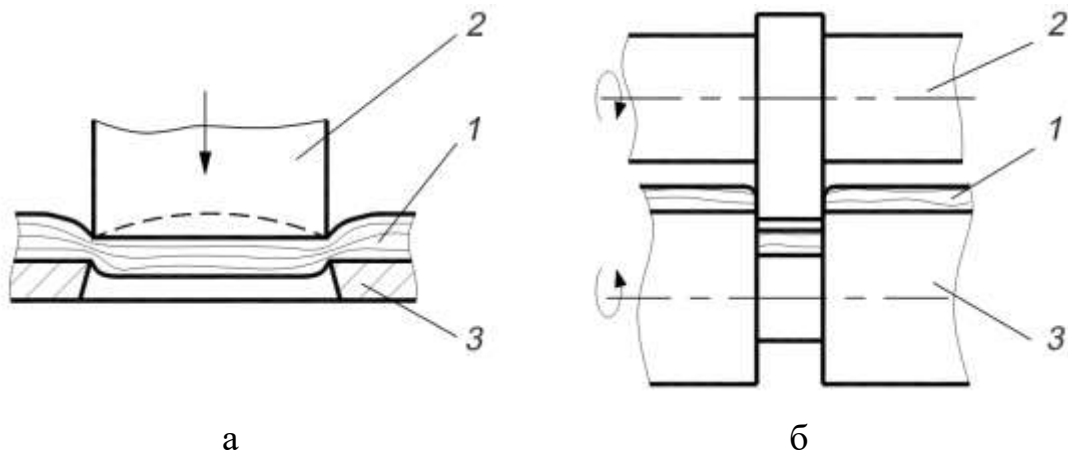


Рис. 2.3. Методи ножичного різання

Способу ротаційного пробивання характерна висока продуктивність [11]. Гуму 1 (рис. 2.3, б) зі сталою швидкістю подають у зону взаємодії верхнього 2 і нижнього 3 різальних інструментів. Виготовлення отвору матеріалу проходить поступово, що суттєво знижує технологічні навантаження. Такий спосіб застосовують найчастіше для прорізування прямолінійних пазів у гумі.

2.2. Конструктивні особливості інструментів для порізки розгорток гумових ущільнень

2.2.1. Висікальні штампи. Виготовлення ущільнень з гуми [8, 10] способом висікання (штанцювання) здійснюють висікальними (ножовими) штампами, які поділяють на плоскі і ротаційні.

Плоский висікальний штамп складається із основи 1 (рис. 2.4), різального інструмента 2, бігувального інструмента 3, пружного елемента 4, притискної 5 і опорної 6 плит.

Рис. 2.6 - Будова висікального штампа

Таку ж будову мають і ротаційні штампи. Вони відрізняються тільки тим, що опорна поверхня, притискна та штампова форма є циліндричними. Виготовлення ротаційних і плоских штампів виконують у такій послідовності [1]:

- нанесення плану-макета штампа на штампову форму;
- прорізання пазів для висікальних лінійок;
- свердління отворів для просічників;
- встановлення висікального інструменту;
- наклеювання виштовхувачів висіченої заготовки.

Виготовлення штампів потребує ряд додаткових операцій:

- розрізування та згинання сталевих висікальних лінійок;
- утворення пазів;
- контроль точності встановлення висікального інструменту.

Складними також є операції налаштування висікального штампа перед початком роботи, які залежно від стану машини і складності форми, потребують значного часу.

Крім описаної послідовності для виготовлення ротаційних штампів може проводитись і інша схема, наприклад [1]:

- закріпленням висікальних і бігувальних елементів у вигляді сегментів на гладкому циліндрі за допомогою різьбового з'єднання;
- гравіюванням елементів штампа на гладкому сталевому циліндрі;

- хімічним травленням пластин штампу.

Прорізування пазів у штамповій формі можливе механічним способом або термофізичним. Перевага механічного способу полягає у відносній простоті і дешевизні штампа, хоча точність виготовлення і висікання є найнижчою. за допомогою лазера прорізані пази мають високу точність обробки, швидкість і універсальність [1].

До позитивних властивостей плоских штамтів віднесено можливість оброблення широкого діапазону матеріалів (паперу, листової гуми, гофролистової гуми, пластику, тощо), висока зносостійкість лінійок. Щодо недоліків таких штамтів то вони не мають можливості переналагодження, а також їх недоцільно використовувати для одиничних виробництв.

Високопродуктивними є ротаційні висікання, однак вони характеризуються конструктивною складністю і дорогавизною виготовлення продукції. Під час висікання листову гумуної заготовки ротаційним штампом шириною 600 мм затрати на її виготовлення у 25...50 разів перевищують затрати на виготовлення плоского [1].

Для виготовлення внутрішніх контурів у листову гумуї використовують просічники наступної форми – круглі, квадратні, овальні тощо. Під час виготовлення отворів просікальним інструментом є сталеві лінійки, які згинають відповідно до форми отвору.

Конструктивні елементи і геометричні параметри висікального інструменту /лінійки/ наведені на рис. 2.7.

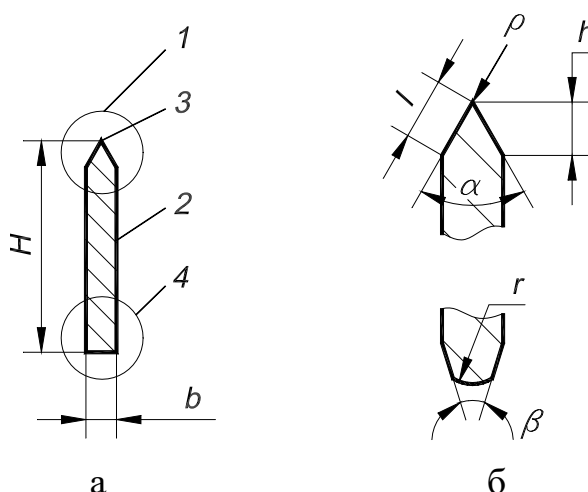


Рис.1.5. Конструктивні елементи (а) і геометричні параметри (б) висікального інструменту (лінійок): 1 – лезо, 2 – кріпильна частина, 3 – просікальна крайка, 4 – спинка; α – кут загострення леза, ρ – радіус закруглення крайки леза, β – кут скосу спинки, h – висота леза, l – довжина леза, r – радіус кривини спинки.

Висікальний інструмент з різною в поперечному розрізі формою леза використовують залежно від механічних характеристик оброблюваного матеріалу. Більшість робіт плоскими і замкнутими штампами виконують інструментом з центровим лезом (рис. 2.6, а) [1].

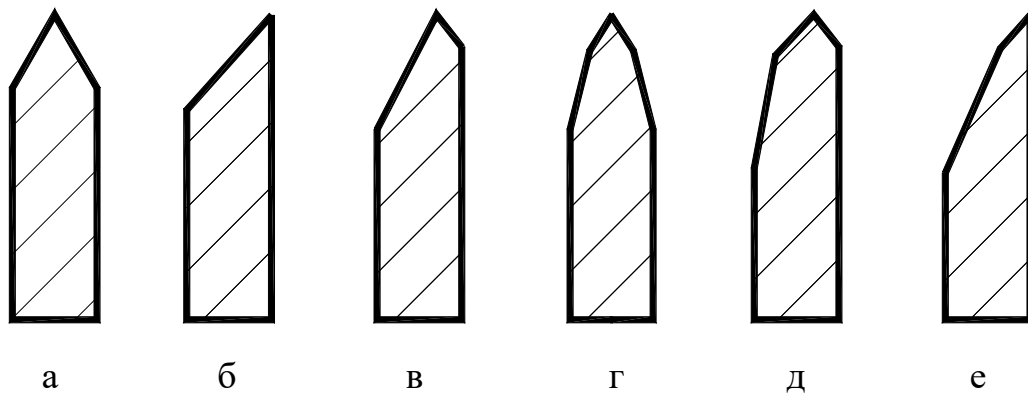


Рис. 2.6 - Форми лез висікальних лінійок

Для висікання товстих і щільних матеріалів застосовують інструмент з боковим лезом (рис. 2.6, б). Завдяки такій формі леза досягається точне з'єднання лінійок. Лезо, утворене перетином двох несиметричних площин (рис. 2.6, в), запобігає утворенню задирок на крайці інструмента і призначене для розділення товстих матеріалів. Інструменти (рис. 2.6, г, д, е) уможливають обробку матеріалів з меншими зусиллями порівняно з попередніми формами лез.

Просічники поділяються залежно від конструкції на: трубчасті, чашкові, самовивідні і спеціальні. Найбільш поширеною формою для висікання отворів у листову гуму є трубчасті просічники (рис. 2.7). Просічені відходи видаляють за допомогою встановлених у просічник виштовхувачів.

Просічники є з внутрішнім (рис. 2.7, а) або зовнішнім (рис. 2.7, б) кутом загострення і центрові (рис. 2.7, в), та, зазвичай, на виробництвах застосовують просічники розмірним рядом діаметрів від 1,6 до 50 мм.

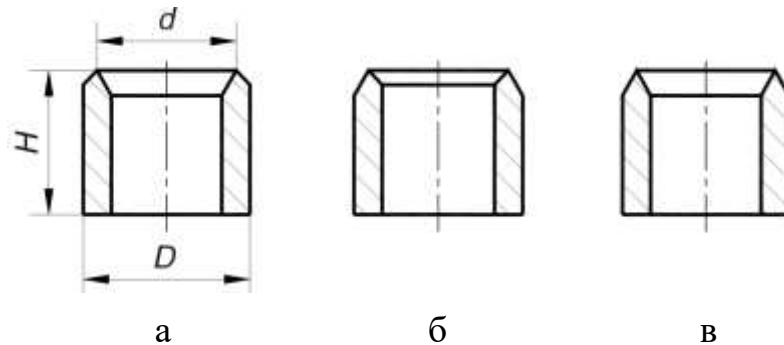


Рис. 2.7. Форми лез просічників: а – з внутрішнім загостренням, б – із зовнішнім загостренням, в – центровий.

Леза із зовнішнім загостренням рекомендують використовувати для роботи з товстими матеріалами [1].

2.2.2. Пробивні штампи. Виготовлення отворів у металевих і неметалевих матеріалах здійснюють пробиванням або штампуванням [6]. Пробивні штампи поділяють на 5 типів залежно від конструктивного виконання [11]: відкритий пробивний штамп; пробивний штамп з центруванням пуансона в матриці; пробивний штамп з напрямною плитою або циліндром; штамп з комбінованими напрямними; штамп з напрямними колонками.

Варіанти штампів вибирають залежно від вимог, які ставлять до точності і якості пробивання отвору. На рис. 2.8 показана схема пробивного штампа, будова якого наступна: пуансон 1, плита 3, матриці 2 і нижня плита 4. Хвостовик 5 призначений для з'єднання елемента верхньої плити 3 з повзуном преса.

Рис. 2.8 - Будова пробивного штампа

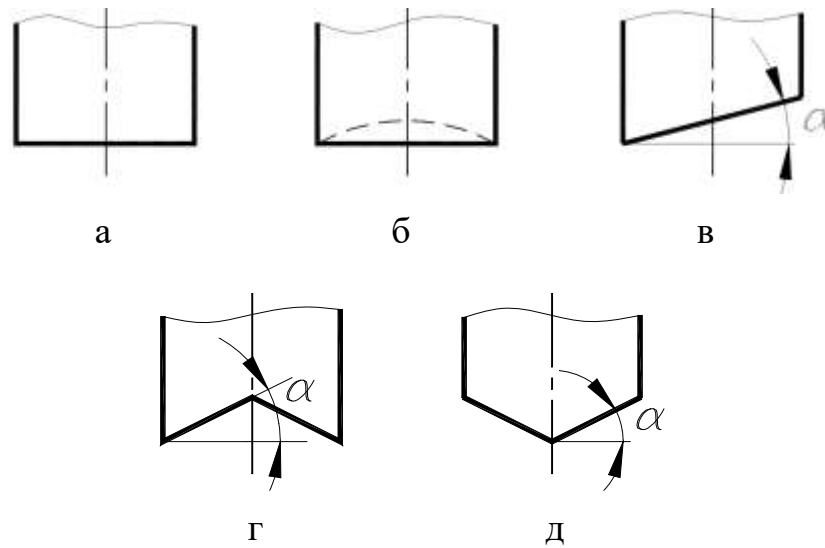


Рис. 2.9 - Форми крайок пуансонів

Пуансони мають різну форму, яка залежить від їх призначення. Найбільш поширенішими є пуансони, робоча площина яких перпендикулярна до осі (рис. 2.9, а). Такий тип пуансона рекомендують застосовувати для листової гуми товщиною до 2 мм. Великорозмірні пуансони часто загострюють по увігнутій поверхні (рис. 2.9, б), що підвищує якість різання.

Одним із шляхів зменшення зусиль вирізання отворів є використання пуансона з різальною крайкою, нахиленою до площини, проте його робота спричиняє бокове зусилля і інтенсивне спрацювання напрямних. Для виключення цих недоліків використовують пуансони з обома нахиленими гранями (рис. 2.9, г, д).

2.3. Аналіз стану наукових досліджень ножичного різання листової гуми

2.3.1. Різання матеріалу по зовнішньому контуру.

Для різання листову гумуних заготовок, при якому рухомий ніж здійснює обертовий рух і взаємодіє з нерухомим ножем, на якому розташована заготовка листової гуми застосують ножичний спосіб. Енергетичні навантаження під час використання такого методу на декілька порядків менші, ніж під час виготовлення листову гумуних заготовок методами висікання чи вирубування. Відтак застосування ножичного

способу не вимагає метало- та енергомістких різальних машин [30-32, 36, 37, 39-42, 49-53].

Експериментальними дослідженнями [49, 50] підтверджено доцільність використання ножичного різання для виготовлення листову гумуних паковань і встановлені залежності сили різання листової гуми від типу ножа, кута нахилу леза і напрямку волокон у листову гуму.

У цій же ж роботі встановлена залежність сил різання від кута загострення леза і обґрунтовуються рекомендації щодо проектування ножів.

2.3.2. Напруження і деформації під час різання листової гуми.

Пробивання і просікання отворів називають розділенням матеріалу [1, 5, 11, 18, 19, 38, 47]. Пробивання це зміщення однієї частини матеріалу щодо другої у напрямі, перпендикулярному площині заготовки. Саме таке зміщення на початкових стадіях розділення металів має пластичне деформування і завершується руйнуванням [17, 38]. Оскільки різальний інструмент для розділення неметалевих матеріалів проектують згідно теорії різання металів [11, 9, 13], то і процес розділення листової гуми розглядають відповідно [5, 27].

Згідно з Захаров В.Г. [5] напружено-деформований стану металу під час пробивання характерний і для неметалів. Під час пробивання металів вплив напружень σ_z обмежується пружними деформаціями. Захаров В.Г. [5] зауважує, розглядаючи процес вирубубання-пробивання неметалевих матеріалів прийняті припущення про те, що напружено-деформований стан є плоским і не буде сприяти правильному аналізу процесу розділення таких матеріалів, не дозволить науково-обґрунтувати утворення розшарувань, тріщин тощо.

За теорією Попова Є.А. [38] зазор призводить до того, що прикладені сили до заготовки з матрицею і пуансоном, створюють момент, який призводить до згину частини заготовки у просторі і нерівномірний розподіл нормальних напружень на контактних поверхнях, а відтак і нерівномірний розподіл напружень в товщині заготовки.

Розділенню листової гуми по внутрішньому контуру методом пробивання присвячена праця Кривенко А.В. [2]. Автори вважають, що під час стиснення гуми рівнодіючі тиску пуансона і матриці на поверхню заготовки P

зміщуються від леза на деяку відстань (рис. 2.10, а) і виникає момент $P \cdot a$, який викривляє матеріал. Цьому викривленню протидіє момент $T \cdot b$, який виникає від вминання матеріалу граней пуансона і матриці. Найменший згин матеріалу спостерігається під пуансоном, що пояснюється виникненням на цій ділянці сил розтягу T_2 . Оскільки оброблюваний матеріал характеризується низькою жорсткістю, можна вважати, що сила T_2 незначна порівняно з силою T_1 . Тоді $T \approx T_1$. Викривлення гуми буде доти поки досягнеться рівність моментів $P \cdot a = T \cdot b$.

Пробивання отвору у гумі плоским пуансоном Кривенко А.В. і Толочко В.М. [2] розділили на 3 етапи: 1 етап (рис. 2.10, б, ділянка 0-а) – матеріал стискається і спостерігається викривлення матеріалу, яке має найбільше значення. Зі збільшенням кількості шарів листової гуми або збільшення його товщини викривлення проходить більш чітко і пояснюється це більшим значенням абсолютного стиску гуми; 2 етап (рис. 2.10, б, ділянка а-б) припиняється подальше викривлення гуми через те, що концентрація напружень біля різальних крайок призводить до розриву волокон, а загальне ущільнення матеріалу – до збільшення зусиль, однак інтенсивність їх підвищення значно зменшується; 3 етап обумовлений повним розділенням листової гуми, зусилля для різання різко зменшуються.

Рис. 2.10. Схема пробивання отвору в листовій гумі: а – розподіл сил, б – залежність погонної сили різання від відносного стиснення листової гуми

Одним з основних параметрів, який впливає на силові і якісні показники пробивання отворів, є зазор між пуансоном і матрицею. Оптимальним вважають зазор, при якому тріщини у матеріалі від крайок лез пуансона і матриці мають прямолінійну форму і збігаються (рис. 2.11, а). Користуючись гіпотезою Ткаченко В.П. [43] про те, що тріщини мають прямолінійну твірну, нахилену під кутом β до осі інструмента, Попов Є.А. [38] запропонував формулу, за якою можна визначити зазор між пуансоном і матрицею, що забезпечує “сходження” тріщин

$$z = (s - h) \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (2.1)$$

Кут β коливається у межах $4 \dots 6^\circ$, зменшується зі збільшенням напружень зрізу і розтягу матеріалу. Глибина проникнення h до появи випереджуючої тріщини лежить в межах від 0,1 до 0,5 товщини заготовки, збільшується зі зменшенням пластичних характеристик матеріалу заготовки. Отже, мінімальне значення зазору, що забезпечує “об’єднання” тріщин, зменшується з підвищенням пластичності матеріалу. Зменшення зазору порівняно з оптимальним значенням призводить до того, що тріщини не “зустрічаються” і поверхня зрізу є неякісною (рваною) з перемичками між тріщинами (рис. 2.11, б). При збільшенні зазору тріщини збігаються, однак при цьому зростає нахил поверхні зрізу до осі отвору, а також утворюється невідповідність розмірів під дією моменту, що викривляє заготовку. Значення зазору залежить насамперед від виду оброблюваного матеріалу, його товщини, а також режиму роботи інструменту.

а

б

Рис. 2.11. Зазори між пуансоном і матрицею: а – оптимальний, б – малий

Згідно з [58], твердження про те, що існує лише один оптимальний зазор є невірним. Дослідженнями встановлено, що таких зазорів є два, залежно від того, якому параметру надають перевагу: чистоті поверхні зрізу, чи мінімальній

витраті сил або роботи (експериментально встановлено, що зі збільшенням зазору зростає зусилля і робота, причому зростання зусилля незначне, а збільшення роботи сягає до 40%).

Зазор z при опорі зрізу τ_B і товщині матеріалу s визначають із формул, отриманих на основі досліджень і виробничих даних [58]:

- для листової гуми товщиною до 3 мм

$$z = c \cdot s \cdot \sqrt{\tau_B}; \quad (2.2)$$

- для листової гуми товщиною 3 мм і більше

$$z = (1,5c \cdot s - 0,015) \cdot \sqrt{\tau_B}, \quad (2.3)$$

де коефіцієнт $c = 0,005$ і $0,035$ для формул (2.2) і (2.3), відповідно.

За рекомендаціями [17, 2] значення зазорів між пуансоном і матрицею для гуми визначають у межах $(0,02...0,03)s$ або $(0,04...0,06)s$.

Значення зазорів між пуансоном і матрицею за рекомендаціями [2, 17, 58] за товщини гуми 1 мм становить $0,04...0,06$ мм, $0,02...0,03$ мм і $0,012...0,024$ мм. Звідси випливає, що значення зазорів різняться до 5 разів, що свідчить про відсутність сталого підходу визначення оптимального зазору.

2.4. Висновки до розділу

На основі викладеного можна стверджувати відсутність наукового обґрунтування оптимальних технологічних режимів і відповідних технічних засобів методу ножичного різання для виготовлення отворів у листовій гумі. Для вирішення цієї наукової задачі в роботі передбачається:

- встановити геометричні характеристики операції різання листової гуми;
- аналітично дослідити вплив геометричних параметрів різального інструменту, а також фізичних характеристик листової гуми на кінематичні і силові характеристики операції різання;
- аналітично визначити оптимальні з огляду на мінімізацію технологічних навантажень геометричні параметри різального інструменту і режими технологічного процесу;
- експериментальним шляхом встановити силові характеристики ножового і ножичного різання.

3. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІКИ РІЗАННЯ ГУМОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ

3.1. Встановлення геометричних характеристик операції різання

Різання листової гуми (внутрішніх контурів) за принципом ножичного різання відбувається за умови зміни положення крайки леза ножа відносно оброблюваного матеріалу, розташованого на протиножі. Операція ножичного різання внутрішніх контурів характеризується фазами [15] (рис.3.1):

- *фаза I* – врізання, під час якого найближча до оброблюваного матеріалу (листової гуми) точка (точки) крайки леза ножа переміщується через його товщу $0 \leq S_I \leq \delta$ (δ – товщина матеріалу або висота стосу);
- *фаза II* – наближено постійний режим різання під час переміщення ножа у межах $0 \leq S_{II} \leq H - \delta$ (H – підйом леза ножа, що залежить від його конфігурації, розмірів і кута α нахилу площини крайки леза);
- *фаза III* – завершальна, під час якої найвіддаленіша від матеріалу точка (точки) леза переміщується через його товщу $0 \leq S_{III} \leq \delta$.

Повне переміщення ножа, необхідне для прорізування внутрішнього контура, $S = S_I + S_{II} + S_{III}$. Слід зауважити, що за умови рівності висоти підйому леза H і товщини листової гуми δ для розділення матеріалу по внутрішньому контуру будуть характерні лише дві фази – перша і третя; якщо ж $H < \delta$ – перша і третя фази будуть неповними.

Рис. 3.1. Фази ножичного прорізування отворів

Метою аналітичних досліджень є встановлення впливу конструктивних параметрів різального інструменту і товщини матеріалу на кінематичні та

енергосилові характеристики процесу для розробки методу ножичного прорізування отворів у листову гуму.

Згідно з [23, 26, 29, 35, 48, 55], основними параметрами різального інструмента, які впливають на технологічні навантаження під час виконання операції, є довжина лінії різання і кути різання, тому їх мінімізація – один зі шляхів зменшення сил різання.

3.2. Дослідження кінематичних характеристик операції прорізування різнопрофільних отворів.

Прорізний ніж здійснює зворотно-поступальний рух відносно матеріалу, який розташований на нерухомому протиножі. Ніж рухається за певним законом. Від початку руху (точка O) (рис. 3.2) до моменту врізання найнижчої точки (точок) леза в листову гуму (точка O_1) ніж переміщується на відстань S_T , технологічно необхідну для розташування заготовки матеріалу. Ця відстань залежить, в основному, від товщини δ оброблюваного матеріалу і її приймають в межах $(2,0...3,0)\delta$. Прорізування отвору супроводжується переміщенням s_{TP} точки різання A у верхній площині матеріалу відповідно до переміщення ножа від точки O_1 до точки O_2 . Для надійного завершення різання найнижча точка (точки) ножа повинна переміститись на відстань S_{II} за площину протиножа (від точки O_2 до точки O_3). Відстань S_{II} приймають рівною $(0,5..1,0)\delta$.

Тоді повне переміщення (хід) ножа становитиме $S_H = S_T + S_{HP} + S_{II}$, де $S_{HP} = H + \delta$ – переміщення ножа, під час якого відбувається повне прорізування листової гуми (у нашому випадку переміщення S_{HP} приймаємо рівним H , оскільки розглядається слід точки різання у верхній площині матеріалу).

Рис. 3.2, б ілюструє залежність переміщення точки різання A від часу t робочого ходу ножа.

Переміщення точки різання s_{TP} визначається як довжина дуги кола, що залежить від кута γ між променями CO_1 і CA (рис. 3.2, а) та радіуса r кривини профілю ножа, тобто $s_{TP} = r \cdot \gamma$.

а

б

Рис. 3.2 - Схема для розрахунку кінематичних характеристик точки різання

Встановимо залежності переміщень точки різання від геометричних параметрів і закону руху для прорізних ножів:

- з однобічним і двобічним внутрішніми скосами леза

$$s_{TP} = r \cdot \arccos\left(1 - \frac{s - S_T}{r \cdot \operatorname{tg} \alpha}\right), \quad (3.1)$$

де s – поточне переміщення ножа (залежить від закону руху); у розрахунках за формулою (3.1) слід врахувати, що за однакової висоти підйому леза H для всіх типів ножів кут нахилу α площини леза для ножа з двобічним внутрішнім скосом треба подвоїти;

- з двобічним зовнішнім скосом леза

$$s_{TP} = r \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{s - S_T}{r \cdot \operatorname{tg} \alpha}\right) \right], \quad (3.2)$$

- зі змінним внутрішнім скосом леза

$$s_{TP} = r \cdot \arccos\left(\frac{\sqrt{(H - s + S_T) \cdot (2R - H + s - S_T)}}{r}\right), \quad (3.3)$$

- з двома взаємно перпендикулярними внутрішніми скосами леза

$$s_{TP} = r \cdot \left[\arccos \left(\cos \frac{\pi}{4} - \frac{s - S_T}{r \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) - \frac{\pi}{4} \right]. \quad (3.4)$$

Витрати сумарної потужності $N_{\Sigma} = N_1 + N_2$ при прорізуванні різнопрофільних отворів у листову гуму залежать від потужності $N_1 = F_1 \cdot v$ (F_1 – сила, що діє в напрямку швидкості v ножа), що витрачається на переміщення ножа в напрямку траєкторії руху, і від потужності $N_2 = F_2 \cdot v_{TP}$ (F_2 – сила, що діє в площині матеріалу в напрямку швидкості v_{TP} точки різання), яка витрачається на подолання сил технологічних опорів і тертя в площині матеріалу [16].

Швидкість точки різання v_{TP} напрямлена по дотичній до дуги радіусом r кривини ножа (рис. 3.2, а) і визначається диференціюванням виразів для переміщень точки різання (3.1 – 3.4) за часом t .

Встановимо залежності швидкості точки різання від геометричних параметрів і закону руху для п'яти типів прорізних ножів:

- з однобічним і двобічним скосами леза

$$v_{TP} = \frac{ds_{TP}}{dt} = \frac{v}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{s - S_T}{r \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right)^2}}, \quad (3.5)$$

де v – поточна швидкість ножа (залежить від закону руху);

- з двобічним зовнішнім скосом леза

$$v_{TP} = \frac{ds_{TP}}{dt} = \frac{v}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{s - S_T}{r \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right)^2}}, \quad (3.6)$$

- зі змінним внутрішнім скосом леза

$$v_{TP} = \frac{ds_{TP}}{dt} = \frac{[(H - s + S_T) \cdot (2R - H + s - S_T)]^{-0.5} \cdot v \cdot (R - H + s - S_T)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{(H - s + S_T) \cdot (2R - H + s - S_T)}}{r} \right)^2}}, \quad (3.7)$$

- з двома взаємно перпендикулярними внутрішніми скосами леза

$$v_{TP} = \frac{ds_{TP}}{dt} = \frac{v}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \sqrt{1 - \left(\cos \frac{\pi}{4} - \frac{s - S_T}{r \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right)^2}}. \quad (3.8)$$

Результати аналітичних досліджень у вигляді графіка зображено на рис. 3.3, на якому показано зміну швидкості точки різання для усіх розглянутих типів прорізних ножів: 1 – з однобічним скосом леза; 2, 3 – з двобічним внутрішнім і зовнішнім скосами лез відповідно; 4 – зі змінним внутрішнім скосом леза; 5 – з двома взаємно перпендикулярними внутрішніми скосами леза (далі – ножі типів I, II, III, IV і V, відповідно). Вихідними даними при розрахунках були: висота підйому леза ножів $H = 3,5$ мм, радіус кривини профілю $r = 25$ мм, хід ножа $S_H = 8,0$ мм, відстань $S_T = 3,0$ мм, час робочого ходу $T = 0,1$ с, закон руху ножа – „діаграма прискорень – косинусоїда”.

Як бачимо, для прорізних ножів перших чотирьох типів на певних позиціях різання (початок або завершення різання) спостерігаються максимальні значення швидкості точки різання, що прямують до безмежності. Таке явище пояснюється тим, що контакт леза ножа з матеріалом на початку або наприкінці різання відбувається по елементарній ділянці, паралельній до площини матеріалу. Можна припустити, що на цих ділянках буде надмірне споживання потужності. Проте це не означає, що значення потужності будуть також прямувати до безмежності, оскільки лезо ножа не має нахилу на цих ділянках, тому і відсутня складова сили різання у площині матеріалу. Вона виникає у момент початку підйому площини леза ножа. Найменші значення швидкості точки різання упродовж виконання операції прорізування отвору

характерні для ножа типу V, тому для такого типу ножів характерне мінімальне споживання потужності на різання.

3.3. Силві характеристики операції прорізування різнопрофільних отворів у листовій гумі

2.3.1. Розподіл сил в зоні різання. Розділення листової гуми по внутрішньому контуру за методом ножичного різання здійснюється ножем, лезо якого має змінний нахил площини леза до оброблюваного матеріалу, тому в процесі різання постійно відбувається зміна напрямку дії і значень сил різання. Згідно з [49] при ножичному різанні сила різання напрямлена перпендикулярно до крайки леза ножа. Розглянемо розподіл сил різання при прорізуванні внутрішніх контурів прорізними ножами типів I, II, III, IV і V. Рис. 3.4 ілюструє прорізування отвору ножем типу I.

Залежність між силою різання F і її складовими – F_1 в напрямку траєкторії руху і F_2 (силою зсуву) в площині матеріалу можна прослідкувати за кутом β між F_1 і F , тобто $F_1 = F \cos \beta$, $F_2 = F \sin \beta$.

Рис. 3.4. Розподіл сил в зоні різання

Оскільки сила різання F діє перпендикулярно до крайки леза ножа, то β можна визначити як кут між дотичною до крайки леза і площиною матеріалу [7].

$$\beta = \arcsin \frac{|Al + Bm + Cn|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \cdot \sqrt{l^2 + m^2 + n^2}}, \quad (3.9)$$

де A , B і C – коефіцієнти площини (горизонтальної); l , m і n – напрямні коефіцієнти вектора r' дотичної

$$l = \frac{dx}{d\varphi}, \quad m = \frac{dy}{d\varphi}, \quad n = \frac{dz}{d\varphi}; \quad (3.10)$$

x , y і z – координати спільної поточної точки M крайки леза ножа і дотичної; φ – кутовий параметр.

Запишемо рівняння крайки леза ножа типу I в параметричній формі

$$x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi, \quad z = r \operatorname{tg} \alpha (1 - \cos \varphi), \quad (3.11)$$

де φ – кут повороту вертикальної площини A_2OZ (в цій площині лежить точка M) з початкового положення A_1OZ , r – радіус кривини ножа, α – кут нахилу.

З урахуванням (2.11) вирази (2.10) матимуть вигляд

$$l = -r \sin \varphi, \quad m = r \cos \varphi, \quad n = r \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.12)$$

Оскільки в рівнянні горизонтальної площини (площини матеріалу) коефіцієнти A і B рівні нулю, а $C = 1$, то кут нахилу дотичної до неї запишемо у вигляді

$$\beta = \arcsin \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin^2 \varphi}} \right). \quad (3.13)$$

Леза ножів типів I, II, III і V утворені перетином його поверхні площиною (площинами) під деяким кутом α до матеріалу, тому розрахунок кута β можна проводити, користуючись формулою (3.13). Слід зауважити, що для ножа типу I – кут φ змінюється в межах від 0° до 180° , для ножа типу II – від 0° до 90° , для ножа типу III – від 90° до 180° , для ножа типу V – від 45° до 90° .

Розглянемо залежність зміни кута β для ножа типу IV. Запишемо рівняння крайки леза у просторі в параметричній формі :

$$x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi, \quad z = H - R + \sqrt{R^2 - r^2 \cos^2 \varphi}. \quad (3.14)$$

Зазначимо, що кут φ змінюється в межах від 0° до 90° .

Напрямні коефіцієнти вектора r' дотичної для:

$$l = -r \sin \varphi, \quad m = r \cos \varphi, \quad n = r^2 \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot (R^2 - r^2 \cos^2 \varphi)^{-0.5}. \quad (3.15)$$

Кут нахилу β знаходимо за формулою (3.9)

$$\beta = \arcsin \left(\frac{r \cos \varphi \cdot \sin \varphi}{\sqrt{R^2 - r^2 \cos^2 \varphi} \cdot \sqrt{1 + \frac{r^2 \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \varphi}{R^2 - r^2 \cos^2 \varphi}}} \right). \quad (3.16)$$

Рис. 3.5 ілюструє залежність кута β для ножів всіх типів за умови однакової висоти підйому леза $H = 3,5$ мм з радіусом кривини $r = 25$ мм. Як видно з графіка, для ножів типів I, II, III і IV, у певних позиціях кута φ кут β є рівним нулю, що означає відсутність складової сили різання у площині матеріалу. Ця обставина пояснює той факт, що у цих позиціях елементарна ділянка крайки леза є паралельною до матеріалу, тому і швидкості точки різання прямують до безмежності (див. 3.2).

Рис. 3.5. Зміна кута нахилу між дотичною до крайки леза і площиною матеріалу

Слід зазначити, що сила різання F породжує силу тертя леза з оброблюваним матеріалом

$$F_{TP} = F \cdot f_{TP} = F \cdot \operatorname{tg} \rho, \quad (3.17)$$

де $f_{TP} = 0,15..0,2$ – коефіцієнт тертя у парі матеріал ножа – оброблюваний матеріал, або тангенс кута тертя ρ з оброблюваним матеріалом.

На скошену частину ножа діє лобова складова F_n сили різання F , яка залежить, в основному, від висоти стосу оброблюваного матеріалу [23, 48, 55], тому при товщині матеріалу до 3 мм лобовою силою різання можна знехтувати.

Користуючись наведеними залежностями можна розрахувати складові сили різання, необхідні для визначення енергетичних параметрів виконання операції прорізування різнопрофільних отворів у гумових виробках.

Для спрощення практичних розрахунків технологічних навантажень можна скористатися формулою [26, 29, 55]

$$F = q \cdot l_p, \quad (3.18)$$

де q – погонна сила різання, що залежить від фізико-механічних властивостей листової гуми (паперу), гостроти леза ножа тощо; l_p – довжина лінії різання.

Таким чином, з аналізу залежності (3.18) випливає, що при наближено постійних погонних силах різання q розподіл технологічних навантажень буде відповідати характеру зміни довжини лінії різання під час прорізування отвору.

3.4. Висновки до розділу

1. За результатами комплексних аналітичних досліджень встановлені залежності однієї з основних величин, що впливає на технологічні навантаження – довжини лінії різання – від геометричних параметрів різального інструменту (кута нахилу леза, радіуса кривини та конфігурації) і товщини листової гуми.
2. Визначені оптимальні значення кутів нахилу лез інструменту з огляду на мінімізацію довжини лінії різання і переміщення ножа: $\alpha = 4^\circ \dots 8^\circ$ – для ножів типу I; $\alpha = 8^\circ \dots 14^\circ$ – для ножів типів II і III; $\alpha_{II} = 16^\circ \dots 30^\circ$ – для ножів типу IV, $\alpha = 12^\circ \dots 20^\circ$ – для ножів типу V.
3. Визначені кінематичні характеристики процесу прорізування отворів, згідно з якими найкращими умовами, з точки зору мінімізації енергетичних параметрів операції різання, характеризується ніж типу V.
4. Встановлені основні залежності технологічних навантажень від геометричних параметрів різального інструменту і механічних характеристик гум.
5. Встановлені критерії для розрахунку технологічних навантажень і споживаної потужності.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ОТВОРІВ У ЛИСТОВІЙ ГУМІ

4.1. Мета і програма експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень було виявлення та порівняння силових характеристик ножового і ножичного різання листової гуми та встановлення фактичних силових характеристик та якості виконання операції прорізування отворів.

Для досягнення поставленої мети необхідно експериментальним шляхом отримати основні механічні характеристики ножового та ножичного різання, а також виявити залежності технологічних навантажень та якості прорізування внутрішніх контурів у листовій гумі ножичним методом від: товщини і густини гуми; зазору між ножом і протиножем; геометричних параметрів різального інструмента (конфігурації леза, кута нахилу леза, кута загострення); швидкості виконання операції прорізування; тривалості роботи інструменту.

Досліджуваний матеріал. Для дослідження були відібрані зразки із щільного одно- і багат шарового листової гуми п'яти видів (табл. 4.1), які різняться за товщиною і густиною.

Таблиця 4.1 - Характеристика листових гум різних типів

Тип листової гуми	Міцність на розрив (МПа)	Твердість за Шором А	Макс. робоча температура (°C)	Мін. робоча температура (°C)	Стійкість до стирання (мм ³)	Коефіцієнт еластичності (%)	Густина (г/см ³)
Натуральна гума	20	50	70	-50	250	70	0,93...1,0
Нітрилова гума (NBR)	15	60	110	-30	150	60	1,0...1,5
EPDM гума	10	70	130	-40	200	50	1,1...1,6
Силіконова гума	8	40	300	-60	300	60	1,1...1,3
Неопренова гума	12	65	95	-40	180	65	1,2...1,5

Різальний інструмент. Для встановлення порівняльних характеристик ножового і ножичного різання використано: для ножового різання – стандартні висікальні лінійки завтовшки $t = 0,70$ мм з кутом при вершині леза $\alpha = 52^\circ$ і радіусом закруглення крайки леза $r_3 = 7...10$ мкм (рис. 4.1, а), плоскі лінійки завтовшки $t = 0,35$ і $0,70$ мм (рис. 4.1, б), опорна поверхня - сталева плита (на рис. не показано); для ножичного різання - плоскі ножі завтовшки $t_2 = 0,35$ і $0,70$ мм і протиніж завтовшки $t_1 = 5$ мм з кутом при вершині $\alpha_1 = 80^\circ$ (рис. 4.1, в).

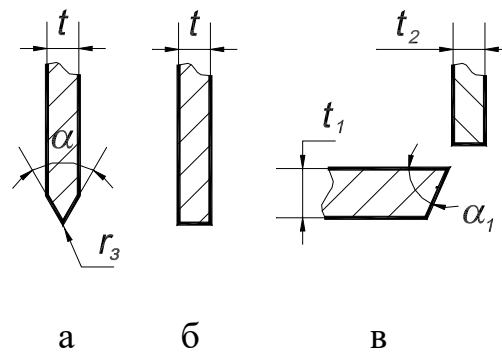


Рис. 4.1 - Інструмент для ножового і ножичного різання

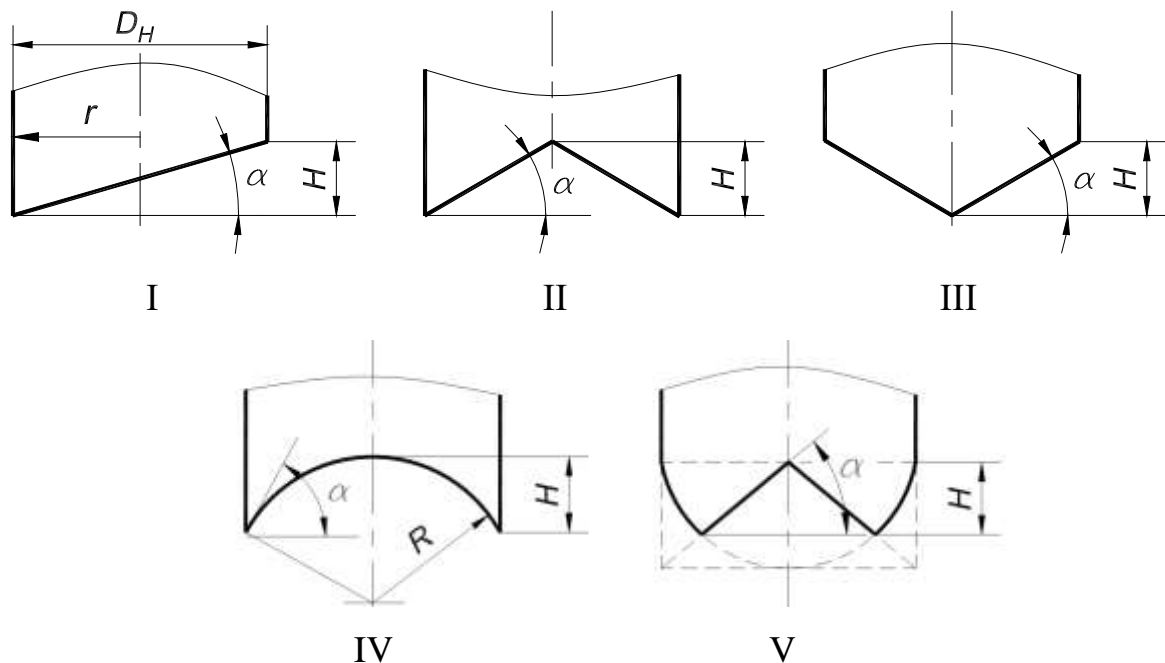


Рис. 4.2 - Конфігурації лез прорізних ножів

Для досліджень залежностей технологічних навантажень від основних чинників за методом ножичного різання використано п'ять типів прорізних ножів циліндричної форми діаметром $D_n = 50$ мм, які різняться формою леза

(див.розділ 3) і рис. 4.2: I – з однобічним скосом; II, III – з двобічним внутрішнім і зовнішнім скосами; IV – зі змінним внутрішнім скосом леза, утвореного перетином двох циліндричних поверхонь зі взаємно перпендикулярними осями; V – з двома взаємно перпендикулярними двобічними внутрішніми скосами.

Змінним параметром кожного типу ножа є кут нахилу леза α , який вибирали для ножа типу I в межах $4...10^0$ з кроком 2^0 , для ножів типів II і III – $8...20^0$ з кроком 4^0 ; для ножів типів IV і V кут α визначався за висотою підйому леза H , яка приймалася рівною висоті H для ножів. До змінних параметрів ножа типу I прийнято загострення леза під кутом α_z , 30^0 , 75^0 , яке виконували за наступною схемою [12] (рис. 4.3):

- 1) фрезерували площину крайки леза на циліндричній (трубчастій) заготовці під кутом $90^0 - \alpha$ до її осі;

а

б

Рис. 4.3 - Схема загострення ножа з однобічним скосом

- 2) формували загострену крайку ножа різцем, нахиленим під кутом загострення α_z до осі заготовки, ексцентрично закріпленої в патроні токарного верстата;
- 3) доводили ніж абразивним інструментом.

Конструкція протиножа зображена на рис. 4.4. Його крайка під кутом 90^0 , утворена перетином горизонтальної площини (для розташування листової гуми) та циліндричного пояска завширшки $\delta_{II} = 0,5\text{мм}$. Поясок необхідний для багаторазового переагострення протиножа в площині А.

Рис. 4.4 - Конструкція протиножа

Неробоча поверхня протиножа виконана конічною з кутом при вершині $\alpha_n = 10^0$ – для надійного видалення відходів. Проведення досліджень в умовах одnobічного зазору $z = 0,050; 0,040; 0,030; 0,020$ і $0,015$ мм між ножем і протиножем забезпечено поступовим зменшенням діаметра ножів шляхом перешліфування їх робочої поверхні.

Програма експериментальних досліджень.

Під час проведення експериментальних досліджень для встановлення порівняльних характеристик ножового і ножичного різання використано: досліджуваний матеріал – вибірково із передбачених програмою натуральна гума, нітрилова гума (NBR), EPDM гума, силіконова гума, неопренова гума (див.табл. 4.1); усі передбачені типи різального інструменту (див.рис. 4.1).

Для встановлення залежності погонних сил різання від *фізико-механічних характеристик* листових гум використано різальний інструмент (див. рис. 4.2, 4.4) – кути нахилу лез α ножів визначались за висотою підйому леза $H = 3,5$ мм і складали для ножа типу I – 4^0 , типів II і III – 8^0 , типу IV – $\alpha_{II} \approx 16^0$ ($R = 90$ мм) і типу V – 11^0 ; зазор $z = 0,02$ мм; хід ножа $S = 20$ мм; циклічність роботи станда $n = 60$ цикл/хв.

Дослідження залежності погонних сил різання від значення зазору між ножем і протиножем здійснено при $z = 0,050; 0,040; 0,030; 0,020$ і $0,015$ мм; інші вихідні дані аналогічні до перелічених вище.

Залежність погонних сил різання від геометричних параметрів різального інструменту (конфігурації, кута нахилу і загострення леза) встановлено за таких вихідних даних: щільного листової гуми тих же видів, що і попередньому експерименті; гофролистової гуми видів С і Е; кута α для ножа типу I – в межах

2...10⁰ з кроком 2⁰, для ножів типів II і III – в межах 4...20⁰ з кроком 4⁰, для ножа типу IV – α_{II} в межах 7,98...36,68⁰ (R відповідно 180 і 40 мм), для ножа типу V – в межах 5,6...26,5⁰ (кути α для ножів типів IV і V визначені за висотою підйому леза H , яка змінювалась в межах від 1,75 до 8,82 мм); ножів суцільної і порожнистої форм; кута загострення α_z 75⁰ і 30⁰ (див. рис.3.3) для ножа типу I; інші вихідні дані збережені.

4.2. Технічне забезпечення експериментальних досліджень

Стенд складається з привідної станції, механізму ножа та вимірювального пристрою для реєстрації сил різання. Привід механізму ножа здійснюється від штатного електродвигуна 1 постійного струму, який через муфту 2, черв'ячний редуктор 3 з передатним числом $u = 22$ та однообертову муфту 4 приводить вал 5. Під час увімкнення однообертова муфта 4 з'єднує вихідний вал редуктора 3 з привідним валом 5 механізму ножа на один повний оберт. На валі 5 жорстко закріплено кривошип 6, який через регульовану тягу 7 приводить в зворотно-обертовий рух коромисло 8. Зворотно-поступальний рух натискної рамки 10 з вимірювальним пристроєм 14 і штока 11 з ножем 12 здійснює коромисло 8 через шатун 9. Прорізування внутрішнього контуру у заготовці 16, що фіксується притиском 15 на нерухомому протиножі 13, здійснюється ножем 12.

Для уникнення негативного впливу ваги коромисла 8 на точність вимірювання сил різання, проведено статичне балансування коромисла 8 за допомогою противаги 17. Експериментальний стенд змонтовано на жорсткій станині 18.

Вимірювальна апаратура. Визначення сил технологічних опорів здійснювали за допомогою вимірювального пристрою 14 (детальніше – далі), а реєстрація сигналів від нього – за допомогою тензометричної апаратури, до складу якої входили

- блок вводу-виводу фірми National Instruments USB-6008;
- персональний комп'ютер з програмним забезпеченням LabVIEW;
- вимірювальний тензометричний пристрій

Метод і засоби реєстрації силових параметрів. Визначення сил різання проведено методом тензометричних вимірювань, який полягає у застосуванні перетворювачів вихідної інформації (сигналу) у форму, зручну для спостереження, реєстрації та зберігання [46].

У вимірювальному пристрої (рис. 4.6), використаному в роботі як механічний перетворювач, було застосовано пружне сталеве кільце 1 зі зовнішнім діаметром $D = 40$ мм, завтовшки $\delta = 3,5$ мм і завширшки $B = 15$ мм. Матеріал кільця - пружинна сталь марки 65Г за ГОСТ 1050-74.

Рис. 4.6. Конструкція вимірювального пристрою

Електричним перетворювачем вихідного сигналу служили тензорезистори 2, які попарно наклеєні на попередньо оброблені зовнішню і внутрішню бокові поверхні кільцевого елемента 1. У роботі використано тензорезистори загального призначення типу 2ПКП, з'єднані за мостовою схемою електричних опорів (рис.4.7). Умова рівноваги моста – $R_1R_3 = R_2R_4$. При проведенні досліджень на одну діагональ мостика подають живлення, а з іншої – знімають сигнал, значення якого залежить від розбалансування контура, що спричиняється зміною опору тензорезисторів під дією механічної деформації від сил технологічних опорів.

Вимірювальний пристрій встановлено у зоні дії сил різання між натискною рамкою 4 (рис. 4.6, а) і штоком 5. Під час переміщення натискної рамки 4 і штока 5, які мають різні напрямні, можливе знакозмінне вибирання зазорів, що може призвести до виникнення додаткових сил і вплинути на точність реєстрації технологічних навантажень. Тому кільце 1 однією опорною поверхнею жорстко з'єднане зі штоком 5, а другою – контактує з робочою поверхнею натискної рамки 4 через кульку 3. Зворотний хід рамки 4 зі штоком 5 і кільцем 1 забезпечено спеціальним з'єднанням.

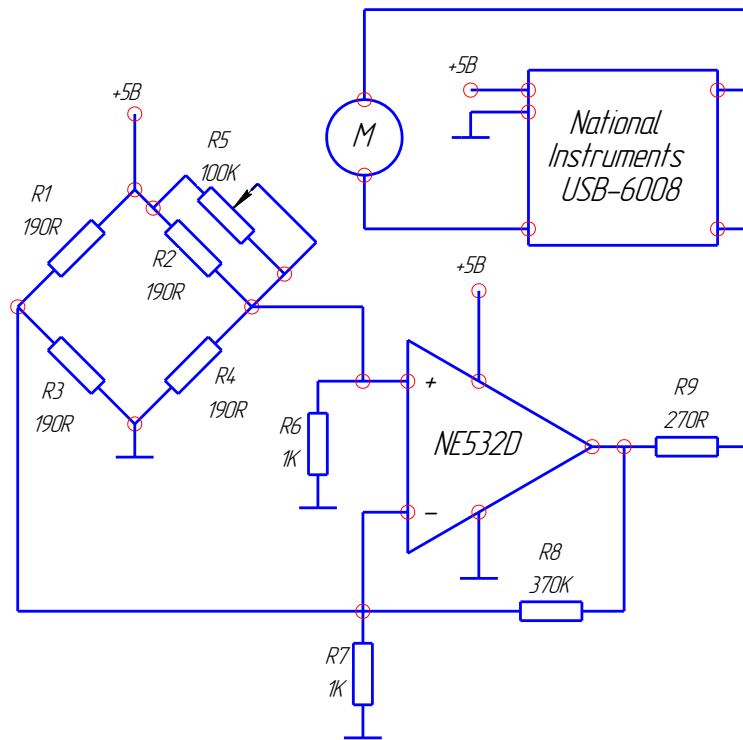


Рис. 4.7 - Схема електричного моста опорів

4.3. Узагальнення експериментальних досліджень механіки різання листової гуми

4.3.1. Встановлення порівняльних силових характеристик ножового і ножичного різання. Як було зазначено в розділі 2, під час розділення матеріалу за методом ножового різання ніж врізається в матеріал, переміщується крізь його товщу і завершує різання обов'язковим контактом з опорною поверхнею. З огляду на це, можна припустити, що руйнування листової гуми відбувається, в основному, під дією стиснення матеріалу до межі, коли робочі напруження стиснення перевищуватимуть допустимі. Проведені експериментальні дослідження з визначення руйнівних напружень стиснення для гуми ілюструє типова осцилограма (рис.4.8). Напруження руйнування визначені, як відношення сили руйнування (на межі періодів I і II) до площі контакту інструмента з гумою. Такий характер зміни технологічних навантажень зберігається при проведенні досліджень різальним інструментом різних товщин і може бути умовно поділений на такі періоди:

I – стиснення гуми ножом до критичного стану (межі міцності);

II – руйнування гуми, що характеризується короткочасним зменшенням технологічних навантажень;

III – зростання навантажень через “врізання” крайки леза ножа в опорну поверхню і деформування найменш жорстких ланок механізму привода ножа;

IV – повернення ножа у вихідне положення (зворотний хід) з поступовим зменшенням навантажень.

Зауважимо, що на першому періоді спостерігається нерівномірне зростання навантажень, яке пояснюється тим, що від контакту крайки леза ножа з гумою до початку його стиснення відбувається вибирання зазорів між натискною рамкою 4, кулькою 3 і вимірювальним пристроєм 1 (див.рис. 4.6). Подібна картина характерна і для четвертого етапу.

Рис. 4.8. Типова осцилограма характеру зміни технологічних навантажень при ножовому різанні

Під час проведення цього експерименту вузол просікання спочатку налагоджували за умови мінімального контакту крайки леза ножа з опорною поверхнею (сталевою плитою). Однак, за такої умови повне розділення матеріалу не відбувалось. З огляду на це було створено силовий контакт в системі “ніж – опорна поверхня”, що забезпечило надійне просікання листової гуми будь-якої товщини у його найнижчих шарах. Слід врахувати, що наявність силового контакту призводить до інтенсивнішого спрацювання різального інструмента і механізму привода, оскільки найбільшим навантаженням є не сила просікання, а сила опору від “врізання” ножа в опорну

сталеву плиту, 8 що свідчить осцилограма (етап III – рис.4.11). Таким чином, можна стверджувати необхідність попереднього натягу при ножовому різанні, що пояснюється високими руйнівними напруженнями стиснення гуми, які залежать від багатьох чинників.

Одним з таких чинників є хімічний склад листової гуми. Як свідчать результати проведених досліджень, напруження руйнування при стисненні гуми в значній мірі залежить від типу полімерної основи та добавок, які використовуються в складі. Наприклад, гумові суміші на основі нітрилового каучуку демонструють вищу стійкість до масел і хімічних речовин, але при цьому можуть мати нижчі показники еластичності в порівнянні з силіконовими або EPDM-гумами. Дослідження також показують, що гуми з вищим вмістом наповнювачів, таких як сажа або крейда, мають збільшене напруження руйнування при стисненні, але можуть втрачати гнучкість, особливо при низьких температурах.

Значення руйнівних напружень при стисненні гуми під час різання (табл.4.3) можуть змінюватися залежно від товщини леза, оскільки різна товщина інструмента створює інше навантаження на матеріал. Загалом, тонше лезо ($0,5t$) створює вищі напруження на одиницю площі, тоді як товстіше лезо (t) рівномірніше розподіляє навантаження.

Таблиця 4.3 - Орієнтовні руйнівні напруження стиснення гуми

Тип інструменту	Вид гуми	Руйнівні напруження стиснення гуми, МПа
	Натуральна гума	20...30
	Нітрилова гума (NBR)	15...25
	EPDM гума	12...20
	Силіконова гума	10...18
	Неопренова гума	15...22
	Натуральна гума	15...25
	Нітрилова гума (NBR)	10...20
	EPDM гума	8...18
	Силіконова гума	5...15
	Неопренова гума	10...17

Тонше лезо (0,5t) загалом підвищує напруження руйнування, оскільки менша товщина створює більшу концентрацію напруги на матеріал, що може призводити до його швидшого зношення або розриву.

Ущільнені (невитиснені) шари – залишаються під притискною площиною пластини. Очевидно, зрозуміло, що за більшої товщини притискої поверхні ножа, умови для витискання шарів гуми значно погіршуються. Результатом цього є більше ущільнення гуми під притискою поверхнею і, як наслідок збільшення напружень руйнування. З огляду на це впливає, що найкращими умовами розділення характеризуються висікальні лінійки (див. рис.4.1, а).

Розділення листових гуми висікальними лінійками лише частково імітує процес стиснення плоским інструментом. Гострий кут при вершині леза призводить до того, що крім сили, яка діє перпендикулярно до площини листової гуми, діють і сили від бокових граней висікальної лінійки. При розрахунку руйнівних напружень стиснення гуми таким інструментом, площу стиснення визначено наближено за радіусом закруглення крайки леза ($r_3 = 7...10$ мкм) і шириною лінійки, хоча контактуюча площа може бути і більшою через збільшення радіуса закруглення від врізання крайки леза в сталеву опорну поверхню під час висікання.

Таким чином, правомірно вважати, що основними руйнівними напруженнями розділення гуми за методом ножового різання є напруження стиснення (див.табл. 4.3), які сягають значень 12...21 МПа (для досліджуваних типів гум), залежать від товщини і густини листової гуми, а також наявних домішок у їх хімічному складі.

Принцип ножичного різання (розділ 2, 3) полягає у тому, що розділення листової гуми відбувається у зоні, обмеженій двома різальними крайками – ножа і протиножа. Для такого методу розділення характерні два етапи (див. розділ 2). На першому етапі відбувається стиснення матеріалу до межі, коли напруження зрізування перевищуватимуть допустимі, а на другому етапі – різання гуми за умови мінімального зазору між ножем і протиножем. Треба зазначити, що для другого етапу також характерні напруження стиснення, які супроводжують процес різання. Для підтвердження цього проведені

дослідження навантажень і напружень, що виникають під час розділення гум методом ножичного різання. Руйнівні напруження зрізування визначені, як відношення сили до площі зрізування, яка розрахована за товщиною листової гуми і шириною ножа. У табл.4.4 наведені руйнівні напруження зрізування гуми при використанні різального інструмента – плоского ножа і протиножа (див.рис.4.1, в).

Руйнівні напруження при зрізуванні гуми (зрізна міцність) також залежать від хімічного складу, типу гуми та умов експлуатації.

Таблиця 4.4 - Руйнівні напруження зрізування листової гуми

Різальний інструмент	Вид гуми	Руйнівні напруження зрізування гуми, МПа
	Натуральна гума	3,5
	Нітрилова гума (NBR)	4,5
	EPDM гума	3,0
	Силіконова гума	2,0
	Неопренова гума	4,0

Ці значення є усередненими і можуть змінюватися в залежності від точного складу гуми та умов її використання.

Зауважимо, що напруження зрізування гуми не залежать від товщини ножів, тобто відсутній т.зв. масштабний фактор. Таке явище пояснюється тим, що під дією прикладеної сили ніж і протинож контактує з гумою по крайках лез, а не по поверхні, результатом чого є виникнення напружень, які діють у площині руйнування, тобто напружень зрізування. Збільшення густини гуми від $0,93 \text{ г/см}^3$ до $1,5 \text{ г/см}^3$ спричиняє зростання напружень зрізування приблизно в 1,5 раза. За рахунок вищої густини матеріалу збільшується його опір зрізуванню, оскільки більш щільна структура гуми краще витримує навантаження і сприяє підвищенню міцності. Це особливо помітно у випадках, коли до гуми додають наповнювачі або використовують складові з високою молекулярною масою. У результаті, гума з підвищеною густиною може бути більш стійкою до механічних впливів, зокрема в агресивних середовищах, де

важлива додаткова міцність на зрізування. За результатами досліджень руйнівні напруження зрізування залежно від виду гуми сягають значень 3...6 МПа.

Таким чином, можна констатувати, що руйнівні напруження при ножовому і ножичному різанні є різними за природою (напруження стиснення і зрізування). До основних переваг ножичного різання, порівняно з ножовим, слід віднести зменшення на порядок напружень руйнування матеріалу.

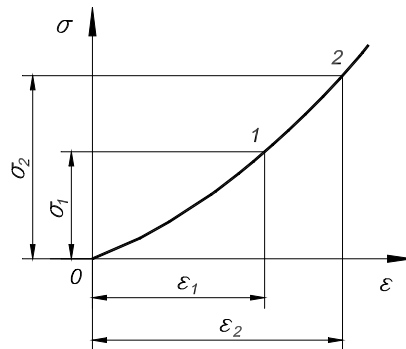


Рис.4.9. Діаграма для визначення фізичних констант листової гуми

4.3.2. Залежність погонних сил різання від геометричних параметрів різального інструменту. Встановлення такої залежності проводилось для трьох основних параметрів: конфігурації, кута нахилу і кута загострення леза прорізних ножів.

Вплив конфігурації леза на розподіл технологічних навантажень ілюструють типові осцилограми (4.10, а-д) для всіх розглянутих типів прорізних ножів. В момент врізання крайки леза ножа в матеріал (наприклад, для ножа типу І) спостерігається більший максимум технологічних навантажень на межі фаз І і ІІ порівняно із закінчення різання на межі фаз ІІ і ІІІ, хоча на завершенні різання ножом такого типу кути різання перевищують 90° . З іншого боку, довжина лінії різання на межах цих фаз є однаковою. Таке явище можна пояснити кращими умовами завершення різання для ножа будь-якого типу, оскільки момент врізання характеризується початковим стисненням до початку руйнування (за [43] – це утворення “випереджуючої тріщини” як концентратора напружень), після чого триває усталений режим різання. Оскільки напруження стиснення гуми перевищують напруження зрізування (див.4.3.1), одним зі шляхів зменшення технологічних навантажень у

початковий момент врізання ножа в листову гуму є мінімізація площі контакту крайки леза з оброблюваним матеріалом, а також внесення в конструкцію леза загостреної ділянки у найнижчій точці (точках) крайки леза. Такі загострення є характерні для ножів типів III і V. Однак ніж типу III характеризується найгіршими умовами різання, оскільки від початку до завершення різання найнижчі точки крайки леза вштовхують матеріал в отвір протиножа, що вимагає обов'язкового фіксування листової гуми на протиножі.

Д е
Рис. 4.10 - Типові осцилограми технологічних навантажень

Застосування суцільної та порожнистої (з товщиною стінки 2 мм) конструкцій ножів типів I – IV виявило ідентичність результатів. Розділення матеріалу суцільним ножем типу V можна охарактерувати поганими умовами різання (рис.4.10, е), що пояснюються контактом не лише крайки леза з матеріалом, але й граней ножа, які утворились від формування крайки леза двома внутрішніми скосами у взаємно перпендикулярних напрямках.

а

б

Рис. 4.11. Залежність погонних сил різання від кута нахилу леза для ножа типу I

Залежність погонних сил різання від кута нахилу площини леза. Як ілюструють графіки (рис.4.11), при збільшенні кута нахилу леза: від 2° до 10° для ножа типу I максимальна погонна сила різання q зменшується в 1,29...1,37 раз; від 4° до 20° для ножів типів II і III – в 1,16...1,20 раз; від $7,98^{\circ}$ до $36,68^{\circ}$ для ножа типу IV – в 1,12...1,22 раз; від $5,6^{\circ}$ до $26,5^{\circ}$ для ножа типу V – в 1,12...1,17 раз.

Таким чином, можна стверджувати, що одним з основних чинників, який сприяє зменшенню погонних сил різання, є зменшення кутів різання α_p та довжини лінії різання l_p (див.розділ 4, п.4.1). З аналізу наведених експериментальних залежностей доходимо висновку, що суттєве зменшення погонних сил різання q досягається збільшенням кута нахилу α в певному

діапазоні. Так, наприклад, для ножа типу I – це межа $2^0 \dots 6^0$. Як свідчать результати аналітичних досліджень (див.розділ 4, п.4.1) в межах тих же кутів нахилу забезпечується мінімізація і довжини лінії різання (така закономірність зберігається для ножів усіх типів). З іншого боку, розміри і кут нахилу ножа визначають його висоту підйому леза, а відтак і – хід.

Однак, це не означає, що є обмеження у застосовуванні інструменту із більшими чи меншими значеннями кутів. Це визначається, в основному, технічною характеристикою існуючого устаткування, на якому буде здійснюватись операція. У цьому випадку для проектування різального інструмента вихідними є два основні параметри: максимальна потужність устаткування та робочий хід штока. Коли ж йдеться про розробку нового устаткування слід користуватися рекомендаціями, що випливають з даних досліджень.

Залежність погонних сил різання від кута загострення леза ножа. Зменшення технологічних навантажень та підвищення якості різання можливе при різанні гуми ножом з крайкою, однаково загостреною по всій довжині леза. Проведено експериментальні дослідження при куті загострення $\alpha_3 = 75^0$ і 30^0 (див.рис.4.1) для ножа типу I. Виявлено, що при зміні кута α_3 з 75^0 до 30^0 погонні сили різання q зменшуються на 15...20 %. При цьому якість різання суттєво не змінюється. Основним недоліком ножів такої конструкції є складність виготовлення та порівняно незначний вираш у силі і якості різання. Відтак при проектуванні різального інструменту вносити додаткове загострення крайки не доцільно.

4.3.3. Залежність погонних сил різання від швидкості виконання операції. Зміна швидкості роботи станда здійснювалась від двигуна постійного струму з регульованою частотою обертання. За результатами експерименту можна констатувати факт незначного зростання погонних сил в 1,03...1,05 рази при збільшенні швидкості роботи станда від 20 до 60 циклів/хв. У цих межах проведені аналітичні розрахунки швидкостей і пришвидшень ножа і встановлено, що таке збільшення погонних сил різання можна пояснити збільшенням сил інерції від зведеної маси ножа. Також встановлено, що

збільшення швидкості різання сприяє незначному підвищенню якості різання листової гуми (натуральна та нітрилова гума), що пояснюється зменшенням часу на його деформацію перед початком різання через їх твердість.

Таким чином, можна стверджувати, що найбільш впливовими чинниками на погонні сили різання є фізико-механічні характеристики гуми (товщина, густина), значення зазору між ножом і протиножем, кут нахилу леза ножів, їх конфігурація, розташування волокон відносно крайки леза. В меншій мірі на погонні сили різання проявляється вплив кута загострення ножів, швидкості виконання операції різання та кількості циклів різання.

4.4. Висновки до розділу

1. Встановлені основні силові характеристики ножового і ножичного методів різання листової гуми, які призводять до руйнування матеріалу в зоні різання:
 - для ножового різання – нормальні напруження стиснення, які залежно від характеристик листової гуми і форми леза ножа сягають 3...6 МПа;
 - для ножичного різання – дотичні напруження зрізування в діапазоні від 1,5 МПа до 2,0 МПа залежно від виду листової гуми. Отримані характеристики додатково підтверджують доцільність і перевагу застосування ножичного різання при виготовленні гумових ущільнюючих виробів.
2. Виявлено, що найбільш впливовими чинники при виконанні операції прорізування отворів у листовій гумі є:
 - товщина гуми, збільшення якої призводить до зростання погонних сил різання незалежно від типу прорізних ножів;
 - густина гуми, яка спричиняє зростання погонних сил різання;
 - зазор між ножом і протиножем, збільшення якого сприяє зменшенню технологічних навантажень, але призводить до погіршення якості різання;
 - кут нахилу леза, збільшення якого сприяє зменшенню погонних сил різання і спричиняє зростання ходу ножа;
 - тип ножа.

3. Встановлені оптимальні режими виконання операції прорізування отворів. Для якісного різання листової гуми кількість одночасно оброблюваних аркушів не повинна перевищувати 1...3 за умови малої густини гуми ($0,93...1,0 \text{ г/см}^3$), 3...5 аркушів при густині $1,1...1,5 \text{ г/см}^3$. Обробку твердих видів листової гуми (густина вище $2,0 \text{ г/см}^3$) раціональніше виконувати тільки поштучно.
4. Підтверджено аналітичні припущення, що максимальні погонні сили різання ножем з двома взаємно перпендикулярними внутрішніми скосами менші в 1,4...1,6 раза порівняно з ножами інших типів.
5. Технологічні навантаження, визначені експериментальним методом, відрізняються від розрахованих аналітично не більше ніж, на 15 %. Характер зміни технологічних навантажень упродовж виконання операції різання повністю аналогічний картині, представленій аналітичними дослідженнями для всіх типів різального інструменту.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Охорона праці при вирубуванні гумових ущільнень

Процес вирубування гумових ущільнень пов'язаний з використанням механічного обладнання та інструментів, що створює потенційні ризики для здоров'я працівників. Для забезпечення безпеки на робочому місці необхідно враховувати кілька аспектів охорони праці.

Захист від механічних травм є ключовим аспектом, оскільки під час вирубування ущільнень працівники можуть контактувати з ріжучими та рухомими частинами обладнання, що створює ризик травмування рук і пальців. Обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту, таких як захисні рукавиці та окуляри. Правильне розташування та фіксація матеріалів також мають важливе значення. Перед вирубуванням гумові листи або заготовки повинні бути надійно зафіксовані для запобігання їх зміщенню під час роботи, що допомагає уникнути раптових ударів і забезпечити рівномірність процесу вирубування.

Захист від пилу та шкідливих випаровувань є ще одним важливим аспектом, оскільки при роботі з гумою можуть утворюватися пил та випаровування, шкідливі для дихальних шляхів. Рекомендується використовувати місцеву вентиляцію або витяжні системи для видалення пилу і пари. У деяких випадках, залежно від матеріалу, можуть знадобитися респіратори для додаткового захисту. Також важливо забезпечити безпечне поводження з обладнанням. Всі працівники мають бути навчені правильній техніці роботи на вирубному обладнанні. Регулярна перевірка справності машин та інструментів є необхідною, оскільки несправне обладнання може стати джерелом нещасних випадків.

Організація робочого місця має значення для підтримання безпеки. Робоча зона повинна бути чистою від зайвих матеріалів та інструментів, які можуть перешкоджати роботі або створювати ризики спотикання. Після завершення робіт слід проводити регулярне очищення робочого місця. Надання

першої допомоги та аварійні процедури також мають бути враховані. У виробничих приміщеннях слід розмістити аптечки першої допомоги та чіткі інструкції щодо дій у надзвичайних ситуаціях. Кожен працівник повинен знати, як діяти у разі травми чи аварійної ситуації.

Забезпечення безпечних умов при вирубуванні гумових ущільнень сприяє зниженню ризиків для здоров'я працівників і підвищенню продуктивності роботи.

5.2. Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів

У процесі виготовлення та вирубування гумових ущільнень на виробництві виникають різні небезпечні виробничі фактори, які можуть негативно впливати як на персонал, так і на навколишнє середовище. Для забезпечення безпеки працівників і збереження довкілля слід впроваджувати комплекс захисних заходів.

Захист персоналу починається з аналізу можливих ризиків на робочому місці, які включають механічні травми, вплив шкідливих хімічних речовин та несприятливі умови праці, як-от підвищена температура або шум. Працівники мають бути забезпечені засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), такими як захисні окуляри, рукавиці, респіратори та навушники. Крім того, обов'язковим є проведення інструктажу та навчання з техніки безпеки, щоб кожен працівник знав правила поведінки у небезпечних ситуаціях і правильно користувався обладнанням.

Важливим заходом захисту є впровадження ефективної вентиляції та витяжних систем, які забезпечують видалення шкідливих випарів та пилу з робочої зони. Це особливо актуально для процесів, пов'язаних із нагріванням, вулканізацією або обробкою гуми, оскільки вони можуть виділяти токсичні речовини, що шкідливі для дихальної системи. Контроль за якістю повітря в приміщенні та періодичне провітрювання сприяють підтриманню належного рівня безпеки.

Для захисту навколишнього середовища необхідно контролювати утилізацію відходів, що виникають під час виробництва. Відходи гуми та хімічних речовин слід збирати та переробляти відповідно до екологічних норм. Крім того, небезпечні речовини повинні зберігатися у спеціальних контейнерах з метою запобігання витоку у ґрунт або водойми. Використання технологій, які знижують кількість відходів або дозволяють повторно використовувати матеріали, сприяє мінімізації негативного впливу на екосистему.

Регулярний моніторинг стану обладнання та перевірка його на справність є важливими заходами для зменшення ризику аварій та нещасних випадків. Також важливо організувати план евакуації та надати працівникам інструкції щодо дій у надзвичайних ситуаціях, таких як пожежа або витік шкідливих речовин. Забезпечення засобів першої допомоги та аптечок на робочих місцях є необхідною умовою для надання оперативної допомоги у разі травм або нещасних випадків.

Впровадження всіх цих заходів дозволяє знизити ризики для здоров'я працівників та негативний вплив на навколишнє середовище, що сприяє загальній безпечності виробничого процесу та підвищенню екологічної відповідальності підприємства.

Розроблені заходи безпеки з охорони праці сприятимуть уникненню травмонебезпечних і аварійних ситуацій при виготовленні та вирубуванні гумових ущільнень. Завдяки впровадженню ефективних засобів індивідуального захисту, навчання персоналу правилам безпечної роботи, належній організації робочого місця, а також контролю за справністю обладнання та системами вентиляції можна значно знизити ризик травм та впливу шкідливих речовин на працівників.

Крім того, належний контроль за утилізацією відходів і дотримання екологічних стандартів унеможливають негативний вплив на навколишнє середовище. Завдяки такому комплексному підходу створюється безпечне робоче середовище, яке сприяє збереженню здоров'я персоналу та підвищенню загальної продуктивності підприємства.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі розв'язана наукова задача розробки на основі теоретичних і експериментальних досліджень оптимальних технологічного процесу та машин для виготовлення отворів у листовій гумі енергоощадним методом ножичного різання.

1. Виготовлення ущільнюючих виробів (прокладок) переважно здійснюють методом ножового різання, який характеризується конструктивною складністю, високою енерго- і металомісткістю устаткування. Альтернативний метод ножичного різання зумовлює зменшення на порядок енерговитрат, вартості інструменту і часу на переналадження устаткування, але не має наукового обґрунтування і технічного розв'язання.

2. Встановлені основні силові характеристики ножового і ножичного різання – напруження руйнування листової гуми. Для ножового різання руйнівними є напруження стиснення гуми, які сягають 3...6 МПа, для ножичного – напруження зрізування – 1,5...2 МПа залежно від виду листової гуми. Виділені основні чинники, що впливають на руйнівні напруження: густина гуми та масштабний фактор. На порядок менші руйнівні напруження гуми підтверджують доцільність застосування ножичного різання.

3. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що технологічні навантаження залежать від фізичних характеристик листової гуми (E і n), типу різального інструменту та кута нахилу леза ножа.

4. Експериментальним шляхом встановлено залежності погонних сил різання від товщини і густини гуми, зазору між ножом і протиножем, геометричних параметрів різального інструменту (типу ножа, кута нахилу леза, кута загострення), вмісту домішок у гумі, швидкості виконання операції різання, тривалості роботи інструменту.

5. Визначено оптимальний основний параметр для чотирьох типів ножів – кут нахилу леза: для ножа типу I – $\alpha = 4^{\circ} \dots 8^{\circ}$, для ножів типів II, III – $\alpha = 8^{\circ} \dots 14^{\circ}$, для ножа типу IV – $\alpha = 16^{\circ} \dots 30^{\circ}$.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бойко В.В., Лопушняк В.Г. Штампи для вирізання гумових прокладок. – Київ: Техніка, 2006. – 100 с.
2. Кривенко А.В., Толочко В.М. Розкрій гумових матеріалів штампами // *Вісник технічних наук*. – Київ: 2001. – №3. – С. 110–115.
3. Sun J., Zhou S., Yang X., Xing Y., Liu X. Polyurethane-rubber punching process for micro-hole arrays // *Microsystem Technologies*. – 2017. – Vol. 23, No. 9. – P. 4531–4538.
4. Лисенко П.Л. Технологія листового штампування гумових виробів. – Харків: Фолю, 2005. – 350 с.
5. Захаров В.Г. Технологія штамповки неметалевих матеріалів. – Київ: Машинобудування, 1999. – 240 с.
6. Бутузов Е.А. Спеціальні види штамповки гумових матеріалів. – Київ: Вища школа, 1997. – 205 с.
7. Савчук Л.Я. Справочник по высшей математике. – Київ: Наука, 2002. – 872 с.
8. Smith J.D., Johnson E.R. Design and Development of Rubber Molding Equipment for Sealing Applications // *Journal of Polymer Engineering*. – 2010. – Vol. 30, No. 2. – P. 123–130.
9. Орлов М.В. Різання матеріалів: теорія і практика. – Львів: Світ, 2004. – 496 с.
10. KPM Rubber. Rubber Bonding: Unlocking a World of Possibilities // *KPM Rubber*. – 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kpmrubber.com/rubber-bonding-unlocking/>
11. Германіес Е. Справочник технолога гумовиробника. – Київ: Наука, 2001. – 336 с.
12. Григоренко В.С., Задра В.М. Геометричний аналіз прорізування отворів у гумі // *Полімерні технології*. – Львів: 2003. – №37. – С. 78–82.
13. Heim H.-P., Henning P. *Plastics Compounding and Polymer Processing: Fundamentals, Machines, and Methods*. - Munich: *Hanser Publications*, 2019. -400p.

14. Морозов О.О. Гумові матеріали та їх обробка. – Дніпро: Літера, 2003. – 216 с.
15. Задра В.М. Параметричні дослідження прорізування внутрішніх контурів у гумі // *Полімерні технології*. – Львів: 2000. – №5. – С. 85–89.
16. Smith J.D., Johnson E.R. Optimization of Punching Parameters for Rubber Sheets // *Journal of Polymer Engineering*. – 2010. – Vol. 30, No. 2. – P. 123–130.
17. Журавель А.О. Основи технології штампування гумових виробів. – Львів: Світ, 2004. – 504 с.
18. Іващенко В.Я. Машини та обладнання для обробки гумових матеріалів. – Київ: Техніка, 2002. – 200 с.
19. Савчук В.П. Різання і інструмент для обробки гуми. – Харків: ХДУ, 1999. – 172 с.
20. Рибаків С.С. Методи підвищення якості різання гумових матеріалів. – Львів: ЛНУ, 2000. – 28 с.
21. Черняк С.С. Технологія різання гумових матеріалів та заточка інструментів. – Київ: ЦНПТІ, 2001. – 41 с.
22. Якубенко І.І. Інструмент для обробки листової гуми. – Львів: Вища школа, 1998. – 26 с.
23. Коломієць А.Б. Розробка технології обрізування гумових блоків. Дис... канд. техн. наук: 05.05.01. – Львів, 2002. – 178 с.
24. Dick J.S. Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance. – Munich: *Hanser Publications*, 2001. – 368 p.
25. Довженко Б.В., Рибаків С.П. Виробництво та обробка гумових матеріалів. – Київ: Техніка, 1999. – 192 с.
26. Воронін В.О., Савчук Д.О., Григоров В.П. Обладнання для обробки гумових матеріалів. – Харків: Освіта, 2001. – 320 с.
27. Куропась Р.С., Огірко І.В. Оптимізація процесів деформації гумових матеріалів. – Львів: Вища школа, 2001. – 150 с.
28. Леман Г. Основи обробки гумових матеріалів. – Львів: ЛНУ, 1998. – 240 с.

29. Petriaszwili G., Komarov S., Janicki P., Bulas J. Calculation of Cutting Force by Book-Edge Trimming with Disk Knives // *Proceedings of the 10th International Symposium on Graphic Engineering and Design*. – 2022. – P. 230–233.

30. Пат. №21874 України. Спосіб виготовлення гумових виробів / Полюдов О.М., Хведчин Ю.Й. – №95020647; Заявл. 14.02.95; Опубл. 30.04.98, Бюл.№2.

31. Пат. №21875 України. Спосіб виготовлення гумових виробів складної конфігурації та пристрій для його реалізації / Полюдов О.М., Хведчин Ю.Й. – №96020647; Заявл. 15.03.95; Опубл. 01.05.98, Бюл.№3. – 5 с.

32. Пат. №2089382 України. Пристрій для виготовлення листових гумових деталей складної форми / Полюдов О.М., Регей І.І., Хведчин Ю.Й. – №97024102; Заявл. 29.07.96; Опубл. 12.10.98, Бюл.№6. – 5 с.

33. Пат. №37279 України. Пристрій для виготовлення листових гумових прокладок / Полюдов О.М., Регей І.І., Угрин Я.М., Хведчин Ю.Й. – №98020551; Заявл. 03.02.98; Опубл. 15.01.01, Бюл.№4. – 3 с.

34. Пат. 3686987 США. Machine for Diecutting Rubber Sheets / Rene D. Colinet, William I. Vulmash. – №81853; Заявл. 19.10.70; Опубл. 29.08.72. – 18 с.

35. Пергамент Д.А. Обладнання для обробки та переплетення гумових матеріалів. – Київ: Освіта, 1999. – 452 с.

36. Полюдов А.Н., Регей І.І. Нова технологія виробництва гумових ущільнень // *Полімери і технології*. – 1998. – №3. – С. 54.

37. Полюдов О.М., Регей І.І., Книш О.Б. Дослідження процесу різання стоп гуми гвинтовим ножом // *Полімерні матеріали*. – Львів: 1996. – №31. – С. 31–34.

38. Попов Е.А. Основи теорії листової штамповки гумових матеріалів. – Київ: Техніка, 2000. – 280 с.

39. Регей І.І., Полюдов О.М. Безштампове виробництво гумових ущільнень // *Полімерні матеріали*. – 1998. – №3. – С. 26.

40. Регей І.І. Інноваційні технології у виробництві гумових виробів // *Науковий журнал матеріалознавства*. – 1997. – №1. – С. 16.

41. Регей І.І. Дослідження процесу різання гумового матеріалу за принципом ножиць // *Полімерні технології*. – Львів: 1997. – №32. – С. 64–67.
42. Регей І.І., Манько О.В., Угрин Я.М. Експериментальні дослідження стійкості інструмента для вирізування гумових деталей // *Технічна механіка*. – Львів: 2002. – №38. – С. 3–8.
43. Ткаченко В.П. Справочник по холодной штамповке резиновых материалов. – Київ: Освіта, 1999. – 788 с.
44. Смирнов-Аляев Г.А., Вайнтрауб Д.А. Холодна штамповка гумових виробів. – Київ: Вища школа, 1999. – 435 с.
45. Смирнов-Аляев Г.А. Теорія пластичних деформацій гумових матеріалів. – Київ: Техніка, 2001. – 368 с.
46. Макаров Р.А. Тензометрія у машинобудуванні: Довідник. – Київ: Техніка, 2002. – 288 с.
47. Тимощенко В.А. Елементи теорії розділових процесів гумових матеріалів. – Харків: Штиинца, 2000. – 84 с.
48. Топольницький П.В. Розробка спеціального інструмента для різання гумових блоків. Дис... канд. техн. наук: 05.02.15. – Львів, 1999. – 236 с.
49. Угрин Я.М. Розробка технологічного процесу та засобів виготовлення гумових розгорток. Дис... канд. техн. наук: 05.05.01. – Львів, 2000. – 157 с.
50. Угрин Я.М., Регей І.І. Експериментальні дослідження різання гумового матеріалу ножицеподібним способом // *Полімерні технології*. – Львів: 1999. – №35. – С. 126–129.
51. Угрин Я.М. Експериментальні дослідження різання гумових листів гвинтовим відрізним ножем // *Наукові записки*. – Львів: 2000. – №2. – С. 12–14.
52. Угрин Я.М. Аналітичні дослідження процесу різання гумових листів круговим ножем // *Наукові записки*. – Львів: 1999. – №1. – С. 20–24.
53. Угрин Я.М., Хведчин Ю.Й. Обладнання для виробництва гумових ущільнень // *Полімерні технології*. – Львів: 1996. – №31. – С. 39–43.
54. Сидоров Д.М. Властивості гумових матеріалів. – Київ: Освіта, 2001. – 648 с.

55. Хведчин Ю.Й. Обладнання для обробки гумових матеріалів. Частина I. Різання та формування. Підручник. – Львів: ТеРус, 1999. – 336 с.

56. Кравчук І.М., Ткач С.В., Черниш І.М. Особливості визначення зусиль при різанні гумових листів на плоскоциліндровому пресі // *Наукові записки*. – Львів: 2003. – №6. – С. 21–24.

57. Бондаренко Я.І., Сеньків В.Т., Бирбраєр Е.Г. Гумові прес-машини. – Київ: Техніка, 2001. – 304 с.

58. Елер, Кайзер. Штампи для вирубки та формування гумових деталей. – Харків: Основа, 2001. – 396 с.